Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская академия наук
Научный совет РАН по проблеме
«Координатно-временное и навигационное обеспечение»

Десятая всероссийская конференция с международным участием

Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2023)

17–21 апреля 2023 г.

Санкт-Петербург

Тезисы докладов

Санкт-Петербург
2023

Сборник содержит расширенные тезисы докладов, представленных на 10-й всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2023), Санкт-Петербург, 17–21 апреля 2023 г. Работы, представленные в сборнике, охватывают широкий круг вопросов фундаментального и прикладного координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) страны, включая концептуальные проблемы развития отечественной системы КВНО, методы и средства фундаментального и прикладного КВНО, аппаратурные и программные средства решения задач КВНО, результаты наблюдений и их обработки.

© Институт прикладной астрономии РАН, 2023

Содержание

Новая версия системы «Штурман» 16

Д. А. Аксим, Г. А. Космодамианский, М. В. Лукашова, Д. А. Павлов, М. Л. Свешников, В. И. Скрипниченко

Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени ГЭВЧ 18

С. Ю. Антропов, Е. Ю. Глазов, А. В. Наумов, И. Б. Норец, Ю. Ф. Смирнов

Влияние моделей ионосферы и дифференциальных кодовых задержек на точность координатного решения потребителей ГЛОНАСС 20

А. А. Аржанников, В. Д. Глотов, В. В. Митрикас

Решение задач наблюдения на основе КВНО для повышения ситуационной осведомленности экипажа воздушного судна 23

В. И. Бабуров, Н. В. Иванцевич, С. Б. Уткин, В. В. Худошин

Новые подходы к созданию унифицированной аппаратуры СЕВ нового поколения для различных классов потребителей 24

А. С. Батура, Л. Я. Белов, А. В. Крупская

Применение высокопроизводительных вычислительных систем для формирования эфемеридно-временной информации о КА ГНСС и определения ПВЗ в оперативном режиме по данным измерений ГНСС 26

И. В. Безменов, С. Л. Пасынок, А. Э. Дроздов

Оценка производительности современных дисковых накопителей для задачи буферизации и передачи РСДБ-данных 27

И. А. Безруков, А. И. Сальников, В. В. Васильев, А. В. Вылегжанин

Пассивный водородный стандарт частоты с накопительной колбой увеличенного объема 28

А. А. Беляев, И. А. Викулов, Н. А. Демидов, С. А. Князев, А. А. Лысенко, А. С. Пелюшенко, А. С. Скрыль

Перспективный активный водородный стандарт частоты VCH-2021 30

А. А. Беляев, В. Г. Воронцов, Н. А. Демидов, Д. Г. Князев, В. А. Поляков, Ю. В. Тимофеев

Совершенствование методов передачи времени через ДВ радиостанции ИФРНС 31

П. В. Белянкин, Е. Т. Жуков

Об уточнении характеристик изотопных фильтров для квантовых стандартов частоты на рубидиевой газовой ячейке традиционного типа 33

О. В. Березовская, А. В. Кудрявцева, Г. М. Смирнова, М. В. Хуторщиков

Интеллектуализация технологического цикла навигационно-баллистического обеспечения управления КА 35

В. В. Бетанов

Результаты анализа передачи времени через ГНСС 37

П. П. Богданов, А. Ю. Феоктистов

Анализ функционирования бортовых часов КА ГНСС 39

П. П. Богданов, А. Ю. Феоктистов

Идентификация неблагоприятных погодных условий при эксплуатации радиометра водяного пара 40

В. Ю. Быков, Г.Н. Ильин, В. Г. Стэмпковский, А.М. Шишикин

К вопросу об обновлении методических указаний для расчёта звёздного времени применительно к бесплатформенным астроинерциальным навигационным системам 41

Н. Н. Василюк, И. С. Каютин

Обзор опыта практического использования радиометра водяного пара в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ» 43

У. С. Вахрушева, Л. П. Драгайло

Решение проблемы использования эталонных геоцентрических координат при испытаниях НАП ГНСС 44

В. С. Вдовин, И. А. Аникеева

Результаты экспериментальной работы макета высокоточного навигационного приемника для частотно-временного обеспечения 46

А. В. Вейцель, С. А. Семенов, Н. Н. Василюк

Солнечный радиотелескоп РТ-1.8 Уссурийской астрофизической обсерватории. Первые результаты 47

Ю. В. Векшин, В. Ю. Быков, Д. В. Ерофеев, М. Б. Зотов, А. С. Лавров, В. Г. Стэмпковский, Е. Ю. Хвостов, В. К. Чернов, А. М. Шишикин

Перспективы развития гравиметрического пункта в обсерватории «Светлое» 48

Л. Ф. Витушкин, И. С. Гаязов, М. Н. Дробышев, Д. В. Иванов, Е. П. Кривцов, П. П. Кролицкий, П. С. Михайлов, В. В. Наливаев, О. А. Орлов, И. А. Рахимов, С. Г. Смоленцев

Изменение характера движения станции GNSS-KTVL после землетрясений в Турции в феврале 2023 г. 50

А. Е. Вольвач, А. И. Дмитроца, Д. И. Неяченко

Создание RESTful API для хранения данных наблюдений лазерной локации спутников 51

А. Е. Вольвач, А. И. Дмитроца, Д. И. Неяченко

Изменения параметров среднего полюса Земли и геомагнитного поля за последнее столетие 52

А. Е. Вольвач, Г. С. Курбасова, Л. Н. Вольвач

Резервирование ГНСС сетевой структурой наземных источников навигационных сигналов, работающих в ДВ и УКВ диапазонах частот 53

М. А. Воронов, С. М. Воронов

Анализ применения мобильной радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой по разным источникам для высокоточного позиционирования потребителей 55

Д. А. Гаврилов, К. К. Зубарев, А. И. Яковлев

Актуальные вопросы определения ПВЗ по международным и отечественным сериям наблюдений 57

И. С. Гаязов, С. Л. Курдубов, Е. А. Скурихина

Актуальное состояние возможностей и результатов ИАЦ КВНО в области мониторинга и оценки характеристик ГНСС и информационной поддержки потребителей 58

В. Д. Глотов, А. А. Аржанников, В. Л. Лапшин, Е. В. Бакаева, С. Д. Жиленко

Измерение и стабилизация оптических частот с использованием фемтосекундной оптической гребенки и активного водородного мазера 59

А. А. Головизин, Д. О. Трегубов, М. О. Яушев, Д. И. Проворченко, Д. А. Мишин, П. Л. Сидоров, К. П. Галстян, И. В. Заливако, И. А. Семериков, К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский

Построение системы навигации и ориентации летательного аппарата на основе измерений реликтового излучения 61

М. В. Гордин, Д. А. Базлев, В. О. Гладышев, В. Л. Кауц, А. В. Каютенко, П. П. Николаев, Е. А. Шарандин

Универсальная цифровая система обработки сигналов для радиотелескопов 62

С. А. Гренков, Н. Е. Кольцов, Д. А. Маршалов, Л. В. Федотов

Аппаратно-программный анализ сигналов промежуточных частот на основе многофункциональной цифровой системы преобразования сигналов 63

С. А. Гренков, Д. А. Маршалов, А. Г. Михайлов, А. Б. Устинов, Л. В. Федотов

Регистрация радиоизлучения в спектральных линиях на основе многофункциональной цифровой системы преобразования сигналов 64

С. А. Гренков, И. А. Рахимов, Л. В. Федотов

Фундаментальная астрометрия и фотометрия в России: задачи, текущее состояние и перспективы 65

С. Н. Додонов

Концепция проекта «Комплекс методов и средств высокоточного гравиметрического, магнитометрического и геодезического обеспечения удаленных регионов РФ, в том числе региона российской Арктики» 66

С. И. Донченко, О. В. Денисенко, И. С. Сильвестров, В. Ф. Фатеев

Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022 и формирование национальной шкалы времени Российской Федерации 68

С. И. Донченко, О. В. Денисенко, В. Н. Федотов, Ю. Ф. Смирнов, И. Б. Норец, А. А. Карауш, О. В. Купалова

Совершенствование системы распараллеливания программы определения ЭВИ в ГМЦ ГСВЧ 70

А. Э. Дроздов

Технология высокоточной синхронизации пространственно удаленных наземных ШВ и бортовых ШВ РЭВЧ двухпутевым методом на основе средств измерений текущих навигационных параметров наземного комплекса управления ГЛОНАСС 71

А. В. Дружин, С. В. Подрезов, Ю. А. Винник

Результаты и перспективы космической гравиметрии: орбитальный градиентометр 72

В. Е. Жаров

Возможности по увеличению протяжённости ВОЛС при передаче сигналов частоты и времени модемами VCH-608 73

А. В. Жеглов, Р. С. Кобяков, Р. Н. Новожилов, С. Ю. Медведев

Результаты наблюдений космических аппаратов ГНСС ГЛОНАСС с асимметрией амплитудной диаграммы направленности антенно-фидерного устройств 75

А. С. Завгородний

Региональные и локальные движения постоянно действующих ГНСС-станций в Европейской части РФ 78

Р. В. Загретдинов, В. Ф. Бахтиаров, А. А. Загретдинов

Центр корреляционной обработки РАН: передача, хранение и обработка радиоастрономических наблюдений 80

В. Ф. Зимовский, И. А. Безруков, М. В. Васильев, В. О. Кен, С. Л. Курдубов, А. Е. Мельников, А. Г. Михайлов, В. Ю. Мишин, А. И. Сальников, И. Ф. Суркис

Корреляционная обработка РСДБ-наблюдений, зарегистрированных в разных режимах 81

М. С. Зорин, И. Ф. Суркис

Измерения плотностей потоков и переменности стандартных источников шкалы потоков ИЛ на временной шкале 2.5 года 82

В. П. Иванов, А. В. Ипатов, И. А. Рахимов, Т. С. Андреева

Итоги исследований Солнца по наблюдениям солнечных затмений на радиотелескопах ИПА РАН за период 1999-2022 гг. 84

Д. В. Иванов, И. А. Рахимов, А. А. Дьяков, Г. Н. Ильин, Н. Г. Петерова , Н. А. Топчило, А. В. Ипатов, Т. С. Андреева, Е. Ю. Хвостов, В. Ю. Быков

Применение новых методов обработки для повышения точности результатов лазерно-локационных измерений в условиях действия неблагоприятных внешних факторов 85

И. Ю. Игнатенко, И. В. Безменов

Учёт климатических и локальных особенностей места размещения РВП при расчёте тропосферной задержки 86

Г. Н. Ильин, В. Ю. Быков

Активные космические эксперименты в ионосфере и магнитосфере Земли с использованием энергии радиоволн ВЧ диапазона 88

А. В. Ипатов, Л. А. Ведешин

Антенная система и приемный комплекс прототипа передвижной станции РСДБ-сети «Квазар-КВО» 89

А. В. Ипатов, Д. В. Иванов, М. Б. Зотов, В. Г. Стэмпковский, Е. Ю. Хвостов, В. К. Чернов, А. М. Шишикин, И. В. Шахнабиев

Государственный первичный специальный эталон координат местоположения ГЭТ 218-2022 90

А. М. Каверин, Д. С. Печерица, Е. А. Карауш, М. А. Ханзадян

Оценка нестабильности бортовых стандартов частоты спутников ГНСС в Государственной службе времени и частоты 91

А. А. Карауш, И. В. Безменов

Алгоритм различения и оценки производных функции частоты сигналов высокостабильных задающих генераторов 92

В. А. Карелин

О проблемах создания ядерно-оптического стандарта частоты на основе ^{229}Th 94

Ф. Ф. Карпешин, Л. Ф. Витушкин

Применение волоконно-оптического модема «VCH-608» для передачи эталонного сигнала частоты на радиотелескопы сети «Квазар-КВО» 96

А. С. Карпичев, А. О. Амельченко, А. В. Вытнов

Научно-технические проблемы развития системы ГЛОНАСС в современных условиях 97

С. Н. Карутин

От первых мазеров к оптическим стандартам частоты: 100-летие со дня рождения Н. Г. Басова 98

Н. Н. Колачевский

Высокочастотные Nd:YAG лазеры для спутниковых измерительных систем нового поколения 99

А. Ф. Корнев, В. В. Коваль, Ю. В. Кацев, А. В. Едигарев, Д. О. Оборотов, И. Г. Кучма

Перегрузка и охлаждение ионов Yb^+ в комбинированной квадрупольно-мультипольной ловушке для реализации микроволнового стандарта частоты 101

А. Е. Корольков, И. Журавлев, К. Павленко, И. А. Семериков, И. В. Заливако, А. С Борисенко, М. Д. Аксенов, П. Л. Сидоров, Н. В. Семенин, В. Н. Смирнов, К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский

Принципы работы и оценка некоторых характеристик функционального дополнения системы ГЛОНАСС 103

И. В. Котов, А. А. Аржанников, В. Д. Глотов

Устройство стабилизации частоты подстраиваемого генератора 105

Е. В. Крохина, О. В. Колосова, В. Л. Налетов, Л. А. Лисицын

Повышение точности аппроксимации движения земного полюса при изменении параметров чандлеровского и годичного колебаний 107

С. С. Крылов, В. В. Перепёлкин

Компактные транспортируемые ультрастабильные лазерные системы для квантовых вычислений, метрологии и сенсорики 108

Д. С. Крючков, К. С. Кудеяров, Г. А. Вишнякова, Н. О. Жаднов, К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский

Компенсация систематической составляющей погрешности автоматизированного астрономического универсала, обусловленной сбоями синхронизации данных 110

Н. В. Кузьмина, С. М. Тарасов, В. В. Цодокова

Влияние гравитационного воздействия Луны на колебания полюса Земли 111

С. А. Кумакшев, В. В. Перепелкин

Синтез полосы частот в Ка-диапазоне при обработке РСДБ-наблюдений 113

А. С. Кумейко, И. Ф. Суркис

Определение углов нутации по часовым РСДБ-наблюдениям 114

С. Л. Курдубов, Р. М. Урунова

Совершенствование нормативно-правовой и нормативно-технической базы фундаментального и метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС 115

Е. Р. Лазаренко, С. И. Донченко, О. В. Денисенко

Развитие Федеральной сети геодезических станций 117

А. Ю. Лапшин, В. А. Луповка, С. В. Староверов, Д. И. Дудников, А. Ф. Татаренков, А. С. Червяков, А. Г. Табунков, Е. С. Бекчанова, И. А. Сухарев-Крылов, Г. Э. Мельник, А. Г. Марин, А. А. Смирнова, И. А. Постоенко, Н. А. Бовшин, Т. Л. Сидорова-Бирюкова

Концепция поэтапного развития структуры спутниковой навигационной системы для обеспечения перспективных требований к навигационно-информационному обеспечению 118

Н. В. Леонидов, Д. И. Марарескул, И. И. Шилко, Ю. Б. Волошко, О. В. Ружилова

Автономная астронавигационная система «Навигатор» 119

М. В. Лукашова, М. Л. Свешников, Е. Ю. Парийская, Д. А. Желдак, Г. А. Космодамианский, В. И. Скрипниченко

Квантовые футштоки и эффект Саньяка 121

Е. М. Мазурова, А. Н. Петров

Космические аппараты Polytech Universe-1, Polytech Universe-2 123

С. Б. Макаров

Особенности формирования достоверной шкалы времени в сетях связи 124

С. Ю. Медведев, К. Г. Мишагин, А. В. Рыжков, Б. А. Сахаров, М. Л. Шварц

Мониторинг малых небесных тел: цели и задачи практического применения 125

Ю. Д. Медведев, Ю. С. Бондаренко, Д. А. Маршалов, Б. М. Шустов, М. Ю. Ховричев

Негравитационные эффекты в движении кометы 45 P/ Хонда-Мркос-Пайдушакова 127

Ю. Д. Медведев, С. Р. Павлов, Ю. А. Чернетенко

Решение задачи Молоденского по чистым аномалиям силы тяжести с относительной ошибкой порядка квадрата сжатия 128

И. И. Меженова, В. В. Попадьёв

Точность определения скоростей движения геодезических пунктов 129

Г. Э. Мельник, И. А. Ощепков

База скоростей станций ГНСС СПбГУ для решения различных задач 131

П. В. Мовсесян

Магнитное поле Земли как источник информации для определения параметров движения объектов 133

А. А. Мусин

Разработка отечественного астрофотометрического каталога звёзд всего неба в интересах обеспечения специальных комплексов 135

М. И. Олейников, В. В. Широбоков

Приливы и фигура Земли 137

И. А. Ощепков, И. И. Меженова, И. Х. Невретдинов

Развитие государственной гравиметрической сети России 138

И. А. Ощепков, Е. П. Разинькова, В. С. Башкатов, О. А. Забузова, И. А. Сухарев-Крылов, А. К. Ефименко, Е. А. Чистякова

Радиолокационные карты видимой стороны Луны с высоким пространственным разрешением 140

С. Р. Павлов, Ю. С. Бондаренко, Д. А. Маршалов

Сверхминиатюрный квантовый стандарт частоты на КПН-эффекте 141

В. Г. Пальчиков

Достигнутые характеристики и направления совершенствования системы высокоточного определения эфемеридно-временной информации, реализующей услугу высокой точности для гражданских потребителей 143

В. В. Пасынков, В. Ф. Брагинец

Использование лазерно-оптических бортовых систем для повышения точности системы ГЛОНАСС 145

В. В. Пасынков, С. И. Донченко, В. В. Мурашкин, Е. В. Титов

Проблемные вопросы фундаментального КВНО в интересах ГЛОНАСС в современных условиях и предложения по их парированию 147

В. В. Пасынков, А. В. Ипатов

Варианты дополнения системы ГЛОНАСС низкоорбитальным сегментом для парирования региональности наземного сегмента ЭВО 150

В. В. Пасынков, К. В. Кисленко, Е. В. Титов

Апробирование метода исключения полиномиального тренда из измерений параметров вращения Земли с помощью двойного вейвлет-преобразования 153

С. Л. Пасынок

Текущее состояние работ ГМЦ ГСВЧ в части определения ПВЗ 154

С. Л. Пасынок, С. Ю. Антропов, И. В. Безменов, А. Э. Дроздов, В. Е. Жаров, И. Ю. Игнатенко, Е. Н. Цыба, В. Н. Федотов

Вариации параметров движения земного полюса с частотой прецессии лунной орбиты 155

В. В. Перепёлкин, А. С. Филиппова, А. А. Шабунина

Вопросы прослеживаемости результатов калибровки беззапросных радиотехнических измерительных средств в части систематической погрешности псевдодальности к первичным эталонам 156

Д. С. Печерица, А. М. Каверин, С. Ю. Бурцев

Анализ результатов оценивания задержек навигационных сигналов на борту космических аппаратов системы ГЛОНАСС за период 2019-2022 гг. 157

Д. С. Печерица, Е. А. Карауш

Комплексная радиотехническая система координатно-временного и информационного обеспечения потребителей как альтернативный инструмент устойчивого навигационного и частотно-временного обеспечения 159

С. Б. Писарев

Результаты последнего уравнивания ФАГС в системе ITRF 160

В. В. Попадьёв

Погрешности оценки ионосферной задержки сигналов ГЛОНАСС по двухчастотным фазовым измерениям 162

В. Б. Пудловский

Совершенствование теории высот в гравитационном поле Земли 163

С. С. Рахмонов, В. В. Попадьев

Сравнение характеристик бортовых стандартов частоты на основе высокоточных данных международной службы ГНСС 165

А. В. Сальцберг, К. Г. Шупен, О. Е. Нечаева

Комплекс средств подтверждения характеристик сложных комплексированных навигационных систем 166

С. Г. Серко, А. А. Мусин

Перспективное координатно-временное навигационное обеспечение потребителей повышенной точности на базе СДКМ-КФД 168

В. Г. Сернов, Д. В. Филимонова, Ю. В. Исаев

Определение координат и времени пункта по локальным радиосигналам 170

С. С. Смирнов, С. Д. Петров Д. А. Трофимов, И. В. Чекунов

Адаптивная коррекция искаженных измерений тропосферной задержки прохождения радиосигнала в режиме реального времени 172

В. Г. Стэмпковский

Прогнозирование величины задержки прохождения радиосигнала в тропосфере на основе статистического анализа 173

В. Г. Стэмпковский

Автоматизированная фокусировка антенной системы радиотелескопа РТ-32 174

В. Г. Стэмпковский, М. А. Шишикин

Исследование переходных и колебательных процессов в движении антенной системы при сопровождении космического источника радиосигнала 175

В. Г. Стэмпковский, М. А. Шишикин

РСДБ-коррелятор с обратной связью для обработки наблюдений искусственных спутников Земли 176

И. Ф. Суркис

Планирование и обработка дифференциальных РСДБ-наблюдений космических аппаратов ГЛОНАСС 177

И. Ф. Суркис, И. А. Арнаут, В. Ф. Зимовский, А. С. Кумейко, А. Е. Мельников, С. Р. Павлов

Отработка методики прогнозирования расхождения шкал бортовых часов с помощью программного имитатора 178

В. М. Тиссен, А. Ю. Балахненко, В. Д. Рачков

Вариации параметров вращения Земли и их использование для повышения точности прогностических моделей 179

В. М. Тиссен, А. С. Толстиков, Г. В. Шувалов

Фотоэлектронная регистрация звездных прохождений 181

А. Л. Толстой, С. Д. Петров, Д. А. Трофимов, С. С. Смирнов

Опыт исследований прилимбовой зоны Солнца по наблюдениям на крупных полноповоротных радиотелескопах 183

Н. А. Топчило, В. Г. Нагнибеда, Н. Г. Петерова

Обработка лазерно-локационных измерений при сличении шкал времени на космическом аппарате и станции лазерной локации 184

В. Н. Тряпицын, И. Ю. Игнатенко

Малогабаритный носимый высокоточный относительный гравиметр «Пешеход» 185

В. Ф. Фатеев, С. Б. Акпанбетов, Д. С. Бобров, Р. А. Давлатов, Д. С. Олейников

Космический пункт геофизической колокации 187

В. Ф. Фатеев, Д. С. Бобров, В. П. Лопатин, Р. А. Давлатов М. М. Мурзабеков

Мобильный пункт геофизической колокации 189

В. Ф. Фатеев, Д. С. Бобров, М. М. Мурзабеков, Р. А. Давлатов, В. П. Лопатин

Влияние GPS-спуфинга на навигационные приемники сигналов ГНСС 191

А. П. Фокин, Н. Н. Фокина

Совершенствование методов расчета характеристик базовой навигационной услуги системы ГЛОНАСС 194

А. А. Фролов, Е. А. Карауш, В. О. Жилинский

Совершенствование программно-аппаратных средств определения глобальных геодинамических параметров во ФГУП «ВНИИФТРИ» 195

Е. Н. Цыба, С. Л. Пасынок, С. С. Панарин

Исследование частотных свойств оптического стандарта на одиночном ионе иттербия 196

С. В. Чепуров, М. И. Нестеренко, Д. М. Грязнов, Д. Ю. Примаков, С. Н. Багаев, А. С. Дычков

Особенности динамики орбит активных астероидов 197

Ю. А. Чернетенко, С. Р. Павлов

Методы геодезического контроля зеркальных систем радиотелескопов РТ-32, РТ-13 199

А. О. Шамов

Радиолазерный комплекс «Точка». Опыт эксплуатации и достигнутые результаты. Перспективы применения, расширяющие возможности фундаментального КВНО 200

В. Д. Шаргородский, И. Ю. Игнатенко, А. А. Федотов

Релятивистские эффекты при синхронизации шкал времени для различных типов орбит космических аппаратов 201

К. Г. Шупен

О комплексном подходе к оценке характеристик бортовых стандартов частоты и частотно-временного обеспечения ГНСС 203

К. Г. Шупен, А. В. Сальцберг, О. Е. Нечаева

Геодинамические исследования Восточно-Европейской платформы по ГНСС-данным 205

Н. В. Щербакова, В. Л. Горшков, С. Д. Петров, П. В. Мовсесян, С. С. Смирнов, Д. А. Трофимов

Методика определения астрономического азимута с использованием высокоточного электронного тахеометра Leica TC 2003 207

А. И. Яковлев, Р. И. Алтунин, К. К. Жбанов, А. В. Прокофьев

Метод определения астрономического азимута с использованием спутниковой навигационной аппаратуры и вычисления уклонения отвесных линий по разности высот квазигеоида 208

А. И. Яковлев, Р. И. Алтунин, А. С. Зуев

Новые параметры эфемериды Луны EPM 2022 209

Э. И. Ягудина, М. А. Лебедева

Научно-технические предложения по калибровке высокоточного радиовысотомера (альтиметра) отечественной космической геодезической системы в акватории Черного моря 210

Н. Н. Яковлев, А. В. Круглов, В. Н. Филатов, О. Ю. Федоров, И. П. Лангеман, Е. В. Даргель

Новая версия системы «Штурман»

Д. А. Аксим[1], Г. А. Космодамианский[1], М. В. Лукашова[1], Д. А. Павлов[2], М. Л. Свешников[1], В. И. Скрипниченко[1]

[1]ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]СПбГЭТУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Завершена разработка новой версии интерактивной системы удалённого доступа для морской астронавигации «Штурман». Помимо вычисления эфемерид, система позволяет решать основные навигационные задачи, включённые в «Морской астрономический альманах»: определение поправки компаса и определение места судна по наблюдениям высот светил. Реализованная версия опубликована на сайте Института [1].

Необходимость создания новой версии обусловлена следующими обстоятельствами. Некоторые решения, принятые в предыдущей версии, недостаточно учитывали возможности внесения изменений в систему без участия её первоначальных разработчиков. Кроме того, устаревают и постепенно перестают поддерживаться инструментальные средства, использованные в предыдущей версии системы.

Как и в прежней версии, алгоритмическую основу системы составляют программы на языке СЛОН, которые используются при вычислении примеров, публикуемых в выпусках Морского Астрономического Альманаха [2]. Теоретической основой эфемерид является созданная в ИПА РАН теория движения тел Солнечной системы EPM2021 [3]. В качестве основного вычислителя используется реализованная в кроссплатформенной среде Racket система ЭРА8 [4].

Полностью заново разработаны и заменены веб-интерфейс и движок сайта. Система ЭРА8 обладает возможностью работы в связке с веб-сервером, встроенным в платформу Racket, что и используется в системе «Штурман». Веб-формы пользовательских запросов с входными данными (дата, долгота и пр.) описаны на языке так называемых формлетов (formlets) и преобразуются в HTML с помощью средств Racket. Этими же средствами осуществляется синтаксический разбор и автоматический контроль заполненных запросов с диагностированием возможных ошибок ввода. Параметры запроса передаются в СЛОН-программу решаемой задачи системы «Штурман» в виде таблицы, сгенерированной в коде языка СЛОН.

Радикальным образом изменены средства управления видом изображения результатов работы системы. Эти средства упрощены до предела и преимущественно сводятся к вставке символа «вертикальная черта» между каждыми соседними полями очередной строки «печатаемого» СЛОН-программой результата. Выдача результатов осуществляется программой в стандартном потоке вывода в формате Markdown; выходной поток впоследствии преобразуется в HTML и передаётся на машину пользователя. В опубликованной версии используются также новые, более совершенные средства графического отображения результатов работы системы.

Литература

1. Интерактивная система «Штурман». URL: https://iaaras.ru/dept/yearbooks/shturman/.

2. Морской астрономический альманах на 2023–2024 гг. СПб.: ИПА РАН, 2022. 390 с.

3. Pitjeva E. V., Pavlov D. A., Aksim D. A., Kan M. Planetary and lunar ephemeris EPM2021 and its significance for Solar system research // Proceedings of the International Astronomical Union – Symposium S364, 2022. Vol. 15 P. 220–225.

4. Pavlov D. A., Skripcnichenko V. I. Rework of the ERA software system: ERA 8 // Proceedings of the Journées 2014 «Systèmes de Référence Spatio-Temporels». Pulkovo observatory, 2015. P. 243–246.

Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени ГЭВЧ

С. Ю. Антропов, Е. Ю. Глазов, А. В. Наумов, И. Б. Норец, Ю. Ф. Смирнов

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Применение водородных стандартов частоты и времени (ВСЧВ) позволило существенно снизить погрешность хранения шкалы времени по сравнению с другими квантовыми стандартами частоты (КСЧ). Оценки среднемесячных значений относительных разностей частот КСЧ, участвующих в формировании TAI, а также соответствующие относительные веса ежемесячно публикуются BIPM, что позволяет провести сравнительную оценку характеристик нестабильности КСЧ в системе TAI.

В 2014 г. BIPM был принят новый алгоритм взвешивания часов и прогнозирования хода часов в системе TAI [1]. При этом оценки относительных весов ВСЧВ, вносящих вклад в формирование TAI, увеличились почти на порядок по сравнению с аналогичными оценками, выполненными по предыдущему алгоритму формирования TAI. С принятием нового алгоритма взвешивания часов и прогнозирования хода часов суммарный вклад отдельной лаборатории времени в формирование TAI стал пропорционален количеству водородных стандартов в лаборатории.

С целью повышения точностных характеристик формирования национальной шкалы времени UTC(SU) в 2020 г. эталоны Государственной службы времени, частоты и определения ПВЗ (ГСВЧ) были оснащены ВСЧВ нового поколения, разработанными ЗАО «Время-Ч» [2].

Был проведен анализ характеристик долговременной нестабильности СЧВВ нового поколения ГЭВЧ и КСЧ из состава ведущих лабораторий времени США в системе TAI. Отмечено, что на интервалах времени измерения от 1 месяца до 4 месяцев нестабильность частоты ВСЧВ нового поколения на порядок меньше, чем для водородных стандартов типа NHM2010, и в три раза меньше, чем для рубидиевых стандартов частоты фонтанного типа из состава лаборатории USNO [3].

Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ) имеет в своем составе 16 активных водородных стандартов различных типов, из которых 6 являются ВСЧВ нового поколения. С января 2014 г. по август 2022 г. ГЭВЧ занимал второе место по относительному вкладу в формирование TAI, уступая лишь Военно-морской лаборатории США (USNO), которая в своем составе имеет более 50 КСЧ, из которых около 30 водородных стандартов частоты и времени типа NHM2010.

Ввод ВСЧВ нового поколения и новых средств воспроизведения и хранения единиц времени и частоты в состав ГЭВЧ привел к существенному улучшению метрологических характеристик эталона. С сентября 2022 г. ГЭВЧ по относительному вкладу в формирование TAI занимает первое место в мире [4], а шкала времени UTC(SU) входит в число лучших национальных реализаций UTC [5].

Литература

1. Panfilo G., Harmegnies A. A new weighting procedure for UTC // Metrologia. 2014. no. 51. P. 285–292.
2. Воронцов В. Г., Беляев А. А., Демидов Н. А. и др. Разработка активного водородного стандарта частоты и времени нового поколения для базового комплекса времени и частоты // Материалы VIII Международного симпозиума Метрология времени и пространства, 14–16 сентября 2016, г. Санкт-Петербург. 2016. С. 55–57.
3. Донченко С. И., Блинов И. Ю., Норец И. Б. и др. Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 35–38.
4. BIPM Time Department FTP server. BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES INTERNATIONAL ATOMIC TIME
5. [Электронный ресурс]. URL: https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/other-products/weights/w22.09 (дата обращения: 15.03.2023).
6. BIPM. CIRCULAR T 422. ISSN 1143–1393. [Электронный ресурс]. URL: https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/Circular-T/cirthtm/cirt.422.html (дата обращения: 15.03.2023).

Влияние моделей ионосферы и дифференциальных кодовых задержек на точность координатного решения потребителей ГЛОНАСС

А. А. Аржанников, В. Д. Глотов, В. В. Митрикас

ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», г. Королёв, Россия

Целью данной работы является оценка улучшения точности местоопределения ГЛОНАСС при использовании различных моделей ионосферы, а также межсигнальных C1C-C1P [1] и межчастотных C1P-C2P [1] дифференциальных кодовых задержек (англ. DCB – differential code bias). При этом использовались измерения всех навигационных сигналов ГЛОНАСС на частотах L1 и L2, формируемые коммерческими навигационными приемниками. Задержки АФНС (задержки в аппаратуре формирования навигационного сигнала), передаваемые потребителям в навигационных сообщениях ГЛОНАСС, существенно отличаются от наблюдаемых значений, однако в обозримом будущем планируется периодический пересчет задержек по измерениям Российских сетей станций и передача в кадре уточненных значений. Актуальность работы обусловлена тем, что позволяет заранее спрогнозировать эффект от планируемого нововведения. Для данной цели было проведено исследование по обработке реальных данных 300 глобально распределенных беззапросных измерительных станций (БИС) на 8-суточном интервале в январе 2023 г.

По оценкам ИАЦ КВНО погрешность задержки АФНС в кадре ГЛОНАСС значительно выше в сравнении с другими ГНСС (среднеквадратичные погрешности более 0.5 м для ГЛОНАСС и менее 0.1 м для остальных ГНСС) [2], поэтому существует потенциал улучшения точности местоопределения за счет уточнения данных задержек. Задержки DCB являются медленно меняющимися величинами (для примера, у КА GPS пересчет задержек в кадре происходит примерно раз в 3–4 месяца, у КА BeiDou — раз в месяц). В работе схематично представлена методика уточнения межсигнальных C1C-C1P и межчастотных C1P-C2P задержек АФНС ГЛОНАСС с помощью моделирования локальной ионосферы. Из-за литерной зависимости ГЛОНАСС необходимо наличие эталона, в качестве которого использовался приемник SU04 ВНИИФТРИ [3]. С помощью описанной методики были получены значения задержек DCB за 24-31 января 2023г. для эксперимента.

Совместно с расчетом задержек DCB в ИАЦ КВНО ежедневно происходит расчет глобальных карт полного электронного содержания (ПЭС, англ. TEC — Total Electron Content) в ионосфере [2, 4]. Глобальные карты ионосферы по расчетам ИАЦ КВНО публикуются в файлах формата IONEX [4], доступна статистика за последние 5 лет. На 24.01.2023 проведен расчет оценки точности глобальных ионосферных карт ИАЦ КВНО относительно карт трех центров анализа международной службы ГНСС IGS: СКО по всей территории Земли ~0.6 м, над материками ~0.5 м. Для сравнения, карты центров IGS согласуются друг с другом

с СКО 0.5–0.7 м, СКО модели Клобучара из кадра GPS ~2.1м, среднесуточная вертикальная ионосферная задержка ~5.6 м. Используя глобальные карты ПЭС ионосферы, в ИАЦ КВНО ежедневно происходит оценка вклада ионосферы в псевдодальность КА, затем с учетом геометрического фактора (PDOP) пересчет в пространственные карты распределения вклада ионосферной ошибки в точность местоопределения потребителей, использующих одночастотные сигналы ГНСС [5]. Представлены результаты расчета за последний год. В частности, за 24.01.2023 среднесуточный вклад ионосферы в точность GPS составил 2.6 м по территории России, 4.8 м глобально; для ГЛОНАСС 2.7 м по территории России, 5.7 м глобально. Среднесуточная глобальная ионосферная ошибка выше российской за счет высокой активности ионосферы на экваториальных широтах, а также за счет соотношения PDOP ГЛОНАСС (глобальный ~2.0, по России ~1.8).

В рамках данного исследования в ИАЦ КВНО была проведена экспериментальная оценка фактического влияния моделей ионосферы и задержек DCB на точность координатного решения потребителей ГЛОНАСС, в которой использовались данные 300 БИС (250 глобально распределенных станций сети IGS и 50 станций сети Госкорпорации «Роскосмос» преимущественно на территории России), расчет проводился на 8-суточном интервале 24–31 января 2023 г. Использовались только кодовые измерения, калибровка приемников не проводилась, применялись расчетные значения задержек DCB КА ГЛОНАСС, полученные с помощью калиброванного приемника SU04, а также глобальная карта ПЭС ионосферы ИАЦ КВНО и ионосферная модель Клобучара из кадра GPS. В качестве опорных координат БИС для оценок точности использовались высокоточные координаты станций с погрешностью не более нескольких сантиметров. Относительно них рассчитывались среднеквадратичные погрешности координатных решений по каждой станции глобальной сети. Вклад каждого фактора рассчитывался в предположении, что суммарная погрешность — пространственная и вычисляется как корень суммы квадратов составляющих.

В базовом расчете (при полном неучете ионосферы и задержек DCB) точности местоопределения ГЛОНАСС для измерений C1C и C1P (в обозначениях RINEX-3 [1]) получились примерно одинаковыми (среднеквадратичные погрешности по России ~7.2 м, глобально ~9.0 м).

Улучшение точности (базового расчета) для одночастотного сигнала C1C ГЛОНАСС за счет учета межсигнальных задержек C1C-C1P составило 2.2 % по России, 3.7 % глобально (вклад ~ 1.9 м). При расчете к штатным частотно-временным поправкам (ЧВП) КА ГЛОНАСС были прибавлены межсигнальные C1C-C1P задержки DCBC1C-C1P, SU04.

Улучшение точности (базового расчета) для одночастотного сигнала ГЛОНАСС за счет корректных межчастотных C1P-C2P задержек АФНС составило 13.2 % по России (вклад ~3.6 м), глобально 6.8 % (вклад 3.2 м). В расчете предполагалось, что ЧВП в кадре ГЛОНАСС привязаны к C1P, но содержат ошибку паспортных значений АФНС, поэтому при использовании одночастотного сигнала C1P к ЧВП была применена коррекция 1.53 х (DCBC2P-C1P, SU04 – ТАФНС).

Улучшение точности (базового расчета) для одночастотного сигнала за счет использования ионосферных поправок составило для ГЛОНАСС с использованием карт ИАЦ КВНО: по России 16 % (вклад 4 м), глобально 34 % (вклад 6.8 м); для ГЛОНАСС с использованием модели Клобучара: по России 5 % (вклад 2.3 м), глобально 26 % (вклад 6 м). Аналогичный расчет для GPS с использованием карт ИАЦ КВНО: по России 56 % (вклад 3.9 м), глобально 62 % (вклад 4.8 м); для GPS с использованием модели Клобучара: по России 4 % (вклад 1.9 м), глобально 24 % (вклад 3.3 м).

Для оценки теоретически достижимой точности одночастотного приемника был проведен расчет за тот же период для калиброванного приемника SU04 (шумовые погрешности на каждой частоте ~0.2 м) и смоделированной штатной ЭВИ ГЛОНАСС на основе апостериорной ЭВИ ИАЦ КВНО, привязанной к измерениям C1P SU04, использовались только двухчастотные КА ГЛОНАСС (PDOP ~2.48). В одночастотном режиме C1P с учетом модели ионосферы ИАЦ КВНО погрешность координат SU04 составила ~1.2 м, в двухчастотном режиме C1P-C2P ~1.5 м. При полной двухчастотной орбитальной группировке ГЛОНАСС (PDOP ~1.9) в январе 2023г. теоретически достижимая пространственная погрешность координат C1P ГЛОНАСС идеального приемника с нулевыми шумовыми погрешностями составила бы ~0.8 м за счет ошибок моделирования ионосферы.

Литература

1. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format Version 3.05. International GNSS Service. URL: https://files.igs.org/pub/data/format/rinex305.pdf (дата обращения 01.03.2023).
2. Аржанников А. А., Глотов В. Д., Митрикас В. В. Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 60. С. 3–11 URL: https://www.glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4023 (дата обращения 01.03.2023).
3. Митрикас В. В., Скакун И. О., Аржанников А. А., Федотов В. Н. Применение калиброванного навигационного приемника для оценки погрешности измерения за счёт космического сегмента (SISRE) ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. 2021. № 2 (26). С. 79–103.
4. Раздел «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО АО ЦНИИмаш [Электронный ресурс]. URL: https://www.glonass-iac.ru/iono/ (дата обращения: 01.02.2023).
5. Аржанников А. А., Глотов В. Д., Митрикас В. В., Свиридов А. С. Влияние ионосферы на точность координатного решения потребителя, построение глобальных карт ионосферы по беззапросным измерениям ГНСС // 26-я Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». 2022. https://www.glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4000.

Решение задач наблюдения на основе КВНО для повышения ситуационной осведомленности экипажа воздушного судна

В. И. Бабуров[1], Н. В. Иванцевич[1,2], С. Б. Уткин[1], В. В. Худошин[1]

[1]АО «Навигатор», г. Санкт-Петербург, Россия
[2]БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия

Работа системы предупреждения столкновения с воздушными судами в части функции наблюдения основана на предоставлении экипажу воздушного судна результатов наблюдения за окружающей обстановкой. В настоящее время «предоставляется» следующий набор задач: улучшенное визуальное наблюдение в воздухе и на земной поверхности аэропорта, процедура полёта в следе, визуальное разделение при заходе на посадку [1].

Решение задач наблюдения обеспечивается путем приёма информации о собственном воздушном судне и других, окружающих его, воздушных судах [2]. При этом основным источником информации о собственном воздушном объекте служит спутниковая навигационная система, а принимаемая координатно-временная информация об окружающем воздушном движении является источником информации о других воздушных объектах.

В работе представлено описание разработанного бортового радиоэлектронного оборудования предупреждения столкновения с воздушными судами. Приведено описание функции, реализующей задачи наблюдения на базе координатно-временного навигационного обеспечения. Сформулированы цели испытаний функции наблюдения с представлением результатов проверок работоспособности задач наблюдения, проведенных с использованием специально разработанного стенда [3]. Намечены следующие шаги по дальнейшей модернизации функции наблюдения за воздушной обстановкой.

Литература

1. RTCA DO-317B. MOPS for Aircraft Surveillance Applications (ASA) System. Вашингтон, RTCA, 2014. С. 708.
2. RTCA DO-260B. MOPS for 1090 MHz Extended Squitter ADS-B and TIS-B. Вашингтон, RTCA, 2009. С. 1410.
3. Бабуров В. И., Бойко В.А., Иванцевич Н.В. и др. Полунатурный моделирующий комплекс проверки и отладки алгоритмов работы системы предупреждения столкновений с воздушными судами и наблюдения за воздушной обстановкой // XXIX Санкт-Петербургская МКИНС. Сборник материалов. Спб.: Электроприбор, 2022. С. 66–68.

Новые подходы к созданию унифицированной аппаратуры СЕВ нового поколения для различных классов потребителей

А. С. Батура, Л. Я. Белов, А. В. Крупская

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Стремительное развитие радиотехнических комплексов характеризуется возрастанием значимости и повышением требований к различным видам информационного обеспечения, в том числе частотно-временного.

Анализ требований потребителей частотно-временной информации (ЧВИ) показывает, что потребителями предъявляются различные требования к аппаратуре системы единого времени (СЕВ):

– в части номенклатуры принимаемых сигналов от различных средств передачи ЧВИ (ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou, станции СДВ, ДВ, КВ диапазонов);

– в части требований к параметрам выходных сигналов (синусоидальные, синхросигналы, коды времени);

– в части интерфейсов выдачи информации (ГОСТ Р 52070-2003, Ethernet, RS-232, RS-485 и другие);

– в части требований к автономному хранению, что вызывает необходимость включать в состав различные опорные генераторы (цезиевые, водородные, рубидиевые стандарты частоты, кварцевые генераторы и другие).

Разнородность требований потребителей привела к увеличению номенклатуры выпускаемой аппаратуры СЕВ. При этом каждое изделие строится по своим принципам и не позволяет изменять схемотехнические решения.

Вместе с тем, при создании новых комплексов аппаратуры СЕВ необходимо учитывать следующие факторы:

1. санкционная политика и вызванные ею ограничения на поставку комплектующих изделий иностранного производства привели к необходимости создавать страховые запасы для изготовления изделий, а при невозможности создания страховых запасов и при разработке новых изделий — переходить на электронную компонентную базу и материалы, доступные для заказа, преимущественно отечественного производства;

2. изменения возможностей по радиоэлектронному воздействию на каналы приёма-передачи частотно-временной информации вызывают необходимость повышения требований к автономности, что в свою очередь требует применения в аппаратуре СЕВ стандартов частоты с высокими показателями долговременной стабильности;

3. в связи с развитием схемотехники ряд прежних функций аппаратуры СЕВ потребители реализовывают в своих комплексах (например, формирование дополнительных выходных сигналов), а для большинства потребителей в первую очередь требуется надежная, малогабаритная аппаратура, имеющая невысокую стоимость;

4. сокращение сроков поставок и выделения финансирования на выполнение НИОКР.

На основании вышеизложенного, предложено сформулировать подходы к созданию унифицированной аппаратуры СЕВ нового поколения, которые заключаются в следующем:

– разработка должна вестись с использованием комплектующих изделий и материалов, доступных для заказа, и в первую очередь отечественного производства;

– аппаратура СЕВ должна строиться по модульному принципу с возможностью расширения функционала изделия за счет включения в состав дополнительного оборудования: подключаемых к основному блоку модулей и антенно-фидерных устройств приема сигналов от различных источников ЧВИ; различных стандартов частоты; блоков выходных сигналов в зависимости от требований потребителя; дополнительных средств, обеспечивающих передачу информации по различным интерфейсам (Ethernet, ГОСТ Р 52070-2003, RS-485 и другие).

Основной блок формирования и хранения шкалы времени должен быть единым для аппаратуры СЕВ различных классов точности массового применения и являться основой для построения аппаратуры СЕВ для потребителей, предъявляющих высокие требования.

Вместе с тем, предлагается провести работы по совершенствованию нормативно-правовой базы в области частотно-временного обеспечения, в частности: установить определение «система единого времени» (в документах встречаются различные термины: «приемный пункт СЕВ, «аппаратура СЕВ», «аппаратура потребителя частотно-временной информации» и др.); уточнить классы точности аппаратуры СЕВ с учетом тенденций развития стандартов частоты (в ГОСТ В 24152-83 аппаратура СЕВ подразделяется на четыре класса точности, которые определяются типом и точностными характеристиками используемого стандарта частоты).

Выполнение перечисленных подходов к созданию унифицированной аппаратуры СЕВ нового поколения позволит уменьшить номенклатуру выпускаемой аппаратуры СЕВ, сократить время и средства на разработку аппаратуры СЕВ и вместе с тем удовлетворить требования большинства потребителей различных министерств и ведомств.

Применение высокопроизводительных вычислительных систем для формирования эфемеридно-временной информации о КА ГНСС и определения ПВЗ в оперативном режиме по данным измерений ГНСС

И. В. Безменов, С. Л. Пасынок, А. Э. Дроздов

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Программно-аппаратные комплексы вычисления ПВЗ, разработанные в ГМЦ ГСВЧ ФГУП «ВНИИФТРИ» [1], позволяют формировать высокоточную информацию о ПВЗ в режиме службы и передавать ее конечному потребителю. Программы вычисления эфемеридно-временной информации НКА ГНСС, разработанные в ГМЦ ГСВЧ [2], позволяют получать данные о координатах космических аппаратов ГНСС в виде sp3-файлов, а также данные по поправкам часов КА и станций слежения в формате RINEX-clk в оперативном режиме. В [3] показано, что на точность эфемеридно-временной информации существенно влияет оперативность расчетов. Последняя напрямую зависит от производительности используемых вычислительных систем. В докладе говорится о применении многоядерных вычислительных комплексов в ГМЦ ГСВЧ для получения информации об эфемеридно-временной информации и ПВЗ, а также о проблемах, возникающих при использовании большого числа ядер. Приведены полученные результаты.

Литература

1. Пасынок С. Л. Повышение точности определения параметров вращения Земли методом комбинирования результатов измерений различных видов в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 39–44.
2. Безменов И. В. Вычисление эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме по данным измерений // Измерительная техника, №1, 2020. С. 7–14.
3. Безменов И. В. Вычисление орбит навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме во ФГУП «ВНИИФТРИ» //Альманах современной метрологии № 1 (21), 2020. С. 83–100.

Оценка производительности современных дисковых накопителей для задачи буферизации и передачи РСДБ-данных

И. А. Безруков[1], А. И. Сальников[1], В. В. Васильев[1], А. В. Вылегжанин[1,2]

[1]ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

С 2016 г. ИПА РАН эксплуатирует системы буферизации и передачи данных, на которых ежегодно регистрируются и передаются до 10 ПБ данных. В настоящее время в связи с длительной эксплуатацией системы буферизации и передачи данных возникла необходимость замены дисковых накопителей.

В данной работе на основе методики оценки производительности дисковой подсистемы, представленной в статье 2018 г. [1], была проведена оценка производительности операций ввода — вывода ряда современных дисковых накопителей, включая накопители на жестких магнитных дисках (HDD) и твердотельные накопители (SSD). На основе проведенных исследований даны рекомендации по выбору дисковых накопителей для задач высокоскоростной регистрации РСДБ-данных.

Литература

1. Безруков И. А. Исследование производительности дисковой подсистемы системы буферизации и передачи данных // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 4. С. 5–10.

Пассивный водородный стандарт частоты с накопительной колбой увеличенного объема

А. А. Беляев, И. А. Викулов, Н. А. Демидов,
С. А. Князев, А. А. Лысенко, А. С. Пелюшенко, А. С. Скрыль

АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

В настоящее время одним из факторов, ограничивающих нестабильность пассивных водородных стандартов частоты (ПВСЧ), является добротность спектральной линии излучения атомов водорода. Добротность линии зависит от множества параметров, в частности от объема накопительной колбы. Во всех ПВСЧ, разработанных компанией АО «Время-Ч», объем накопительной колбы составляет 0.45 л. В данной конфигурации типичный график нестабильности частоты представлен на рис. 1.

Для улучшения нестабильности ПВСЧ объем накопительной колбы был увеличен до 0.8 л. График нестабильности для ПВСЧ с накопительной колбой увеличенного объема представлен на рис. 2. Как видно из графика, значения нестабильности для всех времен усреднения уменьшились, что говорит об эффективности увеличения объема колбы для улучшения метрологических характеристик ПВСЧ.

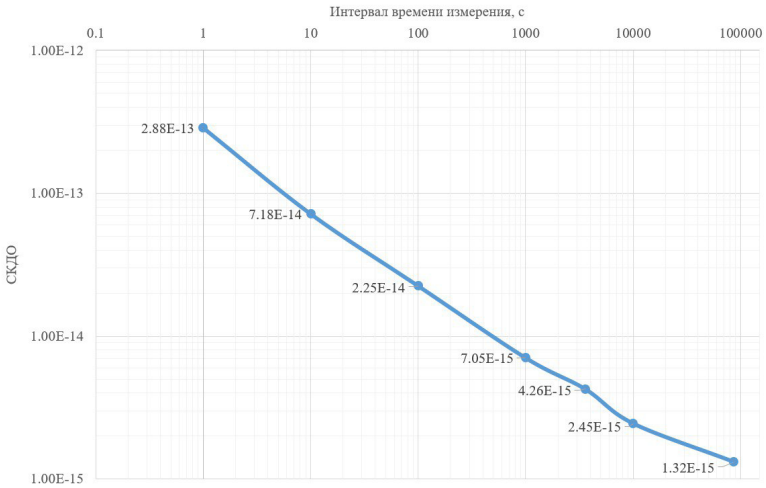


Рис. 1. СКДО для ПВСЧ с колбой объемом 0.45 л

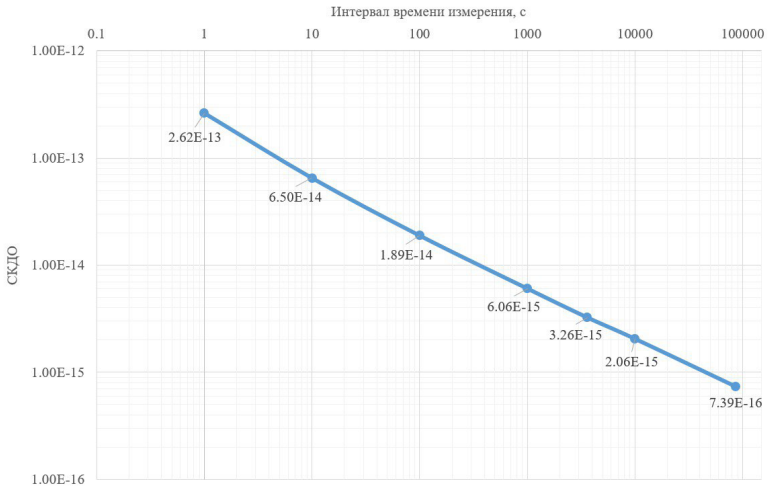


Рис. 2. СКДО для ПВСЧ с колбой объемом 0.8 л

Перспективный активный водородный стандарт частоты VCH-2021

А. А. Беляев, В. Г. Воронцов, Н. А. Демидов, Д. Г. Князев, В. А. Поляков, Ю. В. Тимофеев

АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

В докладе обсуждаются результаты инициативной разработки перспективного активного водородного стандарта частоты (АВСЧ) VCH-2021, основой которого служит квантовый водородный генератор с двойной сортировкой атомов водорода по квантовым состояниям.

Ключевым элементом, определяющим метрологические характеристики VCH-2021, является квантовый водородный генератор с двойной сортировкой атомов водорода по квантовым состояниям. В разработанном водородном генераторе увеличение произведения добротности спектральной линии на корень из мощности генерации в 1.5 раза обеспечило уменьшение нестабильности частоты, обусловленной тепловыми шумами водородного генератора до уровня $\sigma(\tau) \leq 2 \cdot 10^{-14} / \sqrt{\tau}$. Это позволило уменьшить нестабильность частоты выходного сигнала прибора на интервалах времени измерения от 100 с до 1 суток приблизительно в 1.5 раза по сравнению с лучшими современными АВСЧ. СКДО частоты по результатам испытаний опытных образцов прибора на интервале времени измерения 1 сутки при этом составило менее $1 \cdot 10^{-16}$.

Увеличение мощности генерации позволило уменьшить нестабильность частоты, обусловленной тепловыми шумами приемника, в 1.5 раза по сравнению с серийно-выпускаемыми приборами. За счет использования системы цифровой фазовой автоподстройки частоты удалось экспериментально достигнуть нестабильности частоты на интервалах времени измерения 1 с и 10 с соответственно менее $8 \cdot 10^{-14}$ и $1 \cdot 10^{-14}$, а при использовании сверхмалошумящего кварцевого генератора — менее $5 \cdot 10^{-14}$ и $9 \cdot 10^{-15}$.

Литература

1. Пасынок С. Л. Повышение точности определения параметров вращения Земли методом комбинирования результатов измерений различных видов в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 39–44.
2. Безменов И. В. Вычисление эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме по данным измерений // Измерительная техника, №1, 2020. С. 7–14.
3. Безменов И. В. Вычисление орбит навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме во ФГУП «ВНИИФТРИ» //Альманах современной метрологии № 1 (21), 2020. С. 83–100.

Совершенствование методов передачи времени через ДВ радиостанции ИФРНС

П. В. Белянкин[1], Е. Т. Жуков[2]

[1]АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия
[2]ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В нашей стране передача времени через радиостанции импульсно-фазовых радионавигационных систем (ИФРНС), работающие на несущей частоте длинноволнового диапазона (ДВ) 100 кГц, осуществляется ведущей и одной из ведомых станций Европейской цепи РНС-Е, а также ведущей станцией Дальневосточной цепи РНС-В [1].

Передача времени через радиостанции ИФРНС выполняется методом совмещения последнего (восьмого) радиоимпульса навигационного пакета с метками опорного времени. Пакеты следуют с периодом повторения, характерным для каждой цепочки РНС, но не кратным единичному интервалу времени 1 с. Для передачи времени передающая станция совмещает (синхронизирует) радиоимпульсы навигационного сигнала с метками эталонной шкалы времени и маркирует пакеты, в которых происходит это совмещение [1].

Точное время используется в освоении космоса (командно-измерительные комплексы полигонов), банковской сфере (переводы, криптография), электроэнергетике (фазирование электросетей) и других гражданских сферах, а также в различных системах и комплексах военного назначения. Сигналы времени ИФРНС резервируют соответствующие функции ГНСС для всех категорий потребителей.

К недостаткам используемых в настоящее время методов синхронизации шкал времени по сигналам ИФРНС следует отнести низкую оперативность и помехоустойчивость передачи маркеров шкалы времени, а также отсутствие в составе сигнала полной оцифровки шкалы времени (соотнесения меток шкалы с кодом времени), что требуется для автоматической привязки априорного знания времени на приемном пункте с погрешностью, не превышающей 0.5 с (для РНС-В) или 2.5 минуты (для РНС-Е). Потребителям, использующим астрономические наблюдения, необходимо передавать значение поправки Всемирного времени UT1-UTC.

На современном этапе необходимы поиски новых решений по расширению возможностей ИФРНС в части передачи времени. Совершенствование методов передачи времени через ДВ радиостанции ИФРНС является актуальной научной задачей, имеющей существенное значение для развития частотно-временного обеспечения (ЧВО) страны.

При модернизации Государственной системы единого времени и эталонных частот предложены, разработаны и экспериментально проверены технические решения по расширению возможностей передачи времени через ДВ радиостанции ИФРНС в части повышения оперативности и помехоустойчивости передачи маркеров и оцифровки шкалы времени, а также поправки Всемирного времени [2].

В РНС-Е для ускорения и повышения помехоустойчивости обнаружения окраски пакетов, совпадающих с минутой, предлагается использовать двоичную фазовую манипуляцию высокочастотного заполнения 30 радиоимпульсов окраски пакетов, совпадающих с секундой, помехоустойчивым кодом, имеющим экстремум автокорреляционной функции, совпадающий с минутой. Аналогичным образом осуществляется окраска пятиминутной метки и передача оцифровки шкалы времени до суток. Передача полной оцифровки и поправки Всемирного времени осуществляется по каналу служебной связи, реализуемому с помощью 9-го радиоимпульса.

В РНС-В передача оцифровки шкалы времени и поправки Всемирного времени также может осуществляться по каналу служебной связи.

Таким образом, применение предложенных технических решений по расширению возможностей передачи времени ДВ радиостанциями ИФРНС обеспечивает улучшение технических характеристик средств ЧВО в части повышения его оперативности, помехоустойчивости и информативности.

Литература

1. Эталонные сигналы частоты и времени. Бюллетень В17/2020. Характеристики и программы передач через радиостанции, наземные и космические средства навигации, глобальную сеть Интернет. М.: Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ». 2020. 32 с.

2. Бабайкин Б. Ф., Белянкин П. В., Жуков Е. Т. Степанова Н. А. Состояние и перспективы развития передачи и приёма сигналов времени по ДВ радиостанциям ИФРНС РФ // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2009). Третья Всероссийская конференция. СПб.: ИПА РАН, 2009. С. 217–218.

Об уточнении характеристик изотопных фильтров для квантовых стандартов частоты на рубидиевой газовой ячейке традиционного типа

О. В. Березовская, А. В. Кудрявцева, Г. М. Смирнова, М. В. Хуторщиков

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время, несмотря на развитие новых стандартов частоты с использованием лазерных технологий, благодаря своим достаточно высоким точностным характеристикам, дешевизне и малым габаритам квантовые стандарты частоты на рубидиевой газовой ячейке (КСЧ РГЯ) с источником линейчатого спектра на безэлектродной спектральной лампе (БЭСЛ) широко используются в различных радионавигационных комплексах и глобальных навигационных системах. Требования к стандартам частоты в части точностных и эксплуатационных характеристик со стороны разработчиков новых систем непрерывно растут, а это требует повышения характеристик входящих в них узлов. Одним из основных узлов КСЧ РГЯ является дискриминатор квантовый (ДК), в состав которого входит источник оптической накачки, обеспечивающий создание инверсной населенности сверхтонкого перехода основного состояния в атомах рубидия, находящихся в ячейке поглощения, по частоте которого происходит подстройка частоты кварцевого генератора в КСЧ РГЯ. Источник оптической накачки состоит из высокочастотного генератора, возбуждающего разряд в БЭСЛ, и изотопного фильтра, осуществляющего фильтрацию одной из сверхтонких компонент в излучении БЭСЛ.

Данная работа посвящена исследованию свойств и характеристик изотопных фильтров с целью обеспечения наилучшей фильтрации и, как следствие, повышения эффективности оптической накачки, что, в свою очередь, повысит точностные характеристики прибора.

В качестве объекта исследования был выбран изотопный фильтр, наполненный парами рубидия 85 и буферным газом аргоном, как наиболее часто употребляемый в ДК для КСЧ РГЯ. Фильтр представлял собой стеклянный цилиндрический баллон, изготовленный из стекла С51-1 (диаметром 14 мм, длиной 7 мм). Основной характеристикой фильтра является коэффициент эффективности оптической накачки ($К_{он}$), характеризующий увеличение сигнала радиооптического резонанса при установке в оптический тракт ДК изотопного фильтра. $К_{он}$ определяется как отношение амплитуды первой гармоники сигнала ошибки, измеренного на выходе согласующего усилителя с фильтром и без него.

Представлены результаты полученных зависимостей указанного параметра от давления газа и температуры фильтра. Изучены возможности снижения влияния флуктуаций температуры БЭСЛ на сдвиги резонансной частоты в ячейке поглощения в зависимости от исследуемых свойств изотопного фильтра. Показано, что выбором параметров фильтра (давление, температура) можно минимизиро-

вать влияние флуктуаций температуры БЭСЛ на резонансную частоту ячейки поглощения, тем самым повысить температурную стабильность КСЧ РГЯ в целом.

Используя результаты проведенных исследований, удалось получить температурную чувствительность ДК ($1\cdot10^{-13}$ – $5\cdot10^{-14}$) 1/°С при $К_{он}$, обеспечивающим параметр качества ДК F более15 $Гц^{-1}$.

Интеллектуализация технологического цикла навигационно-баллистического обеспечения управления КА

В. В. Бетанов

АО «Российские космические системы», г. Москва, Россия

Реализуемые в настоящее время технологические циклы (ТЦ) навигационно-баллистического обеспечения (НБО) управления КА должны удовлетворять принципам создания и использования космических технологий, а именно: системности, комплексности, оптимальности (рациональности), устойчивости, перспективности и оперативности.

Одновременно требование высокого уровня автоматизации контура НБО предполагает применение повышенной степени интеллектуальной составляющей, в частности, комбинированных расчетно-логических и экспертных систем, ориентированных на вычислительные алгоритмы с осуществлением хранения уникальных знаний и данных в области предметной составляющей космической техники.

Особенная важность отмеченного обстоятельства связана с максимальной надежностью выполнения предполагаемых операций контура навигационно-баллистического обеспечения в условиях нештатных ситуаций, вызванных, например, изменениями внешних условий и требований на решение рассматриваемых задач; ограниченностью объема выборки измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) при реализации штатной схемы радиоконтроля орбиты, обусловленный наличием непригодных для определения параметров движения сеансов ИТНП; несоответствием расчетного пространственно-временного перемещения центра масс КА реальному и др.

При этом разработчики программно-математических комплексов НБО должны предусмотреть разработку и применение на практике систем искусственного интеллекта, позволяющие получать, в частности, удовлетворительные искомые решения, использующие в качестве метода (или алгоритма) решения эвристический поиск, реализующий неточные знания в сложившихся обстоятельствах.

Как правило, в этих случаях могут (и должны) использоваться гибридные экспертные системы (ЭС), нейронные сети с когнитивной графикой. Особое внимание специалистов должно быть уделено адаптивным информационным системам, а также технологиям, использующим адаптивно-игровые подходы. Имея в виду то обстоятельство, что экспертные системы предназначены для так называемых неформализованных задач, однако ЭС не отвергают и не заменяют традиционного подхода к разработке программ, ориентированных на решение формализованных задач. Неформализованные задачи обычно обладают следующими особенностями:

– ошибочностью, неоднозначностью, неполнотой и противоречивостью исходных данных НБО;

– ошибочностью, неоднозначностью, неполнотой и противоречивостью знаний о проблемной области и решаемой задаче НБО;

– большой размерностью пространства решения, т. е. перебор при поиске решения весьма велик;

– динамически изменяющимися данными и знаниями.

Экспертные системы применяются для решения только трудных практических задач. По качеству и эффективности решения экспертные системы не уступают решениям эксперта-человека. Решения экспертных систем обладают «прозрачностью», т. е. могут быть объяснены пользователю на качественном уровне. Это качество экспертных систем обеспечивается их способностью рассуждать о своих знаниях и умозаключениях.

ЭС способны пополнять свои знания в ходе взаимодействия с экспертом. Необходимо отметить, что в настоящее время технология экспертных систем используется для решения различных типов задач (интерпретация, предсказание, диагностика, планирование, конструирование, контроль, отладка, инструктаж, управление) в самых разнообразных проблемных областях, таких, как оперативное навигационно-баллистическое обеспечение сложных динамических объектов.

В докладе обсуждаются примеры из практики НБО применения ЭС для принятия решений в процессе технологического цикла, а именно:

1. Решение обобщенных некорректных задач навигационно-баллистического задач в технологическом цикле в силу:

– ограниченного объема выборки ИТНП при оперативном определении параметров движения КА, обусловленного срывом штатной схемы реализации циклограммы проведения измерений;

– ограниченной выборки ИТНП, обусловленное нештатными ситуациями, в рамках которых имело место реализация штатной схемы измерений;

– несоответствия расчетного пространственно-временного перемещения центра масс КА реальному.

2. Реализация концепции гибридной технологии обеспечения функционирования информационных систем НБО в случае сбоев этапов решения отдельных задач, так называемые диагностические экспертные системы контроля функционирования программных комплексов НБО.

3. Решение вопросов планирования наземных средств управления летными испытаниями КА в различных условиях обстановки для повышения качества и оперативности выполнения работ.

Результаты анализа передачи времени через ГНСС

П. П. Богданов, А. Ю. Феоктистов

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предназначены для высокоточного определения местоположения, скорости движения, а также времени сухопутных, морских, воздушных и других видов потребителей. Для этого осуществляется синхронизация излучаемых сигналов бортовой шкалы времени (ШВ) всех КА относительно системной ШВ и системной ШВ относительно принятой опорной ШВ путем передачи в составе навигационных сигналов соответствующих поправок на взаимное расхождение ШВ. Как правило, в качестве опорной ШВ используется реализация шкалы координированного времени UTC(k), которая поддерживается с определенной точностью относительно международной шкалы координированного времени UTC. Тем самым, любой потребитель, оснащенный калиброванным приемником, имеет возможность получить шкалу UTC.

В работе рассмотрены принципы формирования системных ШВ ГНСС и передачи системных ШВ и UTC(k) потребителям и представлены результаты анализа передачи времени через ГНСС в 2022 г. Результаты получены на основе обработки данных информационной системы данных о динамике земной коры. (CDDIS), отделения времени Международного бюро весов и мер (BIPM) и измерительных средств на пунктах Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ).

Полученные результаты показывают следующее:

– в системе GPS расхождение системной ШВ относительно шкалы координированного времени UTC(USNO), формируемой в военно-морской обсерватории США, поддерживалось в пределах ±5 нс. Погрешность передачи системной ШВ и UTC(USNO) потребителям не превышала также 5 нс;

– расхождение системной ШВ ГЛОНАСС относительно национальной шкалы координированного времени России UTC(SU) не превышало ±4 нс, за исключением интервалов с 12.02.2022 по 12.03.2022, с 21.06.2022 по 30.06.2022 и начиная с 10.12.2022. В то же время в системе ГЛОНАСС по-прежнему сохранялась систематическая погрешность передачи системной ШВ и UTC(SU) потребителям ~20 нс на интервале до 12.02.2022 и (35–40) нс после 12.02.2022;

– расхождение системной ШВ Galileo относительно шкалы координированного времени UTC(EU), формируемой на основе ШВ нескольких европейских лабораторий времени, поддерживалось в пределах ±5 нс;

– в системе BeiDou расхождение системной ШВ относительно опорной ШВ, формируемой в Пекинском центре спутниковой навигации BSNC, поддерживалось в пределах ±10 нс. Однако значения расхождения системной ШВ BeiDou и UTC, передаваемые потребителям, находились в диапазоне от 15 нс до 30 нс;

– в региональной навигационной спутниковой системе (РНСС) QZSS расхождение системной ШВ и опорной ШВ UTC(NICT), формируемой в Национальном институте информационных и коммуникационных технологий, поддерживалось в пределах ±10 нс;

– в РНСС NavIC расхождение системной ШВ и опорной ШВ UTC(NPLI), формируемой Национальной физической лабораторией Индии, поддерживалось также в пределах ±10 нс.

Литература

1. Crustal Dynamics Data Information System [Электронный ресурс]. URL: ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/... (дата обращения: 20.01.2023).
2. Международное бюро весов и мер. [Электронный ресурс]. URL: ftp//bipm.org/… (дата обращения: 20.01.2023).
3. Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений [Электронный ресурс]. URL: ftp://ftp.vniiftri.ru/Atomic Time/... (дата обращения: 20.01.2023).

Анализ функционирования бортовых часов КА ГНСС

П. П. Богданов, А. Ю. Феоктистов

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Бортовые часы КА глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) являются одним из основных элементов, определяющих эксплуатационные характеристики этих систем. Так, от точностных характеристик бортовых часов КА в значительной степени зависят точностные характеристики систем в целом, а от надежностных характеристик — соответствующие характеристики КА.

Бортовые часы КА являются сложными устройствами, как правило, на основе комплексного использования нескольких квантовых стандартов частоты (КСЧ). В настоящее время в составе бортовых часов КА используются КСЧ на рубидиевой газовой ячейке, КСЧ на атомно-лучевой трубке и пассивные водородные стандарты частоты. При этом в составе бортовых часов могут использоваться как КСЧ одного типа, так и разного.

В работе представлены результаты анализа функционирования бортовых часов КА ГНСС GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou в 2022 г. Основное внимание уделено «поведению» бортовых часов в условиях эксплуатации.

Полученные результаты показывают, что для некоторых типов КСЧ требуется проведение плановых операций управления их работой для обеспечения заданных точностных характеристик, а для всех типов КСЧ характерны непрогнозируемые изменения частоты на отдельных интервалах времени и «скачки» частоты. Это приводит к перерывам использования КА по целевому назначению и снижает эксплуатационные характеристики систем.

Анализ проведен на основе обработки измерений временных приемников на пунктах Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), данных информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) АО «ЦНИИмаш» и сообщений информационных центров соответствующих ГНСС.

Идентификация неблагоприятных погодных условий при эксплуатации радиометра водяного пара

В. Ю. Быков, Г.Н. Ильин, В. Г. Стэмпковский, А.М. Шишикин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Результаты измерений радиометром водяного пара зависят от жидких осадков. Влияние на результаты измерений оказывает дождевые капли, оседающие на перископическом зеркале и передней панели радиометра. Влияние осадков определяется их количеством и конструкцией радиометра. На этом допущении основана методика калибровки, с помощью которой производится оценка степени влияния осадков на искажение результатов измерения радиометром. Данные об осадках для модели измеряются регистратором осадков, которым снабжены все радиометры, разработанные в ИПА РАН. После калибровки радиометр может быть перемещен на новое место использования, при этом алгоритм идентификации неблагоприятных условий будет по-прежнему работать корректно.

Для выполнения процедуры калибровки модели влияния осадков необходим опорный ряд значений тропосферной задержки, поэтому калибровка производится на пункте с зарегистрированным международной службе (IGS) приемником ГНСС-сигналов.

Литература

1. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмпковский В. Г., Шишикин А. М. Определение влажной тропосферной задержки по данным радиометра водяного пара в неблагоприятных погодных условиях // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 45. С. 9–13.

К вопросу об обновлении методических указаний для расчёта звёздного времени применительно к бесплатформенным астроинерциальным навигационным системам

Н. Н. Василюк, И. С. Каютин

ООО «НПК «Электрооптика», г. Москва, Россия

Бесплатформенная астроинерциальная навигационная система (АИНС) состоит из бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), оптико-электронного прибора определения ориентации по звёздам (астродатчика) и хранителя времени, собранных в единую конструкцию с общим основанием, без вращающихся частей. Эта конструкция обеспечивает неизменность взаимной ориентации приборных систем координат БИНС и астродатчика. Измерения астродатчика используются для коррекции непрерывно нарастающих ошибок инерциального счисления пути в БИНС.

Астродатчик измеряет ориентацию своей приборной системы координат относительно инерциальной системы координат опорного звёздного каталога [1] на эпоху наблюдения, отсчитанную хранителем времени. Из этих измерений, расчётным путём, с использованием модели вращения Земли, получаются наборы корректирующих навигационных параметров. Состав наборов зависит от доступности дополнительной навигационной информации в БИНС [2]:

– широта, долгота и угол курса подвижного объекта, если доступно направление местной вертикали;

– углы курса, крена и тангаж подвижного объекта, если доступны его географические координаты.

Преобразования измерений астродатчика в навигационные параметры, определённые относительно вращающейся Земли, выполняется согласно Методическим указаниям [3], которые на сегодняшний день являются единственным нормативным документом (утверждённым ещё Госстандартом СССР), регламентирующим процедуры расчёта звёздного времени и угла поворота Земли. Методические указания обязательны к исполнению заказчиками и разработчиками АИНС. Они были утверждены в 1989 г. и основаны на системе небесных координат и шкале времени, определённых при помощи фундаментального каталога FK5. В резолюции A4 21-й Генеральной ассамблеи МАС 1991 г. были определены новые системы отсчёта, которые принципиально отличаются от FK5. В частности, в этих определениях пространственные координаты и шкалы времени рассматриваются с релятивистский точки зрения. В резолюции B2 23-й Генеральной ассамблеи МАС 1997 г. предписано прекратить использование систем координат FK5 и все астрономические расчёты проводить в новых системах отсчёта.

Современные звёздные каталоги Hipparchcos и Tycho-2, используемые для составления опорных звёздных каталогов, сформированы уже в новых системах отсчёта с использованием новых шкал времени. Использование этих данных,

а значит и связанных с ними систем координат, отличных от [3], при проектировании АИНС, является формальным нарушением требований государственной стандартизации.

Кроме этого, контрольные примеры расчёта преобразований координат и звёздного времени приведены в [3] на языке FORTRAN и предназначены для реализации на ЭВМ БЭСМ-6. Язык FORTRAN давно вышел из употребления, единичные программисты на этом языке заняты поддержкой кодового наследия, сохранившегося с ранних этапов развития вычислительной техники. Большая часть БЭСМ-6 разобрана и утилизирована в качестве лома цветных и драгоценных металлов.

Не пора ли начать работу над новой редакцией Методических указаний, учитывающей современные определения небесных систем отсчёта и современное состояние вычислительной техники?

Литература

1. Жуков А. О., Прохоров М. Е., Захаров А. И. и др. Создание опорного каталога звёзд как основа бортовых навигационных каталогов для перспективных оптико-электронных приборов звёздной ориентации. М.: ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр», 2022. 167 С. DOI: 10.55469/9785904670771.
2. Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Куркина Н. А. и др. Разработка автономной бесплатформенной астроинерциальной навигационной системы // Механика, управление и информатика. 2013. № 1(13). С. 9–29.
3. РД 50-25645.325-89 Методические указания. Спутники Земли искусственные. Основные системы координат для баллистического обеспечения полётов и методика расчёта звёздного времени. М.: Издательство стандартов, 1990.

Обзор опыта практического использования радиометра водяного пара в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ»

У. С. Вахрушева, Л. П. Драгайло

Восточно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Иркутск, Россия

На территории Восточно-Сибирского филиала развернут и успешно эксплуатируется модернизированный метрологический комплекс оценки энергетических характеристик сигналов навигационных спутников (МК ОЭХ-М), прежде всего спутников системы ГЛОНАСС. В состав указанно-го комплекса функционально входит радиометр водяного пара (РВП), позволяющий, в том, числе оценивать ослабление навигационного сигна-ла в тропосфере.

Для получения заявленной точности работы РВП [1], необходимо выполнять калибровку его ВЧ-тракта методом «вертикальных разрезов».

В процессе эксплуатации РВП выяснено, что особенности его гео-графического положения, а именно возвышение над городом, а также близость к большим водным массам Иркутской ГЭС накладывают огра-ничения на азимут проведения калибровки.

В процессе эксплуатации проводится непрерывное сравнение значе-ний влажностной тропосферной задержки, измеряемой РВП, и значений, полученных в результате глобальной ГНСС-обработки. Полученные та-ким образом невязки позволяют проводить оперативный мониторинг со-стояния РВП. При этом также используются известные модели Сааста-мойнена и Мендеса-Павлиса [2].

Литература

1. Ильин Г.Н. Калибровочные сигналы радиометра водяного пара // Труды ИПА РАН. СПб.: ИПА РАН, 2018. Вып. 46. С. 57–67.
2. Mendes V. B., Pavlis E. C. High-accuracy zenith delay prediction at optical wavelengths // Geophysical Research Letters. John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

Решение проблемы использования эталонных геоцентрических координат при испытаниях НАП ГНСС

В. С. Вдовин, И. А. Аникеева

АО «Российские космические системы», г. Москва, Россия

Согласно [1, 2] в документации ГЛОНАСС использованы следующие термины и их определения, связанные с определением местоположения потребителя:

координата — число из упорядоченного набора N чисел, описывающих положение пункта в N-мерном пространстве;

система координат — набор математических правил, описывающих, как координаты должны быть соотнесены с точками пространства.

В [1] отмечено, что «местоположение (позиция), взаиморасположение, направление и ориентация объектов в пространстве могут быть описаны только комплексом определений, реализующих метод координат, т.е. способом определять положение точки (местонахождения объекта — НАП) с помощью чисел или других символов, присущих выбранной системе координат (СК). Однако несмотря на то, что координаты — это величины, совокупности координат точек в пространстве не относятся к величинам, так как их невозможно сопоставить по обязательному для величин признаку одномерного упорядочения по возрастанию (больше или меньше). Поэтому совокупность координат точки в пространстве представляет собой обозначение проявления (значения) качественного измеряемого свойства — местоположения. Для измерения этих свойств должны быть установлены (стандартизованы) спецификации соответствующих конкретных пространственных многомерных шкал измерений — систем координат».

При этом в соответствии с системой обеспечения единства измерений конкретные СК интерпретируют как спецификации соответствующих шкал измерений, координатные основы — как эталоны; а реперы, опорные пункты (квазары, геодезические знаки, ККС) — как материальные меры направления и позиционирования (местоположения) объектов в пространстве.

Из [1, 2] следует, что опорными (исходными) эталонами геоцентрических координат являются:

– в СК ITRS — совокупность опорных станций ITRF с приписанными декартовыми координатами и с идентификаторами в виде абсциссы x, ординаты y и аппликаты z;

– в СК ПЗ-90 — совокупность геодезических пунктов с указанием координат и с идентификаторами в виде долготы λ, геодезической широты φ и превышения h относительно Балтийского футштока.

Для решения проблемы использования эталонных геоцентрических координат при испытаниях НАП ГНСС предлагается использование небольшого количества (3–4) активных опорных станций ITRF (станций IGS), к которым осуществлять высокоточную привязку опорных пунктов, используемых при испытаниях НАП ГНСС.

Литература

1. ГОСТ Р 8.699-2010. Государственная система обеспечения единства измерений. Величины, единицы, шкалы измерений, используемые в глобальной навигационной спутниковой системе. 2010.

2. ГОСТ Р 52572-2006. Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования. 2006.

Результаты экспериментальной работы макета высокоточного навигационного приемника для частотно-временного обеспечения

А. В. Вейцель, С. А. Семенов, Н. Н. Василюк

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Россия

В работе представлены результаты экспериментальной отработки макета высокоточного навигационного приемника для приема сигналов ГЛОНАСС. Для выполнения частотно-временных задач навигационная аппаратура должна обеспечивать возможность проведения измерений с привязкой к внешней высокостабильной шкале времени. Для этого разработан модуль измерителя временных интервалов для сличения внутренней шкалы времени навигационного приемника и внешней высокоточной шкалы времени при использовании внешней высокостабильной частоты. Измерители временных интервалов реализуют измерения на различных принципах, но для данной работы было выбрано решение на основе преобразователя «время-код» [1].

Одной из проблем для реализации высокоточных частотно-временных измерений с использованием навигационной аппаратуры является наличие задержек в аппаратной части навигационного приемника. Эти задержки зависят не только от образцов аппаратуры, но и от температуры. С целью разработки высокоточного навигационного приемника для частотно-временного обеспечения было выбрано техническое решение с использованием метода температурной стабилизации, что позволяет производить калибровки образцов навигационного приемника и эксплуатировать их в разных лабораторных условиях.

В октябре 2022 г. был запущен новый спутник ГЛОНАСС № 25, который излучает новый кодовый сигнал в частотном диапазоне L2, кроме сигналов с частотным разделением. В конце ноября 2022 г. был произведен первый прием сигнала L2OCp от данного спутника. Был выполнен поиск сигнала, который является BOC-сигналом, и обеспечено устойчивое слежение за этим сигналом. Произведенная оценка мощности принимаемого сигнала и сформированные измерения не показали каких-либо аномалий для этого сигнала и спутника. Также с использованием макета высокоточного навигационного приемника был осуществлен прием как частотных сигналов от других спутников ГЛОНАСС, так и кодовых сигналов L3OC от спутников 702, 705, 758 и 760.

Литература

1. Vasilyuk N. N., Denisenko O. V., Veitsel A. V. Digital processing of time scales shift measurements for synchronization of navigation equipment with an external time scale // XXV International Conference: Digital Signal Processing and Its Applications. DSPA-2023. 2023.

Солнечный радиотелескоп РТ-1.8 Уссурийской астрофизической обсерватории. Первые результаты

Ю. В. Векшин, В. Ю. Быков, Д. В. Ерофеев, М. Б. Зотов, А. С. Лавров, В. Г. Стэмпковский, Е. Ю. Хвостов, В. К. Чернов, А. М. Шишикин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Геомагнитные бури, обусловленные солнечным ветром и выбросами корональной массы, вызывают увеличение сопротивления атмосферы, искажение магнитной и радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве, изменение распространения радиоволн [1, 2]. Солнечные вспышки могут оказывать существенное влияние на работу спутниковых систем [3]. Для постоянного мониторинга интенсивности и степени поляризации солнечного радиоизлучения в Уссурийской астрофизической обсерватории введён в эксплуатацию новый радиотелескоп РТ-1.8 [4].

В докладе представлены принцип работы, основные технические параметры радиотелескопа и результаты измерений его характеристик. Отмечены особенности настройки и калибровки радиотелескопа. Представлены результаты измерений индекса солнечной активности на длине волны 10.7 см за первые пять месяцев наблюдений и сравнение их с зарубежными результатами [5]. Приведены зарегистрированные радиовсплески, связанные с солнечной активностью.

Литература

1. Подробно о влиянии геомагнитных штормов на орбитальные группировки // Вестник ГЛОНАСС. URL: http://vestnik-glonass.ru/~JGJFc (дата обращения 02.03.2023).
2. Иванов Е. Ф., Губин А. В., Лесовой С. В., Рамзес С. Э. Проект солнечного спектрополяриметра для прогноза космической погоды // Солнечно-земная физика. 2019. Вып. № 4. С. 26–33.
3. Cerruti A. P., Kintner P. M., Gary D. E., et al. Observed Solar radio burst effects on GPS/Wide area augmentation system carrier-to-noise ratio. 2006. Vol. 4, S10006.
4. Зотов М. Б., Быков В. Ю., Векшин Ю. В. и др. Радиотелескоп РТ-1.8 для наблюдений за солнечной активностью // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 61. С. 38–43.
5. Space Weather Canada. Solar radio flux [Электронный ресурс]. URL: https://spaceweather.ca/forecast-prevision/solar-solaire/solarflux/sx-5-flux-en.php (дата обращения: 2.03.2023).

Перспективы развития гравиметрического пункта в обсерватории «Светлое»

Л. Ф. Витушкин[2], И. С. Гаязов[1], М. Н. Дробышев[3], Д. В. Иванов[1], Е. П. Кривцов[2], П. П. Кролицкий[2], П. С. Михайлов[3], В. В. Наливаев[2] , О. А. Орлов[2], И. А. Рахимов[1], С. Г. Смоленцев[1]

[1]ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, Россия
[3]ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Целью международного проекта GGOS (Глобальная система геодезических наблюдений) является высокоточное определение и исследование следующих взаимосвязанных характеристик Земли: геометрии и кинематики поверхности, неравномерности вращения, структуры гравитационного поля и его вариаций. Для достижения этой цели будет использовано преимущество метода колокации — совместное использование средств измерений, базирующихся как на специализированных спутниках, так и на поверхности Земли.

Обсерватории РСДБ-комплекса «Квазар-КВО», оснащенные средствами наблюдений космической геодезии всех типов, являются действующими базовыми пунктами (core sites) проекта GGOS [1]. Поэтому естественным путем развития обсерваторий комплекса в соответствии с требованиями GGOS является колоцирование средств координатных измерений со средствами высокоточных измерений локальных характеристик гравитационного поля (пространственного распределения ускорения свободного падения и его вариаций во времени) с помощью абсолютных и относительных гравиметров.

В 2020 г. в обсерватории «Светлое» комплекса «Квазар-КВО» был создан новый гравиметрический пункт, обладающий устойчивостью к вибрациям от работающих антенн радиотелескопов обсерватории, на котором был установлен абсолютный гравиметр «ЛИАГ-4». В докладе описывается текущее состояние гравиметрического пункта, и приводятся результаты первых исследований, выполненных по различным измерениям на пункте. Эти работы проводились совместно с сотрудниками ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», в котором имеется два гравиметрических пункта, оснащенные высокоточными абсолютными и относительными гравиметрами (в том числе криогенным гравиметром iGrav) и составляющие основу государственного первичного специального эталона в области гравиметрии ГЭТ 190 [2].

Обсуждаются первые результаты использования криогенного гравиметра iGrav на эталонном пункте «Ломоносов-2» и работы, выполненные совместно с сотрудниками ИФЗ РАН по совершенствованию используемой лунно-солнечной приливной модели. Методика анализа измерений на эталонном гравиметрическом пункте и их результаты будут использованы в рамках работ по развитию гравиметрического пункта обсерватории «Светлое».

Литература

1. GGOS Core Sites [Электронный ресурс]. URL: https://ggos.org/item/ggos-core-sites/ (дата обращеня 01.04.2023).

2. Витушкин Л. Ф., Карпешин Ф. Ф., Кривцов Е. П. и др. Государственный первичный специальный эталон ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019 // Измерительная техника. 2020. № 7. С. 3–8.

Изменение характера движения станции GNSS-KTVL после землетрясений в Турции в феврале 2023 г.

А. Е. Вольвач, А. И. Дмитроца, Д. И. Неяченко

ФГБУН «КрАО РАН», пос. Научный, Ав. Рес. Крым

С 1994 г. в Крымской астрофизической обсерватории начаты исследования по геодинамическим программам [1, 2]. Радиотелескоп РТ-22 вместе с двумя лазерными станциями и двумя GNSS станциями, расположенными в радиусе 3 км, образуют геодинамический полигон «Симеиз-Кацивели», который расположен на южном побережье Крымского полуострова около поселков Симеиз и Кацивели, в 20 км к западу от города Ялта [3]. Организована обработка получаемых станциями полигона данных на базе пакета программ GAMIT/GLOBK [4, 5]. По результатам обработки GNSS-данных исследовано изменение характера движения станции KTVL после блока турецких землетрясений, произошедших начиная с 06.02.2023 г.

Литература

1. Нестеров Н. С., Матвеенко Л. И., Кларк Т. А., и др. РСДБ станция Симеиз — новый статус // XXVI радиоастрономическая конференция. Тезисы докладов. Санкт-Петербург. 1995. С. 229–230.
2. Вольвач А. Е., Петров Л .Ю. Результаты измерения горизонтальной скорости движения радиоастрономической станции Симеиз» // Известия КрАО. 2005. Т. 101. С. 203–214.
3. Вольвач А. Е., Дмитроца А. И., Артемов И. В., Неяченко Д. И. Гелио-геодинамический полигон «Симеиз-Кацивели» для задач координатно-временного обеспечения // Труды ИПА РАН. 2016. Т. 37. С. 55–58.
4. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, GLOBK reference manual, Release 10.6 Department of Earth. Atmospheric and Planetary Sciences. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2015.
5. Herring T. A., King R. W., Floyd M. A., McClusky S. C. GPS Analysis at MIT 10.7 Department of Earth. Atmospheric and Planetary Sciences. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2018.

Создание RESTful API для хранения данных наблюдений лазерной локации спутников

А. Е. Вольвач, А. И. Дмитроца, Д. И. Неяченко

ФГБУН «КрАО РАН», пос. Научный, Ав. Рес. Крым

Станции лазерной локации спутников в Симеизе (1873 г.) и Кацивели (1893 г.) являются старейшими на территории СНГ. Станция «Кацивели» с 1962 года начала проведение лазерно-локационных наблюдений космических объектов, а первые эксперименты по лазерной локации поверхности Луны были проведены в 1963–1965 гг. Начиная с 1974 г. были начаты наблюдения искусственных спутников Земли на станции лазерной локации «Симеиз». Регулярные наблюдения были начаты в 1976 г. За 60-летний период наблюдений накопился большой объём полученных данных.

Современные технологии позволяют удобно хранить и получать доступ к данной информации. Representational State Transfer (REST) — программная архитектура, которая определяет условия работы API и позволяет реализовать безопасный обмен данными между клиентом и сервером. Системы, реализующие REST API, могут эффективно масштабироваться благодаря оптимизации взаимодействия между сервером и клиентом. Веб-службы RESTful поддерживают полное разделение клиента и сервера. Они упрощают и разделяют различные серверные компоненты, чтобы каждая часть могла развиваться независимо. Серверная часть использует язык программирования PHP и хранение данных с использованием реляционной базы данных MySQL/MirandaDB.

Проведена разработка и создание RESTful API для хранения данных наблюдений лазерной локации спутников станциями космической геодезии и геодинамики КрАО.

Изменения параметров среднего полюса Земли и геомагнитного поля за последнее столетие

А. Е. Вольвач, Г. С. Курбасова, Л. Н. Вольвач

ФГБУН «КрАО РАН», пос. Научный, Ав. Рес. Крым

Изучен характер изменения траектории движения среднего Северного географического полюса по поверхности Земли за последнее столетие.

Установлены особенности в изменениях его координат [1]. Эпохи появления особых точек сопоставлены с эпохами скачков в данных о параметрах геомагнитного поля. Получена модель вековых вариаций геомагнитного склонения в пункте с геодезическими координатами 90° северной широты, 0° западной долготы. Установлены когерентные связи между изменениями параметров среднего полюса Земли и геомагнитного поля за последнее столетие [2–4]. Полученные результаты допускают возможность согласованного движения двух полюсов (северного среднего и северного геомагнитного полюсов Земли), что возможно при наличии реальной связи между вращением Земли и изменениями геомагнитного поля Земли. Подтверждением наших выводов может служить анализ дальнейших наблюдений.

Литература

1. Вольвач А. Е., Курбасова Г. С., Вольвач Л. Н., Ипатов А. В. Особенности движения географического Северного полюса Земли и скачки в геомагнитном поле // Космические исследования. 2022. Т. 60, № 4. С. 315–324.
2. Вольвач А. Е., Курбасова Г. С. Сезонные колебания в локальных деформациях и инсоляции поверхности Земли // Космические исследования. 2020. Т. 58, № 2, С. 103–110.
3. Volvach A. E., Kurbasova G .S., Volvach L. N. Time series analysis of temperatures and insolation of the Earth's surface at Kara-Dag using satellite observation // Advances in Space Research. 2022. Vol. 69, no.12. P. 4228–4239.
4. Курбасова Г. С., Вольвач А. Е. Нерегулярности в смещении географического полюса Земли и глобальные рывки в геомагнитном поле // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14, № 2 (в печати).

Резервирование ГНСС сетевой структурой наземных источников навигационных сигналов, работающих в ДВ и УКВ диапазонах частот

М. А. Воронов, С. М. Воронов

Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
«НИИИС им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород, Россия

Элементы инфраструктуры современного общества — транспорт (наземный, воздушный, морской), энергосистемы, телекоммуникации, финансовые системы — в настоящее время зависимы от технологий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), т. е. спутниковой навигации и синхронизации шкал времени. Уязвимость ГНСС делает уязвимой и использующую ее сигналы инфраструктуру. Вопрос резервирования ГНСС неоднократно поднимался как в России, так и за рубежом.

В апреле 2018 г. Европейская Комиссия обнародовала первую версию Радионавигационного плана ЕС, предусматривающую создание некосмических резервных систем для ГНСС [1].

Специалистами АО «РИРВ» в докладе на конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение» (г. С.-Петербург, ИПА РАН, 2017 г.) было предложено создание резервной радионавигационной системы, работающей в длинноволновом диапазоне частот. По оценкам специалистов АО «РИРВ» такая система сможет обеспечить точность координатных определений потребителя на территории России и в прилегающих районах со среднеквадратической погрешностью 8.5 м [2]. Указанная точность на сегодняшний день не соответствует требованиям ряда потребителей (морских и речных судов, железнодорожного транспорта и т. д.) [3]. Основным ограничением для снижения погрешностей в системе, предложенной АО «РИРВ», является диапазон использованных частот.

В целях обеспечения резервирования ГНСС для навигационных определений как на территории страны, так и на прилегающих к России территориях и акваториях, представляется целесообразным создание сетевой структуры наземных источников навигационных сигналов (НИНС), работающих в УКВ и ДВ диапазонах частот. Такая структура может быть создана путем поэтапного развертывания и объединения соответствующих локальных навигационных систем. При этом НИНС, работающие в ДВ диапазоне частот, обеспечат резервирование ГНСС для прилегающих к России территорий и акваторий, а НИНС, работающие в УКВ диапазоне частот, обеспечат резервирование для территории страны.

В [4] показано, что для НИНС, работающих в УКВ диапазоне частот, может быть обеспечен радиус действия порядка 60 км. При этом:

– СКП навигационных определений может быть обеспечена на уровне 1–2 м;

– только за счет выбора структуры и параметров навигационных сигналов НИНС может быть обеспечена работоспособность аппаратуры потребителя при уровне мощности помех на входе, превышающем мощность сигнала более чем на 40 дБ.

Недостатком предлагаемой системы является большое количество НИНС для создания непрерывного навигационного поля.

Совмещение НИНС, работающих в УКВ диапазоне частот, базовыми станциями операторов мобильной связи, вышками эфирного цифрового телевидения и действующими референцными спутниковыми станциями обеспечит снижение необходимых затрат на создание системы.

Литература

1. ЕС: ГНСС без резерва «недостаточны для критически и помехоустойчивых операций» [Электронный ресурс]. URL: https://internavigation.ru/ec-ГНСС-без-резерва-недостаточны-для/, (дата обращения 10.02.2023).
2. Шебшаевич Б. В., Зарубин С.П., Баринов С.П. Состояние и перспективы развития наземных систем дальней радионавигации //Седьмая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение» (КВНО-2017): тезисы докладов. СПб.: Изд-во ИПА РАН, 2017. С.21–22.
3. Радионавигационный план Российской Федерации Утвержден приказом Минпромторга России от 4 сентября 2019 г. №3296.
4. Васильев В. С., Воронов М. А., Воронов С. М. Локальная псевдоспутниковая навигационная система обеспечения безопасности судоходства в Обской губе //Информация и космос. 2021. № 3. С. 105–109.

Анализ применения мобильной радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой по разным источникам для высокоточного позиционирования потребителей

Д. А. Гаврилов, К. К. Зубарев, А. И. Яковлев

ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

Развитие технологии высокоточного позиционирования — определения пространственно-временных координат при помощи навигационной аппаратуры потребителей (НАП), имеет важное научное и прикладное значение. Уровень предъявляемых при этом требований по точности и оперативности постоянно растет.

Для решения навигационной задачи при помощи НАП ГНСС необходимо принять и обработать сигналы от не менее 4 навигационных космических аппаратов (НКА) [1]. При этом потребитель получает 3D-решение: местоположение в пространстве и время. При наличии сигналов 3 НКА НАП выдает потребителю 2D-решение: местоположение на плоскости (поверхности Земли) без учета высоты и время.

В условиях высокой динамики изменения современного мира зачастую потребители сталкиваются с проблемой высокого геометрического фактора или недостаточной видимости КА. Тогда возникает необходимость исследования и дальнейшего использования альтернативных методов оперативного позиционирования потребителей. Одним из таких методов является применение технологии РСДБ.

Повышенный интерес к применению технологии РСДБ обусловлен трендом на уменьшение массогабаритных характеристик радиотелескопов системы. В результате уменьшения диаметра антенн, увеличения скорости обзора пространства и снижения массы системы, появляются новые перспективы применения РСДБ-комплексов, в особенности в мобильном исполнении [2].

Существует два пути позиционирования потребителей с применением технологии мобильной РСДБ. Первый основан на применении метода РСДБ с использованием всего одного НКА ГНСС, что позволяет достигать допустимых точностей в условиях плохого геометрического фактора или недостаточной видимости требуемого количества НКА. Второй метод основан на использовании излучения внегалактических источников — квазаров. Данный метод позволяет добиться высокоточного позиционирования потребителей в условиях плохого геометрического фактора, недостаточной видимости НКА или недостаточности зоны покрытия ГНСС, как, например, на территории Арктического шельфа, где точностные характеристики ГНСС значительно хуже, чем над территорией континента.

Проведенный в докладе анализ позволяет сделать выводы, что возможно использование обоих методов позиционирования потребителей с применением РСДБ-технологии в условиях ограниченного применения ГНСС, и в обоих случаях достигаются требуемые точностные показатели.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова. Изд-е 4-е. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

2. Алёшкин А. П., Макаров А. А., Зубарев К. К. Применение мобильной радиоинтерферометрии в задаче координатно-временного обеспечения удаленных потребителей // Труды Военно-космической академии А. Ф. Можайского, 2019. Вып. 671.С 80–90.

Актуальные вопросы определения ПВЗ по международным и отечественным сериям наблюдений

И. С. Гаязов, С. Л. Курдубов, Е. А. Скурихина

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В рамках службы параметров вращения Земли (ПВЗ), функционирующей в ИПА РАН с 1995 г., ПВЗ определяются по всем типам современных высокоточных наблюдений: РСДБ, ГНСС и лазерных наблюдений геодинамических спутников. Результаты представляются в международные службы IVS, IERS и в ГМЦ ГСВЧ для формирования сводных данных о ПВЗ.

ИПА РАН проводит специальные сессии РСДБ-наблюдений на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» с определением ПВЗ в различных режимах. Оценка точности получаемых рядов производится путем сравнения с окончательными данными, формируемыми IERS, которые принимаются в качестве эталонных.

Анализ ежемесячных Бюллетеней серии B IERS за последние несколько лет показывает, что в рядах ПВЗ, определяемых по РСДБ-наблюдениям в различных центрах анализа, имеются большие расхождения, которые особенно заметно проявляются в рядах всемирного времени. Это обстоятельство имеет важное значение с точки зрения оценки точности рядов всемирного времени, формируемых по многократным в течение суток сеансам РСДБ-наблюдений, проводимых средствами комплекса «Квазар-КВО». Открытым является также вопрос оценки реальной точности ряда finals, который формируется срочной службой IERS в Морской обсерватории США и претендует на статус эталона.

В докладе выполнен обзор результатов определения ПВЗ в различных центрах анализа по различным типам наблюдений со сравнительной оценкой их точности. Рассматриваются также вопросы, связанные с возможными ограничениями в доступе к данным глобальной сети станций.

Литература

1. Гаязов И. С., Губанов В. С. и др. Служба параметров вращения Земли ИПА РАН // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 39. С. 23–29.
2. Курдубов С. Л., Скурихина Е. А. Об оценке точности высокочастотного ряда всемирного времени // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 57. С. 23–27.

Актуальное состояние возможностей и результатов ИАЦ КВНО в области мониторинга и оценки характеристик ГНСС и информационной поддержки потребителей

В. Д. Глотов, А. А. Аржанников, В. Л. Лапшин, Е. В. Бакаева, С. Д. Жиленко

ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», г. Королев, Россия

Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения АО «ЦНИИмаш» решает, помимо прочих, задачи по расширенному мониторингу радионавигационного поля всех ГНСС, оценке характеристик данных систем, в том числе локальных потребительских, и информационной поддержке потребителей на основе Прикладного потребительского центра системы ГЛОНАСС.

В докладе приведена информация о предоставляемых видах информационной поддержки российских и зарубежных гражданских потребителей системы ГЛОНАСС в режиме онлайн на пяти языках. Проиллюстрирован тезис о том, что информационная поддержка построена по принципу предоставления актуальной информации для потребителя любого уровня компетенции — от глобальных оценок геометрии приема сигнала до детальных финальных и предварительных оценок характеристик на основе эфемеридно-временной информации Системы контроля и подтверждения характеристик радионавигационного поля системы ГЛОНАСС.

Кроме того, в ИАЦ КВНО имеется широкий спектр средств мониторинга локальных потребительских характеристик ГНСС, в том числе посредством динамических испытаний, а также значительный опыт в части проведения таких испытаний. Наглядно представлены маршруты проведения масштабных динамических испытаний по мониторингу радионавигационного поля ГНСС на участках автомобильных транспортных коридоров.

Отдельно приведена информация об аналитических продуктах, разрабатываемых ИАЦ КВНО, в частности о глобальной ионосферной карте ИАЦ КВНО. Освещены возможные области ее применения в научно-исследовательских целях.

Также обоснована актуальность одного из дальнейших перспективных направлений развития возможностей оценки характеристик — оценка потоков корректирующей информации услуг и систем функционального дополнения.

В заключение представлена обобщенная потенциальная польза для российского исследователя в области спутниковой навигации, которую представляют указанные в докладе возможности и результаты в области мониторинга и оценки характеристик ГНСС и информационной поддержки потребителей.

Измерение и стабилизация оптических частот с использованием фемтосекундной оптической гребенки и активного водородного мазера

А. А. Головизин[1], Д. О. Трегубов[1], М. О. Яушев[1,2], Д. И. Проворченко[1], Д. А. Мишин[1], П. Л. Сидоров[1], К. П. Галстян[1], И. В. Заливако[1], И. А. Семериков[1,3], К. Ю. Хабарова[1], Н. Н. Колачевский[1,3]

[1]ФИАН, г. Москва, Россия
[2]МФТИ, г. Долгопрудный, Россия
[3]РКЦ, г. Москва, Россия

Фемтосекундные оптические гребенки частот позволяют когерентно связывать осцилляторы оптического и радиочастотного диапазонов. Они используются для измерения оптических частот, генерирования высокостабильных и малошумящих радиочастотных и микроволновых сигналов, а также в прецизионной спектроскопии.

В настоящей работе мы приводим результаты использования фемтосекундной оптической гребенки частот компании «Авеста» для измерения и стабилизации частот различных лазеров, используемых в тулиевых оптических часах [1, 2] и квантовом вычислителе на ионах Yb [3]. Оптическая гребенка может быть стабилизирована как по радиочастотному сигналу, так и по одной из оптических частот.

В стандартной конфигурации, когда оптическая гребенка стабилизирована по радиочастотному сигналу от активного мазера (Ч-1035, компания «Время-Ч»), частоты лазеров на длинах волн 821 нм (используется для первичного охлаждения атомов тулия), 1108 нм и 935 нм (для охлаждения и перекачки ионов Yb) стабилизируются с использованием ФАПЧ. Частоты лазеров 1140 нм (тулиевый часовой лазер), 1060 нм (используются для вторичного охлаждения атомов тулия) и 871 нм (часовой лазер в ионах Yb) измеряются счетчиком частоты и используются для их долговременной подстройки. Мы также провели измерение абсолютных частот трех переходов в атоме тулия (на длинах волн 410 нм, 418 нм и 530 нм) с погрешностью на уровне одной десятой естественной ширины перехода.

В конфигурации, когда оптическая гребенка стабилизирована по лазеру 1140 нм, мы провели исследования шумов лазеров 1140 нм, 1060 нм и 871 нм, где показали нестабильность частоты каждого лазера на уровне 10^{-15} в относительных единицах при времени измерения 1–10 с. В дальнейшем мы планируем осуществить стабилизацию частоты 1160 нм (перекачивающий лазер для ионов Yb) и провести точное измерение частоты этого перехода.

Литература

1. ЕС: ГНСС без резерва «недостаточны для критически и помехоустойчивых операций1) Golovizin A., Fedorova E., Tregubov D., et al. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift //Nature communications. 2019. Т. 10. №. 1. С. 1724.

2. Golovizin A. A., Tregubov D. O., Fedorova E. S., et al. Simultaneous bicolor interrogation in thulium optical clock providing very low systematic frequency shifts // Nature communications. 2021. Т. 12. №. 1. С. 5171.

3. Aksenov M. A., Zalivako I. V., Semerikov I. A., et al. Realizing quantum gates with optically-addressable 171Yb+ ion qudits // arXiv preprint arXiv:2210.09121. 2022.

Построение системы навигации и ориентации летательного аппарата на основе измерений реликтового излучения

М. В. Гордин, Д. А. Базлев, В. О. Гладышев, В. Л. Кауц, А. В. Каютенко, П. П. Николаев, Е. А. Шарандин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

Одним из перспективных направлений в области создания новых систем навигации и ориентации является использование в качестве навигационного поля одного из наиболее стабильных геофизических полей — микроволнового фонового излучения Вселенной (реликтового излучения) [1].

Стабильность, непрерывность и неповторимость распределения реликтового излучения по небесной сфере позволяет построить перспективные системы навигации и ориентации с привязкой к любой удобной области небесной сферы, так как не требуется сканирование небесной сферы в широком диапазоне углов, нет ограничений, накладываемыми мощными астрономическими источниками электромагнитного излучения (Солнце, Луна) и характером движения летательного аппарата и возмущениями окружающей среды (аэродинамический нагрев, турбулентность и пр.).

Для проведения исследований был разработан и изготовлен экспериментальный макет радиометра реликтового излучения. Радиометр имеет рабочую полосу частот 75…110 ГГц, флуктуационную температурную чувствительность < 1 мК при времени накопления 60 с, ширину диаграммы направленности < 1.2°. Радиометр позволяет производить измерения во всем диапазоне изменения азимутальных углов и углов места. Флуктуационная температурная чувствительность радиометра достаточна для уверенного определения дипольной анизотропии реликтового излучения.

Приведенные расчетные результаты и проведенные экспериментальные исследования показывают потенциальную возможность применение такого радиометра для создания новых систем навигации и ориентации.

Литература

1. Насельский П. Д., Новиков Д. И., Новиков И. Д. Реликтовое излучение Вселенной. М.: Наука, 2003. 390 с.

Универсальная цифровая система обработки сигналов для радиотелескопов

С. А. Гренков, Н. Е. Кольцов, Д. А. Маршалов, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Для радиоастрономических наблюдений используются радиотелескопы с антеннами разного диаметра, например РТ-32 и РТ-13 в РСДБ-комплексе «Квазар-КВО» [1]. Ведутся работы по созданию компактных передвижных радиотелескопов на антеннах диаметром 2–4 м. Приемные системы радиотелескопов тоже различаются как по диапазонам входных частот, так и по ширине и диапазонам промежуточных (выходных) частот сигнала. Для разных радиотелескопов были разработаны и использовались до сих пор разные цифровые системы обработки сигналов, например узкополосная Р1002М для РТ-32 или широкополосная система для РТ-13. Они сопрягаются со соответствующими приемными системами и обеспечивают при РСДБ-наблюдениях преобразование принятых сигналов в заданный цифровой формат.

Для радиометрических и спектральных наблюдений применяются свои цифровые системы обработки сигналов. В настоящее время в ИПА РАН создана многофункциональная цифровая система преобразования сигналов (МСПС) [2] на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Она подходит для любых радиотелескопов, независимо от размеров антенны и типа радиоприемного оборудования, на нее можно заменить всю аппаратуру обработки сигналов и обеспечить их регистрацию для большинства радиоастрономических наблюдений. В каждом канале системы АЦП и ПЛИС позволяют обрабатывать сигналы в реальном времени и выполнять операции с потоком данных до 40 Гбит/с для различных применений. МСПС размещается на антенне и может содержать до 12 каналов цифровой обработки сигналов в диапазоне промежуточных частот до 2 ГГц. Несколько радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» уже оснащены такими системами.

В докладе подведены итоги создания МСПС, рассмотрены принципы ее работы в различных режимах: РСДБ с широкополосными каналами 2048, 1024 или 512 МГц; РСДБ с 16 узкополосными каналами 0.5–32 МГц внутри каждого широкополосного; режим радиометрической регистрации сигналов с селекцией помех и режим спектральных наблюдений. Приведены соответствующие алгоритмы, реализованные в прошивках ПЛИС, параметры и особенности конструкции системы для радиотелескопов РТ-13 и РТ-32, а также результаты использования МСПС в реальных радиоастрономических наблюдениях.

Литература

1. Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., Gayazov I. Russian VLBI network “Quasar”: Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2019. Vol. 10, Iss. 2. P. 150–156. Doi: 10.1016/j.geog.2018.09.008.

2. Nosov E., Marshalov D., Fedotov L., Sheynman Y. Multifunctional digital backend for quasar VLBI network // Journal of Instrumentation. 2021. Vol. 16. no 5. P. P05003. Doi: 10.1088/1748-0221/16/05/P05003.

Аппаратно-программный анализ сигналов промежуточных частот на основе многофункциональной цифровой системы преобразования сигналов

С. А. Гренков, Д. А. Маршалов, А. Г. Михайлов, А. Б. Устинов, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Новая многофункциональная система преобразования сигналов (МСПС), которой оснащаются радиотелескопы комплекса «Квазар-КВО», размещается непосредственно на антенне. Поэтому в процессе радиоастрономических наблюдений контроль и анализ принимаемых сигналов оператором, находящимся в аппаратном помещении, возможен только в дистанционном режиме [1]. Для этого используются как аппаратно-программные инструменты, заложенные в МСПС при ее проектировании, так и программное обеспечение центрального компьютера управления радиотелескопом, специально разработанное для управления указанными инструментами и предоставления информации оператору.

В статье дано описание программного обеспечения, предназначенного для реализации контрольных функций МСПС: измерение мощности сигнала в каждом канале, контроль спектров мощности и фазовых спектров, контроль фазочастотных характеристик каналов, групповой задержки сигнала в каждом канале, фазы гармоник сигнала фазовой калибровки. Рассмотрен интерфейс оператора для анализа сигналов промежуточных частот. Приведены результаты использования предусмотренных в МСПС инструментов контроля и анализа сигналов в реальных радиоастрономических наблюдениях.

Литература

1. Маршалов Д. А., Гренков С. А., Носов Е. В. и др. Аппаратно-программная система анализа сигналов промежуточной частоты радиотелескопа на основе широкополосной системы преобразования сигналов // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 38. С. 90–99.

Регистрация радиоизлучения в спектральных линиях на основе многофункциональной цифровой системы преобразования сигналов

С. А. Гренков, И. А. Рахимов, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В обсерватории «Светлое» с 2006 г. проводятся наблюдения радиоизлучений в спектральных линиях гидроксила и воды с использованием для регистрации сигналов макетных образцов различной аппаратуры, в том числе основанной на методе калибровки спектров, описанном в [1].

В настоящее время на радиотелескопе РТ-32 установлена многофункциональная цифровая система преобразования сигналов (МСПС), которая обеспечивает цифровую обработку сигналов промежуточных частот радиотелескопа в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [2]. Поэтому появилась возможность за счет загрузки предварительно подготовленной конфигурации ПЛИС использовать МСПС не только для РСДБ- и радиометрических наблюдений, но и для узкополосных наблюдений в спектральных линиях. Использование МСПС в составе спектрально-селективного радиометра с полосой до 2 ГГц подробно рассмотрено ранее в статье [3].

Для спектрометрических наблюдений разработаны специальные прошивки ПЛИС с разными полосами регистрации для обеспечения наблюдений мазерных радиоизлучений гидроксила (18 см) и воды (1.35 см). В данной работе приводятся алгоритм и структура конфигурации ПЛИС для модуля регистрации сигналов в спектральных линиях на основе МСПС. Приведены основные параметры такого модуля и результаты тестовых наблюдений с его использованием в обсерватории «Светлое».

Литература

1. Гренков С. А., Ипатов А. В., Кольцов Н. Е. Способ регистрации космического радиоизлучения в спектральных линиях. // Известия ВУЗ'ов. Радиофизика. Том LI, № 9. 2008. С. 777–788.
2. Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В., Шейнман Ю. С. Многофункциональная система преобразования сигналов для радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 56. С. 39–47.
3. Гренков С. А., Федотов Л. В. Спектрально-селективная регистрация радиометрических сигналов с помощью многофункциональной системы // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 62. С. 3–9.

Фундаментальная астрометрия и фотометрия в России: задачи, текущее состояние и перспективы

С. Н. Додонов

САО РАН, пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия
ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается текущее состояние доступных астрометрических и фотометрических данных, пригодных для систем астроориентации и астронавигации космических, авиационных, морских, военных и других потребителей России. Приводятся краткая характеристика современных фотометрических каталогов: Pan-STARRS DR1, ATLAS Pathfinder, SkyMapper DR1, APASS DR9, Tycho-2, а также основные результаты, полученные в астрометрическом обзоре GAIA DR3.

На основе анализа существующих фотометрических и астрометрических данных, исследуется возможность создания полного (до 18–19-й звездной величины) фотометрического и астрометрического каталога звездообразных объектов, делаются оценки периода пригодности такого каталога. Особое внимание уделяется возможности использования каталога для привязки измерений блеска объектов, выполненных с применением разнородных фотометрических систем, к единой фотометрической системе.

С учетом ограничения на период пригодности астрометрической части каталога, рассматриваются существующие в стране оптические инструменты и возможности создания в России постоянно действующей наземной сети телескопов, необходимой для поддержания астрометрической части каталога в рамках точности, пригодной для систем астроориентации и астронавигации космических, авиационных, морских, военных и других потребителей России.

В докладе приводятся оценки времени для покрытия северного неба, числа и размера телескопов, необходимых детекторов и расположения телескопов на территории России.

Концепция проекта «Комплекс методов и средств высокоточного гравиметрического, магнитометрического и геодезического обеспечения удаленных регионов РФ, в том числе региона российской Арктики»

С. И. Донченко, О. В. Денисенко, И. С. Сильвестров, В. Ф. Фатеев

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Актуальность создания Программы обусловлена широкими планами освоения северных регионов страны, и в особенности региона Российской Арктики. В этой связи требуется создание новых средств разведки земных недр, оснащение транспортных средств региона устойчивыми средствами автономной навигации, дополняющими средства навигации по ГНСС, а также дальнейшее развитие Арктического транспортного коридора — Северного морского пути.

Цели предлагаемой Программы состоят в следующем:

– повышение устойчивости и точности систем автономной навигации транспортных сетей Автонет, Аэронет, Маринет в Арктике в условиях сложной радиоэлектронной обстановки на основе использования геофизических полей;

– информационное обеспечение безопасности судовождения на Севморпути за счет создания новых средств оперативной разведки состояния водной поверхности и ледовых полей в Северном ледовитом океане;

– повышение эффективности поиска полезных ископаемых, в особенности на шельфе Северного ледовитого океана, на основе создания новых наземных, воздушных и космических геофизических средств разведки, основанных на атомных, квантово-оптических и ГНСС-технологиях.

Проанализированы основные тенденции развития наземных, воздушных и космических средств гравиметрической разведки полезных ископаемых, а также средств построения высокоточных карт для навигации по геофизическим полям. Из положительных тенденций следует отметить расширение отечественных фундаментальных гравиметрических сетей, повышение точности наземных и воздушных средств гравиметрии, положительный опыт эксплуатации космических гравиметрических средств ГЕО-ИК, GOCE, GRACE-FO. При этом установлено, что космические средства при их высокой точности не обеспечивают требуемого разрешения для создания карт для навигации и поиска полезных ископаемых. Отрицательная тенденция состоит в новых ограничениях на закупку иностранных гравиметров в связи с экономическими санкциями.

В этой связи представлены новые перспективные технические и организационные решения в области наземной, воздушной и космической гравиметрии, разработанные в последние годы ФГУП «ВНИИФТРИ». Эти решения обеспечивают достижение целей Программы.

Среди них наземные приборы: атомный абсолютный гравиметр и малогабаритный носимый высокоточный относительный гравиметр (аналог канадского

прибора Scintrex), создаваемые на собственной производственной базе; не имеющий аналогов за рубежом квантовый нивелир, измеряющий разность ортометрических высот глобально разнесенных точек и основанный на создаваемых «ВНИИФТРИ» сверхстабильных стандартах частоты и времени; астрономический измеритель УОЛ, который использует оригинальное математическое обеспечение и поэтому является самым точным прибором в РФ.

Среди воздушных приборов следует назвать бистатический радиолокатор на сигналах ГНСС, который базируется на БПЛА и способен обеспечить оперативную ледовую разведку на Севморпути.

Из космических измерителей предложены новые, не имеющие аналогов приборы: лазерный бортовой градиентометр и лазерный микроакселерометр, точность которых на 1–2 порядка превышает известные; космический бортовой гравиметр на сигналах ГНСС, обладающий более высокой точностью, чем воздушные гравиметры; измеритель УОЛ на сигналах ГНСС, обладающий более высокой точностью, чем наземные аналоги.

На основе новых гравиметрических приборов на территории РФ предложено создать новую измерительную сеть «Квантовый футшток», которая включает несколько пунктов геофизической колокации (ПГФК), размещенные на базе филиалов и партнеров «ВНИИФТРИ», до Петропавловска-Камчатского на востоке и до Норильска на Севере. Главная задача сети — обеспечение высокоточной разведки ГПЗ и МПЗ в северных регионах, в том числе на шельфе, создание навигационно-геофизических карт для систем навигации, а также создание и поддержание единой высотной основы страны. Для детальной разведки ГПЗ и МПЗ на базе стационарных ПГФК создаются автомобильные и воздушные ПГФК, оснащенные необходимыми бортовыми гравиметрическими и магнитометрическим приборами. Для расширения области применимости сети «Квантовый футшток» предложен состав и направления реализации комического пункта геофизической колокации, который оборудован предложенными выше бортовыми измерительными приборами, а также использует опыт миссии CRACE.

Предложен План мероприятий по реализации Программы, а также состав участников Программы. Среди них: Минпромторг, Росреестр, Министерство по развитию Дальнего Востока и Арктики, РАН, Минтранс, Минобрнауки, Минприроды России, Министерство обороны и др.

Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022 и формирование национальной шкалы времени Российской Федерации

С. И. Донченко, О. В. Денисенко, В. Н. Федотов, Ю. Ф. Смирнов, И. Б. Норец, А. А. Карауш, О. В. Купалова

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

В Российской Федерации являются обязательными для использования сведения о точном значении времени и календарной дате, которые распространяются государственной службой времени, частоты и определения параметров вращения Земли [1]. Повсеместное использование данных сведений обеспечивает высокоточную временную синхронизацию процессов, применяемых во многих отраслях экономики при создании специализированных прикладных систем различного назначения.

Космические системы связи, транспорт, в том числе беспилотный, космические навигационные и геодезические системы, системы управления движением, высокоскоростные системы связи и передачи данных, системы учёта расхода и транспортировки жидкостей и газов, системы коммерческого учёта электроэнергии, банковская сфера, медицина — вот неполный перечень потребителей частотно-временной информации. Непрерывно возрастающие требования к точности и оперативности получения частотно-временной информации со стороны потребителей приводят к необходимости постоянно вести исследования и разработку более точных технических средств, с последующим внедрением их в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1.

За последние годы по результатам окончания научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках выполнения государственных программ были разработаны, изготовлены и успешно прошли испытания новые средства воспроизведения, хранения и передачи единиц времени и частоты, которые вошли в состав ГЭТ 1-2022 [2]:

– комплекс средств воспроизведения и хранения единиц времени и частоты на основе оптических реперов частоты с неисключённой систематической погрешностью воспроизведения единицы частоты в оптическом диапазоне не более $1\cdot10^{-17}$;

– комплекс хранения национальной шкалы времени на основе водородных стандартов частоты нового поколения с суточной нестабильностью частоты не более $3\cdot10^{-16}$;

– репер частоты фонтанного типа на основе холодных атомов рубидия с неисключённой систематической погрешностью воспроизведения единицы частоты не более $2\cdot10^{-16}$;

– комплекс высокоточных средств сравнений национальной шкалы координированного времени UTC(SU) со шкалой времени системы ГЛОНАСС с погрешностью сравнения удалённых шкал времени ±1.5 нс.

Проведенные разработки позволили утвердить Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени в новом составе, с улучшенными метрологическими характеристиками и с присвоением ему регистрационного номера ГЭТ 1-2022.

Применение новых технических средств позволило национальной шкале времени РФ UTC(SU) по своим характеристикам войти в число лучших реализаций UTC, что подтверждается результатами Международных ключевых сличений, ежемесячно публикуемых отделением времени МБМВ в виде циркуляров «Т».

Литература

1. Постановление Правительства РФ от 23 марта 2001 г. № 225 «Об утверждении Положения о Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли».

2. Норец И. Б., Смирнов Ю. Ф., Глазов Е. Ю., Федотов В. Н. Результаты совершенствования Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022 // Альманах современной метрологии. 2022. № 3 (31). С. 8–21.

Совершенствование системы распараллеливания программы определения ЭВИ в ГМЦ ГСВЧ

А. Э. Дроздов

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Разработанный программно-аппаратный комплекс (ПАК) в ГМЦ ГСВЧ ФГУП «ВНИИФТРИ» для расчёта эфемеридно-временной информации НКА ГНСС [1] содержит систему распараллеливания вычислений для компьютеров с многопроцессорной архитектурой. Имеющаяся система распараллеливания, которую назовём «внешней», позволяет запускать одновременно на разных ядрах процессора несколько экземпляров одной программы, одновременное выполнение которых не мешает друг другу (например, перевод данных измерений во внутренний формат программы). Однако в ПАК ГМЦ ГСВЧ существуют такие программы, производящие долгие вычисления, которые нельзя распараллелить «внешней» системой распараллеливания, например, потому что они работают с одними и теми же файлами, которые нельзя обрабатывать параллельно. В докладе обсуждаются пути распараллеливания таких программ, а также рассмотрены особенности такого «внутреннего» распараллеливания.

Литература

1. Безменов И. В. Вычисление эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме по данным измерений // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 7–14.

Технология высокоточной синхронизации пространственно удаленных наземных ШВ и бортовых ШВ РЭВЧ двухпутевым методом на основе средств измерений текущих навигационных параметров наземного комплекса управления ГЛОНАСС

А. В. Дружин[1], С. В. Подрезов[1], Ю. А. Винник[2]

[1]АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия
[2]ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

Актуальность повышения требований к точности частотно-временного обеспечения НКА обусловлена ключевой ролью взаимной синхронизации навигационных сигналов ГНСС ГЛОНАСС. Важной составной частью проблемы высокоточной синхронизации шкалы времени (ШВ) НКА является формирование групповой наземной ШВ, состоящей из пространственно удаленных рабочих эталонов времени и частоты (РЭВЧ) — центральных синхронизаторов, РЭВЧ средств измерений НКУ ГЛОНАСС. Повышение точности синхронизации пространственно удаленных ШВ реализуется совершенствованием комплекса средств сличений ШВ. При этом применение двухпутевого метода (TWTSFT) сличения ШВ с использованием спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите, являющегося наиболее точным методом, не всегда возможно на практике.

В работе предлагается технология высокоточной синхронизации пространственно удаленных наземных ШВ и бортовых ШВ РЭВЧ двухпутевым методом на основе средств измерений текущих навигационных параметров наземного комплекса управления ГЛОНАСС. Теоретически и экспериментально показанная возможность использования существующих одноканальных приемных трактов запросных измерительных систем существенно расширяется переходом к многоканальным (4–6-канальным) и позволяет реализовать технологию запросно-беззапросных измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) НКА несколькими запросными системами — технологию совместных многопозиционных ИТНП и групповых сличений ШВ. Обоснованы требования к модернизации запросных измерительных систем НКУ ГЛОНАСС.

Компенсация невзаимности путей распространения сигналов ШВ (запросных сигналов, привязанных к ШВ) реализуется посредством использования одновременных измерений доплеровской частоты и интегрального доплеровского метода.

Результаты и перспективы космической гравиметрии: орбитальный градиентометр

В. Е. Жаров

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

В работе рассмотрены основы работы градиентометра на борту КА и принципы измерения вторых производных гравитационного потенциала с его помощью. Для моделирования работы градиентометра разработан алгоритм формирования тензора градиентов потенциала на основе вычисления ускорений пробных масс акселерометров, а также вторых производных потенциала. Обсуждаются принципы вычисления условных уравнений для компонент тензора относительно поправок к параметрам Стокса априорной модели гравитационного поля Земли, а также регуляризация решения обратной задачи (восстановления гравитационного поля Земли) по данным миссии GOCE.

В качестве перспективной задачи рассмотрен другой вариант орбитального градиентометра, обсуждаются результаты моделирования его работы и восстановления гравитационного поля Земли.

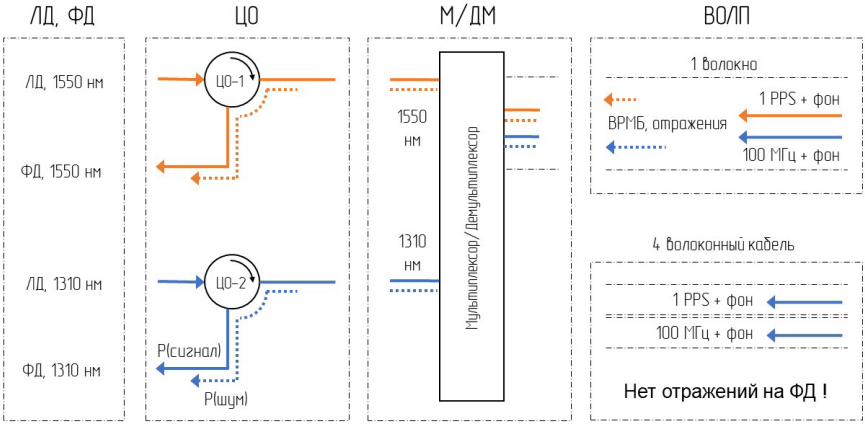
Возможности по увеличению протяжённости ВОЛС при передаче сигналов частоты и времени модемами VCH-608

А. В. Жеглов, Р. С. Кобяков, Р. Н. Новожилов, С. Ю. Медведев

АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

ВОЛС строится как цепочка регенерационных участков: передающий модем — участок ВОЛС — принимающий модем. С увеличением числа регенерационных участков растёт вносимая нестабильность передачи сигналов частоты и времени. Для снижения вносимой нестабильности целесообразно удлинение каждого из регенерационных участков.

При использовании модемов VCH-608 происходит дуплексная передача сигналов стандарта частоты и времени от передающего модема к принимающему и обратно для компенсации фазовой нестабильности, возникающей в ВОЛС, например из-за теплового воздействия окружающей среды [1]. При этом в сторону фотодиода, принимающего оптический сигнал мощностью P (сигнал), приходят отражения из-за неоднородностей линии передачи, рассеянного назад излучения-за счёт эффекта Мандельштама-Бриллюэна, что создаёт паразитную оптическую мощность P (шум). Кроме того, спонтанное излучение лазерного диода в допороговой области ватт-амперной характеристики, остаточное излучение при коэффициенте модуляции излучения по интенсивности менее 100 %, создаёт фоновое излучение, увеличивая P (шум), как показано на рисунке.



Структура подключения модемов VCH-608 к ВОЛС со стороны передающего модема, подключение с противоположной стороны выглядит аналогично (ЛД – лазерный диод, ФД – фотодиод, ЦО – циркулятор оптический, М/ДМ – мультиплексор/демультиплексор)

С ростом отношения Р (шум)/Р (сигнал) растёт вносимая модемами нестабильность, возникают ложные сигналы. Снижение этого отношения возможно за счёт подбора:

– компонентов ВОЛС (разъёмов, аттенюаторов и др.);
– параметров передаваемых сигналов;
– тока смещения лазерного диода с учётом глубины модуляции;
– модификации модемов (с выходом в 1 волокно или в 4 волокна и т. д.).

Приведено сравнение модификаций модемов VCH-608 с точки зрения удлинения регенерационных участков, отличающихся: средой прокладки, типом волокон, количеством и типом неоднородностей, изгибов и другими признаками. В том числе рассмотрены ограничения и даны рекомендации по использованию волоконных и полупроводниковых оптических усилителей совместно с модификациями модемов VCH-608.

Литература

1. Кобяков Р. С., Жеглов А. В., Медведев С. Ю. и др. Передача сигналов перспективных водородных стандартов частоты и времени по оптоволоконному каналу с компенсацией фазовой нестабильности // Измерительная техника. 2021. № 12. С. 42–47.

Результаты наблюдений космических аппаратов ГНСС ГЛОНАСС с асимметрией амплитудной диаграммы направленности антенно-фидерного устройств

А. С. Завгородний

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Одним из направлений мониторинга радионавигационных сигналов ГНСС является регулярная оперативная оценка энергетических характеристик сигналов в приземном слое, прежде всего — мощности излучаемых навигационными космическими аппаратами (НКА) сигналов. Согласно интерфейсным контрольным документам [1, 2] мощность радионавигационного сигнала при его приеме на линейно-поляризованную антенну с коэффициентом усиления 3 дБ должна находиться в пределах от –161 до –155 дБ исх. 1 Вт для сигналов с частотным разделением, и от –158.5 до –155 дБ исх. 1 Вт — для сигналов с кодовым. Это сравнительно небольшие уровни мощности, которые не доступны для регистрации, и тем более для измерения при помощи применяемых в радионавигационном диапазоне приборов: ваттметров и анализаторов сигналов.

Для мониторинга радионавигационных сигналов в ФГУП «ВНИИФТРИ» создан специализированный измерительный комплекс [3], основой которого являются крупноапертурные зеркальные антенные системы (диаметр основного рефлектора составляет 12 м). Применение таких антенн позволяет решить несколько задач: во-первых, большой коэффициент усиления антенной системы (не менее 80 дБ в диапазоне частот L, из которых около 40 дБ приходится на коэффициент усиления антенной системы) позволяет усилить принимаемый сигнал до уровней, существенно превышающих чувствительность метрологически обеспеченной радиоизмерительной аппаратуры, во-вторых, узкая диаграмма направленности антенны (ширина основного лепестка приблизительно 1°) позволяет выделить из эфира сигналы только одного НКА, и наконец, пространственная селекция сигналов одного КА означает уменьшение уровней сигналов с других направлений, в т. ч. помех приземных источников. В 2020 г. комплекс был дооснащён радиометрами водяного пара, что позволило сократить погрешность измерений мощности за счет оценки переменчивого ослабления сигналов в нижних слоях атмосферы. В результате эксплуатации комплекса в ФГУП «ВНИИФТРИ» с 2016 г. была собрана база данных с результатами измерений мощности сигналов НКА в приземном слое.

Метод наблюдения НКА подразумевает слежение за аппаратом с момента его попадания в зону видимости антенной системы до выхода из неё (т. е. «от горизонта — до горизонта»). Такой способ мониторинга позволяет собрать наибольшее количество информации о состоянии антенно-фидерного устройства КА. В большинстве случаев зависимости мощностей сигналов от угла места выглядят как симметричные кривые относительно точки наибольшего возвышения. Если

точка наибольшего возвышения трассы не превосходит 20–25°, то зависимости напоминают собой параболы с ветвями вниз, если точка максимального возвышения трассы близка к зениту, то у зависимости появляется характерный локальный минимум в области больших углов возвышения. Однако на общем фоне выделялись случаи, когда зависимости мощностей радионавигационных сигналов от угла места не являлись симметричными фигурами. Этот эффект также был обнаружен при наблюдении НКА на так называемых особых участках орбиты [4], т. е. когда аппарат совершает поворот вокруг оси «центр масс НКА — центр масс Земли». При этом потребитель принимает сигнал, уровень мощности которого модулирован амплитудной диаграммой направленности (ДН) антенно-фидерного устройства (АФУ) НКА. Если амплитудной ДН представляет собой осесимметричную фигуру, поворот аппарата не скажется на уровне мощности, в противном случае неравномерность зависимости принимаемой мощности от времени будет соответствовать перепадам в уровне ДН по направлению к потребителю. Более того, при искажении формы амплитудной ДН один и тот же НКА может соответствовать требованиям ИКД с точки зрения одного потребителя (к которому обращен локальный максимум ДН) и не соответствовать им с точки зрения другого (на которого направлен локальный минимум). Разрешить это противоречие можно путём восстановления формы амплитудной ДН АФУ КА.

В ФГУП «ВНИИФТРИ» был разработан способ оценки параметров амплитудных ДН АФУ НКА [5]. По результатам наземных наблюдений были оценены форма и основные параметры ДН аппаратов в диапазонах частот L1, L2, L3. На этапах разработки метода НКА выбирались так, чтобы ДН их АФУ была заведомо симметричной в диапазоне частот L3, что упрощало расчет и позволяло устранить неточности в решении задачи двухмерной аппроксимации. В 2023 г. был проведен эксперимент по оценке параметров формы амплитудной ДН АФУ НКА из состава орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС, угломерные зависимости мощности которого не являлись симметричными. В результате измеренная величина неравномерности по ДН составила около 2 дБ в диапазоне частот L1.

Доклад призван заострить внимание на проблеме асимметрии амплитудных ДН АФУ КА. Одни и те же навигационные аппараты в зависимости от ракурса относительно потребителя могут излучать сигналы существенно разного уровня мощности. По этим причинам при выборе группировки НКА для решения навигационной задачи следует оценивать не только углы возвышения аппаратов над горизонтом и их взаимное расположение, но и состояние их АФУ.

Литература

1. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1). URL: https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (дата обращения 06.08.2023).

2. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов (редакция 1.0). URL: https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/IKD.-Obshh.-opis.-Red.-1.0-2016.pdf (дата обращения 06.08.2023).

3. Завгородний А. С., Рябов И. В., Воронов В. Л. Метрологический комплекс оценки энергетических характеристик сигналов навигационных космических аппаратов ГНСС «ГЛОНАСС» //Альманах современной метрологии. 2016. № 7. С. 124–138.

4. Денисенко О. В., Федотов В. Н, Воронов В. Л. и др. Результаты наблюдений навигационных космических аппаратов ГНС ГЛОНАСС на особых участках орбиты // Вестник метролога. 2017. № 4 С. 15–18.

5. Завгородний А. С., Воронов В. Л., Рябов И. В., Цигенгагель Н. Р. Измерение параметров амплитудной диаграммы направленности антенной системы навигационного космического аппарата с помощью наземного измерительного комплекса // Измерительная техника. 2018. № 11. С. 22–26.

Региональные и локальные движения постоянно действующих ГНСС-станций в Европейской части РФ

Р. В. Загретдинов, В. Ф. Бахтиаров, А. А. Загретдинов

КФУ, г. Казань, Россия

Постоянно действующие базовые ГНСС-станции ФАГС и IGS являются основой для формирования координатно-временной инфраструктуры РФ. Однако их количество невелико, учитывая огромные размеры нашей страны. Инициированный Росреестром проект Федеральной сети геодезических станций объединил более 2000 станций различных государственных и коммерческих операторов. В этой связи становится актуальным оценка качества получаемых в рамках проекта координат и скоростей пунктов в ГСК-2011. В Казанском университете уже несколько лет ведутся работы по сбору и обработке измерений ГНСС-станций в европейской части страны (рис. 1). Наша база ГНСС-данных содержит измерения с более чем 1100 станций. Обработка измерений проводится ПО BERNESE версии 5.2 преимущественно ежесуточно в онлайн-режиме.

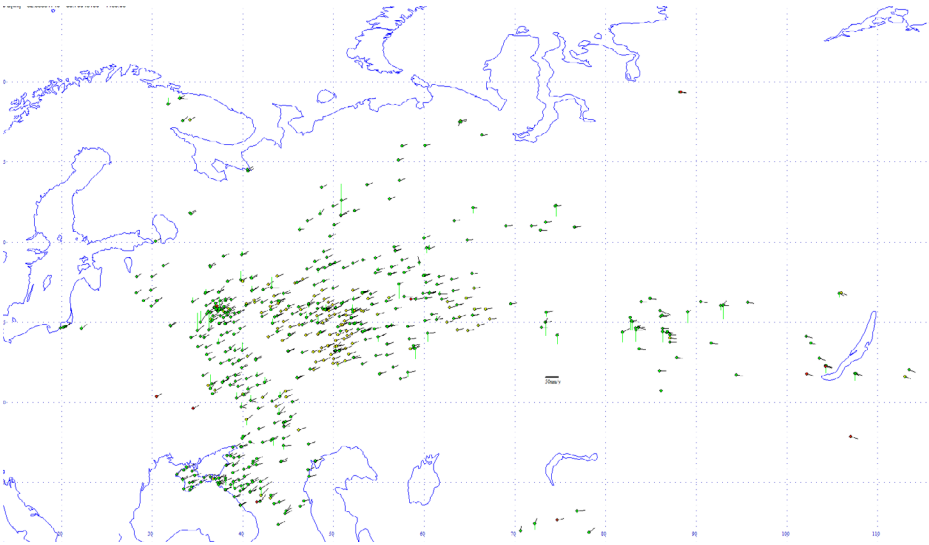
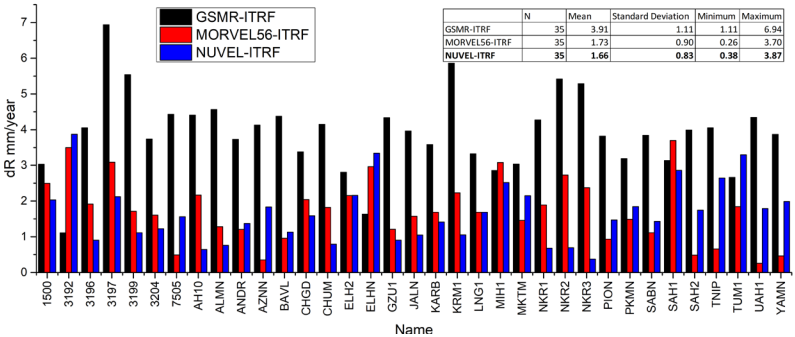


Рис. 1 Расположение обрабатываемых станций с векторами глобальных скоростей

Для 874 станций вычислены их глобальные координаты и скорости движения, однако только для 300 станций, имеющих достаточно длительные ряды ГНСС-измерений (более 3 лет), значения глобальных скоростей определяются достаточно надежно. Такие результаты могут быть использованы как для вычис-

ления координат станций на требуемую эпоху, так и для изучения региональных и локальных движений земной поверхности.

Для сравнения полученных нами ITRF-скоростей со скоростями согласно моделям NUVEL 1A, MORVEL56 и GSRM v2.1 (UNAVCO Plate Motion Calculator), были выбраны 35 станций, расположенных на Юго-востоке Республики Татарстан, с длительными непрерывными измерениями. Было установлено, что скорости станций согласно моделям NUVEL 1A, MORVEL56 хорошо согласуются с нашими результатами (Рис. 2) и могут быть использованы для изучения локальных движений ГНСС-станций в районах активной добычи нефти.



	N	Mean	Standard Deviation	Minimum	Maximum
GSMR-ITRF	35	3.91	1.11	1.11	6.94
MORVEL56-ITRF	35	1.73	0.90	0.26	3.70
NUVEL-ITRF	**35**	**1.66**	**0.83**	**0.38**	**3.87**

Рис. 2 Результаты сравнения различных моделей для 35 станций

Кроме того, среди этих 300 стабильных станций было выявлено 5 станций с аномально большими (более 1 см в год) постоянными высотными приседаниями.

Литература

1. Бахтиаров В. Ф., Загретдинов Р. В. О геодинамике постоянно действующих стационарных станций ГНСС на территории РФ // М.: Геопрофи – 2021. № 1. С. 34–37.

Центр корреляционной обработки РАН: передача, хранение и обработка радиоастрономических наблюдений

В. Ф. Зимовский, И. А. Безруков, М. В. Васильев, В. О. Кен, С. Л. Курдубов, А. Е. Мельников, А. Г. Михайлов, В. Ю. Мишин, А. И. Сальников, И. Ф. Суркис

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Центр корреляционной обработки (ЦКО) РАН является структурным подразделением ИПА РАН, осуществляющим обработку наблюдений, проводимых на радиоинтерферометрическом комплексе «Квазар-КВО» [1]. Аппаратно-программные средства ЦКО включают в себя (в том числе фкнуционально) аппаратно-программный коррелятор АРК, программные корреляторы DiFX, RASFX на гибридном процессорном кластере, систему планирования наблюдений, систему буферизации и приема данных, средства архивирования результатов обработки. Аппаратно-программные средства ЦКО связаны каналами электронной связи с РСДБ-станциями радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО».

В ЦКО РАН проводится обработка РСДБ-наблюдений на радиотелескопах РТ-32 и РТ-13, осуществляемых по астрометрическим и геодезическим программам, специальным программам для тестирования оборудования станций, программам для астрофизических исследований [2], программам для отработки методик РСДБ-наблюдений естественных радиоисточников и космических аппаратов [3].

В работе представлены текущий статус и некоторые результаты обработки данных наблюдений.

Литература

1. Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., et al. Russian VLBI network “Quasar”: Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2019. Vol. 10, Is. 2. P. 150156. URL: https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.09.008.
2. Titov O., Frey S., Melnikov A., et. al. Astrometric apparent motion of high-redshift radio sources // The Astronomical Journal. 2023. Vol. 165, no. 2. P. 69.
3. Васильев М. В., Зимовский В. Ф., Мельников А. Е. и др. «Наблюдения космических аппаратов на радиоинтерферометрическом комплексе «Квазар-КВО» // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 6. С. 111–124.

Корреляционная обработка РСДБ-наблюдений, зарегистрированных в разных режимах

М. С. Зорин, И. Ф. Суркис

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В ИПА РАН с 2015 г. для обработки РСДБ-наблюдений используется программный коррелятор РАН (RASFX) [1]. Коррелятор обрабатывает входные потоки данных в форматах VDIF [2] и VSI H [3] и реализует FX-алгоритм их обработки. По умолчанию РСДБ-наблюдения на разных станциях должны регистрироваться в одинаковых режимах: с одинаковым количеством частотных каналов и одинаковой шириной полосы пропускания. Это не позволяет проводить обработку некоторых специальных наблюдений, например совместных наблюдений на радиотелескопах РТ–32 с регистрацией 16 каналов с шириной полосы пропускания 32 МГц и РТ 13 с регистрацией одного канала с шириной 512 МГц.

Программное обеспечение (ПО) коррелятора RASFX модернизировано для проведения корреляционной обработки данных в универсальном режиме. В результате впервые на корреляторе RASFX удалось произвести совместную обработку узкополосных и широкополосных наблюдений, а также получить корреляционные отклики.

В работе приведены алгоритмы модернизированного ПО коррелятора и описаны основные внесенные изменения. Показаны результаты в виде корреляционных откликов и значений задержки в корреляционном окне и отношения сигнал-шум на примере сессий наблюдений ev0034 и ru0851.

Литература

1. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 6. С. 1–9.
2. Whitney A., Kettenis M., Phillips C., Sekido M. VLBI data interchange format (VDIF) // IVS 2010 General Meeting Proceedings. P. 192–196.
3. Whitney A. R. The VLBI Standard Interface Hardware (VSI-H) Interface Specification [Электронный ресурс]. URL: https://vlbi.org/wp-content/uploads/2019/03/VSI_H_paper_for_IVS_TOW.pdf (дата обращения: 16.03.2023).

Измерения плотностей потоков и переменности стандартных источников шкалы потоков ИЛ на временной шкале 2.5 года

В. П. Иванов, А. В. Ипатов, И. А. Рахимов, Т. С. Андреева

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты измерений плотностей потоков стандартных радиоисточников абсолютной шкалы потоков «искусственная луна» [1] на эпоху 2018.0 на волнах 3.5 и 6.2 см. Радиоастрономическая шкала потоков представляет собой выборку источников радиоизлучения, спектры которых точно известны на заданном частотном интервале и используются как стандарты плотностей потоков.

Выбор источников в качестве вторичных стандартов плотностей потока ограничен сильными источниками, удовлетворяющих следующим требованиям: иметь стабильное во времени излучение и малые угловые размеры. Первое требование очевидно, второе минимизирует погрешности измерений с высоким угловым разрешением.

Из наблюдений следует, что источники со стабильным излучением являются редким исключением, поэтому компромиссное требование к стандартам формулируется как отсутствие быстрой и значительной переменности их радиоизлучения.

Переменность характерна для почти всех источников, и у выбранных стандартов имеют место слабые изменения потока, вследствие чего для сохранения точности шкалы требуются регулярные повторные калибровки спектров стандартных источников. В настоящей работе представлены результаты измерений плотностей потоков стандартных источников на радиотелескопе РТ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН для определения шкалы потоков «искусственная луна» на эпоху 2018.0 на волнах $\lambda = 6.2$ см и $\lambda = 3.5$ см.

В качестве вторичных стандартов шкалы потоков ИЛ были выбраны источники 3C48, 3C123, 3C138, 3C147, 3C161, 3C196, 3C218, 3C274, 3C286, 3C348, 3C353, NGC7027, 3C433. Программа мониторинга спектров источников — вторичных стандартов шкалы потоков ИЛ выполняется на радиотелескопе РТ-32 [2–4] обсерватории «Светлое» ИПА РАН с 2002 г. Циклы наблюдений, в процессе которых на волнах 3.5 см; 6.2 см; 13 см; 18 см измеряются плотности потоков вторичных стандартов относительно стабильного во времени стандарта шкалы потоков ИЛ 3C295, повторяются для изучения переменности стандартов на разных временных шкалах. В настоящее время на радиотелескопе РТ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН выполняется очередной цикл наблюдений по этой программе. Приведены параметры полноповоротного параболического радиотелескопа РТ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН с диаметром зеркала 32 м.

Случайная погрешность измерений на всех частотах не превышает ±2 %.

Данные корректируются за угловое разрешение и атмосферное поглощение, изложена методика коррекции.

КИП антенны может меняется в пределах нескольких процентов с изменением угла места. Для устранения ошибок, связанных с этим эффектом, сравнение любых двух источников проводилось при углах места, одинаковых для обоих источников в пределах ±5° от среднего положения.

Определены плотности потоков, а также стандартные отклонения измеренных плотностей потоков калибраторов шкалы потоков ИЛ на волнах $\lambda = 6.2$ см и $\lambda = 3.5$ см на эпоху 2018.0.

Выполнено сравнение плотностей потоков стандартных источников $S_{new,}$ измеренных в эпоху 2018.0 с аналогичными данными S_0, полученными в эпоху 2015.5 [1]. Сравнение данных 2018.0 и 2015.5 показывает, что в течение временного интервала 2.5 года имели место значимые изменения плотностей потоков стандартных источников, превышающие стандартные отклонения σ и установленные пределы погрешности шкалы потоков ±3 %. Сделан вывод о необходимости проводить калибровки стандартных источников для сохранения точности шкалы потоков на уровне ±3 % не реже, чем через 2 года.

Литература

1. Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А. и др. Спектры стандартных радиоисточников на современную эпоху // Астрон. журн. 2018. Т. 95, № 9. С. 609–618.
2. Рахимов И. А., Ахмедов Ш. Б., Зборовский А. А. и др. // Всероссийская астрономическая конференция. Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 2001. С. 152.
3. Финкельштейн А. М. // Наука в России. 2001. Вып. 5. С. 20.
4. Finkelstein A., Ipatov A., Smolentsev S. // Proceedings of the Fourth APSGP WorkShop / Ed. by H. Cheng, Q. Zhi-han. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2002. P. 47.

Итоги исследований Солнца по наблюдениям солнечных затмений на радиотелескопах ИПА РАН за период 1999-2022 гг.

Д. В. Иванов[1], И. А. Рахимов[1], А. А. Дьяков[1], Г. Н. Ильин[1], Н. Г. Петерова[2] , Н. А. Топчило[3], А. В. Ипатов[1], Т. С. Андреева[1], Е. Ю. Хвостов[1], В. Ю. Быков[1]

[1]ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
[3]СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Представлен обзор результатов исследований микроволнового излучения Солнца, ведущихся на радиотелескопах ИПА РАН в течение двух 11-летних циклов солнечной активности 1999–2022 гг. Приведено краткое описание используемого метода наблюдений и их обработки, а также технических характеристик приемной аппаратуры и системы регистрации. Метод применяется в периоды солнечных затмений и считается наилучшим по точности координатных измерений, он позволяет достичь предельно допустимое дифракцией угловое разрешение ~ 1–3 угл. сек. Приведены основные результаты наблюдений, касающиеся спектрально-поляризационных характеристик отдельных локальных деталей структуры источников излучения (солнечные пятна, межпятенное излучение, радиогрануляция, протуберанцы). Исследован эффект прилимбового уярчения диска Солнца и измерены его эффективная яркостная температура, а также радиорадиус. Сделан вывод о целесообразности сочетания задач прикладного характера с задачами фундаментальных исследований и внедрения других, внезатменных способов наблюдений, в частности метода кругового сканирования, ранее опробованного на крупных полноповоротных антеннах РТ-22.

Применение новых методов обработки для повышения точности результатов лазерно-локационных измерений в условиях действия неблагоприятных внешних факторов

И. Ю. Игнатенко, И. В. Безменов

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

В Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) в настоящее время имеются два СЛД: ММКОС «Сажень-ТМ-БИС» и лазерная станция нового поколения комплекса средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС (ЛС КСФО) «Точка» [1]. Связь лазерных станций с Государственным специальным эталоном единицы длины и Государственным эталоном времени, частоты и национальной шкалы времени позволяет обеспечить прямой метрологический базис проводимых измерений. Обработка измерений для получения устойчивых оценок, в частности нормальных точек в условиях сильного влияния внешних факторов, таких как тропосферная рефракция при малых углах склонения наблюдаемого объекта, состояние атмосферы, отличающейся от стандартной, фоновая засветка и др., осуществляется с применением алгоритмов [2]. В докладе, в частности, говорится о достигнутых результатах по точности формирования нормальных точек при наличии малого количества измерительных данных.

Литература

1. Ignatenko I. Yu. Section 8 ILRS network of International Laser Ranging Service (ILRS) // 2016–2019 Report / ed. by C. Noll and M. Pearlman. NASA/TP-20205008530. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 2020. P. 8-66–8-68.,
2. Bezmenov I. V. Effective algorithms for detection outliers and cycle slip repair in GNSS data measurements // Chapter 9 in the book «Satellite Systems: Design, Modeling, Simulation and Analysis»/ Ed. by Tien M. Nguyen. IntechOpen. London: 2021. P. 177–209. Doi: 10.5772/intechopen.73789.

Учёт климатических и локальных особенностей места размещения РВП при расчёте тропосферной задержки

Г. Н. Ильин, В. Ю. Быков

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Сопоставление в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар КВО» результатов измерения тропосферной задержки (ТЗ), полученных с помощью радиометрической аппаратуры дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА), с аналогичными данными приёмников сигналов ГНСС, обработанных международной службой IGS, показало их различие. Очевидно, что подобное различие связано с особенностями места размещения аппаратуры ДЗА — радиометра водяного пара (РВП) и метеорологического профилемера МТП-5. Вторая причина — параметры алгоритма расчёта ТЗ по данным ДЗА (далее алгоритма) являются локально-зависимыми и должны корректироваться.

Поскольку принято считать ряд значений ТЗ международной службы IGS наиболее точным, то возможна коррекция (калибровка) ряда параметров алгоритма по такому ряду с целью уравнивания результатов измерений [1]. Подобное сравнение значений ТЗ и последующую коррекцию параметров алгоритма реально провести на территории Российской Федерации в очень ограниченном числе мест, которые с одной стороны должны быть оснащены приемниками сигналов ГНСС геодезического класса и входить в международную службу IGS, а с другой — иметь в своем распоряжении аппаратуру ДЗА. В настоящее время число подобных мест пять: три из них принадлежат ИПА РАН, а два оставшихся — ВНИИФТРИ.

Альтернативный подход к определению набора параметров алгоритма, привязанного к условиям места размещения аппаратуры ДЗА, заключается, как известно, в обработке вертикальных профилей метеопараметров, полученных на аэрологических станциях (АС) Росгидромета. Статистическая обработка данных АС позволяет получить все необходимые параметры алгоритма расчёта ТЗ и учесть изменчивость параметров алгоритма, обусловленную климатическими особенностями и высотой места расположения АС.

С целью определения параметров алгоритма была проведена обработка данных семи АС на интервале трёх лет: 2019–2021 г.

Места дислокации выбранных АС расположены различных климатических зонах и различаются по высоте над уровнем моря в диапазоне от 15 до 1300 м. Данные АС скачивались с сайта университета Вайоминг, США: http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html.

Расчёты проводились с помощью специализированного ПО, реализованного на языке Python 3.7. Расчет параметров алгоритма [2, 3] проводился интегрированием вертикальных профилей метеопараметров с использованием спектральной теории поглощения в атмосферных газах, в её современной реализации [4, 5]. Получены наборы требуемых параметров алгоритма, учитывающие как се-

зонные вариации параметров, так и высоту над уровнем моря места размещения аппаратуры ДЗА. Набор параметров алгоритма включает среднюю, взвешенную по поглощению и влажности температуру атмосферы, поглощение в кислороде, водяном паре и другие. Определены регрессионные зависимости параметров от приземной температуры и высоты расположения аппаратуры ДЗА. Частота, на которой выполнялся расчёт параметров алгоритма, задаётся пользователем, для РВП — 20.7 и 31.4 ГГц. С учётом полученных результатов определены параметры алгоритма для расчёта ТЗ в обсерваториях.

С целью валидации полученных результатов в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» проведено сравнение на годовом интервале значений ТЗ, определенных по данным РВП и ГНСС (IGS). Сравнение показало хорошее совпадение значений ТЗ. Среднее значение и СКО разности ТЗ РВП и ГНСС в обсерваториях «Светлое, «Зеленчукская» и «Бадары» на интервале 2022 г. составило: 2.1 ± 6.4, 0.6 ± 5.8 и –0.9 ± 6.6 мм соответственно.

Литература

1. Ильин Г. Н. Экспериментальная оценка параметров алгоритма расчета влажностной тропосферной задержки и их влияние на точность расчета // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 50. С. 36–43.
2. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. 1974. М.: Наука, 188 с.
3. Ильин Г. Н., Троицкий А. В. Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом // Известия высших учебных заведений // Радиофизика. 2017. Т. 60, № 4. С. 326–335.
4. Cimini D., Rosenkranz P. W., Tretyakov M. Y., et al. Uncertainty of atmospheric microwave absorption model: impact on ground-based radiometer simulations and retrievals // Atmos. Chem. Phys. 2018. Vol. 18, Iss. 20. P. 15231–15259.
5. Liebe H. J. MPM — An atmospheric millimeter wave propagation model // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1989. Vol. 10(6). C. 631–650.

Активные космические эксперименты в ионосфере и магнитосфере Земли с использованием энергии радиоволн ВЧ диапазона

А. В. Ипатов[1], Л. А. Ведешин[1,2]

[1]ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]ФГБУН ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Доклад посвящен крупному российскому ученому в области наук о Земле, окружающей среды и климата академику Н. П. Лаверову [1].

Изучение процессов в магнитосферно-геосферной системе вызываемых активными воздействиями с использованием мощных радиоволн ВЧ диапазона относятся к числу интенсивно развивающихся в мире направлений. Активные методы исследований широко используются в изучении как электродинамического взаимодействия между ионосферой и магнитосферой, так и неустойчивостей в околоземной плазме, искусственных ионосферных возмущений и их влияния на распространение радиоволн.

Возрастание интереса к изучению проблем высокоширотной ионосферы под воздействием мощных КВ радиоволн в значительной степени вызван проводимыми в настоящее время исследованиями на нагревных стендах в Норвегии, Пуэрто-Рико (США), России, на Аляске (США), Шпицбергене (Великобритания). Однако активные космические эксперименты не стали менее популярными.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. Лаверов Н. П., Зецер Ю. И. Активные эксперименты в ионосфере с использованием энергии радиоволн ВЧ диапазона. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. М.: ИФЗ РАН, 2000. С. 11–30.

Антенная система и приемный комплекс прототипа передвижной станции РСДБ-сети «Квазар-КВО»

А. В. Ипатов, Д. В. Иванов, М. Б. Зотов, В. Г. Стэмпковский, Е. Ю. Хвостов, В. К. Чернов, А. М. Шишикин, И. В. Шахнабиев

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Первый прототип передвижной станции комплекса «Квазар-КВО» был создан в ИПА РАН в 2018 г. на базе антенной системы TESLA с диаметром основного зеркала 4.3 м [1]. Характеристики приемной системы созданного прототипа соответствовали мировым аналогам [2], что позволило провести успешные РСДБ-наблюдения, а также подтвердить возможность применения передвижной РСДБ-станции в геодезических целях.

В процессе эксплуатации были определены направления для доработки прототипа: увеличение сектора обзора, повышение скорости наведения антенной системы и обеспечение двухдиапазонного приема сигналов

В докладе представлены предложения по доработке и ожидаемые после нее характеристики антенной системы TESLA. Приведены результаты разработки, конструктивные решения и расчетные характеристики приемного комплекса.

Литература

1. Иванов Д. В., Быков В. Ю., Гренков С. А. и др. Результаты разработки прототипа мобильной РСДБ-станции // Приборы и техника эксперимента. 2020. No 6. С. 1–7.
1. Sekido M., Takefuji K., Ujihara H., et al. Development status of GALAV broadband VLBI — geodetic solution and clock comparison // IVS NICT Technology Development Center news. No 36. 2016. P. 14–19.
2.

Государственный первичный специальный эталон координат местоположения ГЭТ 218-2022

А. М. Каверин, Д. С. Печерица, Е. А. Карауш, М. А. Ханзадян

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Значительная часть средств измерений, применяемая в области геодезии, радиосвязи, различных систем радионавигации, радиолокации и прочего, имеют метрологические характеристики в части хранения абсолютных координат, воспроизведения и измерения приращений координат местоположения потребителя ГНСС в системах координат WGS-85, ПЗ-90.11, ГСК-2011, ITRF, измерения и воспроизведения беззапросной дальности, измерения скорости изменения беззапросной дальности и измерения астрономического угла. Возросший уровень точности координатно-временных измерений, а также увеличение числа средств измерений создали необходимость в создании Государственного первичного специального эталона координат местоположения. Целью создания нового эталона является развитие комплекса средств метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС в части метрологического обеспечения средств измерения координат, решение задач обеспечения единства измерений спутниковой геодезической и навигационной аппаратуры, использующей сигналы ГНСС и наземных дополнений, а также средств измерений азимута (астрокоррекции и астровизирования).

В докладе приведены результаты работы по созданию нового первичного эталона, результаты исследования его метрологических характеристик. Результаты исследований метрологических характеристик ГЭТ 218-2022 в части хранения абсолютных координат и измерений приращений координат потребителя показали сопоставимый уровень точности с характеристиками международной системы ITRS. С применением ГЭТ 218-2022 можно проводить испытания таких перспективных средств измерений, как высокоточные беззапросные измерительные системы, прецизионные приёмники ГНСС в режиме абсолютных/относительных фазовых измерений.

Литература

1. Карауш Е. А., Печерица Д. С. Государственный первичный специальный эталон координат местоположения ГЭТ 218-2022: исследование метрологических характеристик // Измерительная техника. 2022. № 11. С. 3–8.
2. Антонович К. М. Использование радионавигационных систем в геодезии. Т. 1. М: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. 360 с.
3. Petit G., Luzum B., IERS Conventions (2010), IERS Technical Note, no. 36, available at: http://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf (accessed: 01.08.2022).3.
4. Proceedings of the 24th meeting of the General Conference on Weights and Measures (October 2011), available at: https://www.bipm.org/documents/20126/35657008/CGPM24.pdf/5cc3fc20-f45c-42f2-ea67-9b7f1e92408f (accessed: 01.08.2022).

Оценка нестабильности бортовых стандартов частоты спутников ГНСС в Государственной службе времени и частоты

А. А. Карауш, И. В. Безменов

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

В преддверии запуска первого спутника ГЛОНАСС, оснащённого бортовым водородным стандартом частоты, специалистами «ВНИИФТРИ» был разработан алгоритм оценивания нестабильности часов спутников ГНСС. В качестве исходной измерительной информации в алгоритме используются высокоточные оценки расхождений шкал времени наземных и бортовых стандартов частоты. Данные высокоточные оценки также получены во ФГУП «ВНИИФТРИ» с помощью собственного программного обеспечения [1] на основе обработки псевдодальномерных фазовых и кодовых измерений с глобально распределенной сети станций.

Разработанный алгоритм позволяет практически исключить влияние межсуточных скачков [2], присущих высокоточным продуктам, на оценки нестабильности бортовых стандартов частоты. Также реализован механизм компенсации периодических внутрисуточных возмущений частоты часов КА по аналогии с зарубежными ГНСС [3]. Данные возмущения могут вносить вклад в нестабильность частоты бортового стандарта на уровне порядка 10^{-14}, что является существенным для новых аппаратов ГЛОНАСС.

Литература

1. Безменов И. В. Вычисление эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме по данным измерений // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 11–17.
2. Rovira-Garcia A., Juan, J. M., Sanz, J., et al. Removing day-boundary discontinuities on GNSS clock estimates: methodology and results // GPS Solutions. 2021. Vol. 25. Article number 35. URL: https://doi.org/10.1007/s10291-021-01085-3 (дата доступа: 10.03.2023).
3. Senior K., Ray J., Beard R. L. Characterization of periodic variations in the GPS satellite clocks // GPS Solutions. 2008. Vol. 12. P. 211–225. URL: https://doi.org/DOI:10.1007/s10291-008-0089-9.

Алгоритм различения и оценки производных функции частоты сигналов высокостабильных задающих генераторов

В. А. Карелин

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Существенная зависимость технических и эксплуатационных параметров большинства радиотехнических систем от характеристик стабильности частоты сигналов задающих генераторов побуждает разработчиков к совершенствованию методов построения стандартов частоты и времени. Исследования в этом направлении проводятся в трех основных областях: создание генераторов стабильной частоты на новых физических принципах [1], совершенствование схемотехнических решений известных методов стабилизации частоты и разработка так называемых «дисциплинированных» стандартов частоты и времени [2]. Последнее направление является наиболее перспективным в плане снижения стоимости и вычислительной сложности алгоритмов реализации.

В работе [2] предложен вариант построения «дисциплинированного» стандарта частоты, который может компенсировать линейный дрейф частоты и не требует длительных экспериментальных исследований для определения модели параметров дрейфа. При этом математический анализ точности оценки дрейфа проведен без учета влияния отклонения периода сигнала квантования.

В данной работе проведен более строгий синтез метода, учитывающий вклад флуктуаций интервала времени квантования. Показана возможность оценки высших производных функции частоты сигнала задающего генератора. В отсутствие случайных воздействий движение изображающей точки сигнала автогенератора на фазовой плоскости происходит строго периодически по замкнутой кривой (эллипсу) — предельному циклу. В этом случае для определения координаты (фазы) и скорости (частоты) необходима опорная система отсчета, то есть другой автогенератор. Здесь уместна аналогия с принципом относительности в физике, который утверждает, что инерциальная система координат, движущаяся прямолинейно с постоянной скоростью, может определять свои координаты и скорость только относительно другой системы координат, принятой за неподвижную. Но если постоянство скорости нарушается, то есть появляются отличные от нуля производные функции скорости, система перестает быть инерциальной. В этом случае при наличии элемента, способного оценивать кажущееся ускорение, появляется возможность определять величину отклонения скорости и координаты от первоначальной траектории равномерного прямолинейного движения. В случае автогенератора случайные толчки приводят к тому, что по истечении некоторого времени флуктуационные уходы фазы могут быть большими (колеблясь в среднем около нуля). Вследствие этого в каждом из этих промежутков времени как бы имеет место своя частота, то есть возникают флуктуации частоты, благодаря которым появляется «пьедестал» спектральной линии любого реального генератора. Если иметь инструмент, фиксирующий ускорение фазы, производные функ-

ции частоты, появляется возможность оценивать отклонение частоты сигнала от первоначально установленного значения, аналогично системам инерциальной автономной навигации.

В качестве такого инструмента предлагается использовать преобразование спектра сигнала при его временной дискретизации. Известно, что спектр сигнала, дискретизированного во времени с частотой f_s, повторяется в частотной области с интервалом f_s. Надлежащим выбором частоты f_s сигнал, спектр которого центрируется вокруг f_0, может быть преобразован вверх и вниз на бесконечное число частот f_k в соответствии с выражением:

$$f_k = |\mp f_0 \mp k f_s|,$$

где k может принимать любое целое значение. При преобразовании вниз, когда $f_k < f_0$, появляется существенное увеличение относительной ширины спектра квантованного сигнала. Преобразованный сигнал оцифровывается с помощью АЦП и подвергается квадратурной демодуляции.

В работе показано, что при наличии высших производных функции фазы сигнала генератора, например дрейфа частоты, аргумент $\varphi(t_n)$ полученного комплексного цифрового сигнала не остается постоянным, а является функцией производных частоты. Отклонение частоты генератора $\Delta f(t_n)$ от значения, установленного перед началом автономной работы, получено в виде:

$$\Delta f(t_n) = \frac{4\pi^2}{N^2 n f_0^2} \sum_{i=1}^{n} (\varphi(t_i) - \varphi(t_{i-1})),$$

где n — номер текущей выборки, N — коэффициент синтеза частоты f_s.

Литература

1. Baklanov E. V., Dmitriev A. K. Optical frequency standard based on coherend population trapping resonance // Laser Physics. 2010. Vol. 20. P. 52–56.
2. Способ хранения частоты электрических колебаний: пат. 2730875 РФ, МПК7 G04G 3/00;/ Карелин В.А.; патентообладатель ОАО «Российский институт радионавигации и времени». № 2020109616/28; заявл. 04.03.2020; опубл. 26.08.2020; бюл. № 24.

О проблемах создания ядерно-оптического стандарта частоты на основе ^{229}Th

Ф. Ф. Карпешин, Л. Ф. Витушкин

ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, Россия

Использование резонансных свойств электронной оболочки является решающим фактором создания стандарта частоты и часов следующего поколения на основе ядерно-оптического резонанса [1]. Наиболее вероятным кандидатом является 8.2-эВ изомер ^{229m}Th. Вследствие близости энергии изомера к энергиям многих атомных переходов этот изомер образует резонанс с многими атомными уровнями [2]. Наиболее важен резонанс с электронным переходом *7s – 8s*. Использование резонансных свойств электронной оболочки как оптического резонатора сделает возможными манипуляции с изомером: его оптическую накачку и опрос состояния, в котором находится ядро, что является необходимым условием создания стандарта частоты. Осуществление ядерно-оптического резонанса на практике позволит измерить энергию ядерного перехода с большой точностью, характерной для оптических методов. Можно говорить о создании новых ядерно-лазерных технологий для оптической накачки ядерных изомеров и других манипуляций над атомными ядрами.

С этой точки зрения мы проводим анализ имеющихся экспериментальных результатов относительно энергии и времени жизни ^{229m}Th. Время жизни различается на порядки величины в нейтральных атомах и ионах различной кратности вследствие резонансного взаимодействия с электронной оболочкой, изменяясь от 10 мкс до нескольких часов в трёхкратных ионах. Сюрпризом оказалось короткое время жизни в однократных ионах, что получило название ториевой загадки. Загадка объясняется зависимостью времени жизни изомера от внешних условий: давления и температуры [1, 3]. Это наряду с выравнивающей ролью фрагментации одноэлектронных уровней указывает на возможное разрешение ториевой загадки. Рассматривается вклад E2-компоненты в электромагнитный распад ядерного изомера.

С учетом накопленного опыта, в рамках последовательного теоретического анализа обсуждается оптимальная электронно-ядерная конфигурация ^{229}Th, наиболее подходящая для возбуждения ядерно-оптического резонанса. Практически удобным является метод, известный в метрологии как комб-генератор [4]. Посредством этого метода можно возбудить ядерный изомер, используя единственный лазер, путем кратного умножения гармоник.

Литература

1. Витушкин Л. Ф., Карпешин Ф. Ф., Тржасковская М. Б. Актуальные проблемы создания ядерно-оптических стандартов частоты на основе ^{229}Th // Ядерная физика. 2020. Т. 83. № 6. С. 463–469.

2. Карпешин Ф. Ф. Мгновенное деление в мюонных атомах и резонансная конверсия. М.: Наука, 2006.

3. Karpeshin F. F., Trzhaskovskaya M. B. A proposed solution for the lifetime puzzle of the ^{229m}Th+ isomer // Nucl. Phys. A. 2021. Vol. 1010. P. 122173.

4. Карпешин Ф. Ф., Тржасковская М. Б. Ядерно-оптические стандарты частоты: новое поколение // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 36. С. 15.

Применение волоконно-оптического модема «VCH-608» для передачи эталонного сигнала частоты на радиотелескопы сети «Квазар-КВО»

А. С. Карпичев, А. О. Амельченко, А. В. Вытнов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время в обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» передача эталонных сигналов от хранителя времени и частоты к различным потребителям осуществляется по волоконно-оптическим линиям передачи (ВОЛП) [1, 2]. Для передачи гармонических сигналов частоты и импульсных сигналов шкалы времени используются независимые ВОЛП. Также в ИПА РАН были проведены эксперименты по совмещенной передаче сигналов опорной частоты и шкалы времени по одному оптическому волокну [3].

В данной работе исследовалась возможность применения волоконно-оптического модема «VCH-608» производства АО «ВРЕМЯ-Ч» с компенсацией фазовой нестабильности [4] для передачи сигналов опорной частоты на радиотелескопы сети «Квазар-КВО».

В первой части эксперимента передающая и принимающая части модема располагаются в помещении хранителя времени и частоты, а связывающая их ВОЛП проходит по подвижным конструкциям радиотелескопа РТ-32 обсерватории «Светлое». Во второй части эксперимента принимающая часть модема расположена непосредственно в надзеркальной кабине радиотелескопа РТ-32 обсерватории «Светлое». В обоих случаях измерения проводятся при активном движении радиотелескопа.

В ходе эксперимента была измерена нестабильность частоты передаваемого гармонического сигнала. Результаты нестабильности частоты удовлетворяют требованиям к современным РСДБ-системам, что говорит о возможности применения модема «VCH-608» для передачи эталонных сигналов частоты на радиотелескопы РТ-32 сети «Квазар-КВО».

Литература

1. Царук А. А., Карпичев А. С., Зиновьев П. В. и др. Передача сигнала опорной частоты на РСДБ-радиотелескоп по оптоволоконной линии // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 43. С. 145–150.
2. Вытнов А. В., Зиновьев П. В., Иванов Д. В. и др. Передача сигналов шкалы времени по волоконно-оптическим линиям при помощи телекоммуникационных SFP-трансиверов // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 47. С. 8–11.
3. Карпичев А. С., Зиновьев П. В., Вытнов А. В. Совместная передача сигналов опорной частоты и шкалы времени по одному оптическому волокну // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 60. С. 39–43.
4. Кобяков Р. С., Новожилов Р. Н., Писарев И. А. и др. Некоторые методы повышения точности компенсации фазовой нестабильности при передаче сигналов частоты и времени // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 58. С. 36–40.

Научно-технические проблемы развития системы ГЛОНАСС в современных условиях

С. Н. Карутин

АО «Институт навигации», г. Москва, Россия

В докладе рассматриваются глобальные вызовы, стоящие перед системой навигационно-временного обеспечения (НВО) Российской Федерации, текущее состояние системы ГЛОНАСС, являющейся основой системы НВО Российской Федерации, а также перспективы развития ее основных частей в целях обеспечения национальной независимости в области НВО.

Представлен анализ путей повышения помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителя, в том числе решающей задачи высокоточных навигационных определений в условиях воздействия маскирующих и имитационных помех.

От первых мазеров к оптическим стандартам частоты: 100-летие со дня рождения Н. Г. Басова

Н. Н. Колачевский

ФИАН, г. Москва, Россия

Пионерские идеи Н. Г. Басова, чей столетний юбилей торжественно отмечался в 2022 г., заложили фундамент для целого ряда современных направлений в области квантовой электроники и лазерной физики: тонкие лазерные эксперименты, нацеленные на проверку основополагающих законов физики, лазерный поджиг термоядерных мишеней, высокоскоростные линии передачи данных и навигационные системы, лазерная сварка и обработка материалов.

В докладе будет представлено развитие и сегодняшнее состояние «первенца» из этой череды научных побед — водородного мазера. Н-мазеры постоянно совершенствуются и используются в решении широчайшего спектра задач: метрологии времени и частоты, спутниковой навигации и космической радиоастрономии. Россия является признанным мировым лидером в области создания мазерной техники, что является блестящим примером успешной реализации идей Н. Г. Басова.

Естественным развитием направления является разработка и создание оптических стандартов частоты, что было отмечено в основополагающей работе [1], авторами был обозначен путь развития направления на десятилетия вперед. Повышение частоты несущей из диапазона 1010 Гц (микроволновый диапазон) в область 1014–1015 Гц (оптический диапазон) обеспечивает соответствующий рост добротности атомных резонансов, повышение точности и стабильности стандартов. Мы обсудим текущие перспективы развития оптических стандартов частоты, области применения а также некоторые сегодняшние работы, которые ведутся в ФИАНе для обеспечения задач координатно-временного обеспечения.

Литература

1. Басов Н. Г., Летохов В. С. Оптические стандарты частоты // УФН. 1968. Т. 96, № 4. С. 585–631.

Высокочастотные Nd:YAG лазеры для спутниковых измерительных систем нового поколения

А. Ф. Корнев[1], В. В. Коваль[1], Ю. В. Кацев[1], А. В. Едигарев[1,2], Д. О. Оборотов[1], И. Г. Кучма[1]

[1]ООО «Лазеры и оптические системы», г. Санкт-Петербург, Россия
[2]Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время в прецизионной спутниковой дальнометрии широко применяются Nd:YAG лазеры, обладающие длительностью импульса < 50 пс, частотой следования импульсов от ~100 Гц до ~1 кГц и энергией в импульсе ~2.5 мДж. Ранее нами был разработан пикосекундный Nd:YAG лазер, работающий на частоте следования импульсов 300 Гц и хорошо себя зарекомендовавший при использовании в радиоастрономической обсерватории «Светлое» в составе КОС Сажень-ТМ [1]. Однако стремительный рост требований к точности и информационной ёмкости спутниковых измерительных систем нового поколения предопределяет переход на более высокую частоту следования импульсов 10 кГц и более [2].

В настоящей работе представлены результаты разработки высокочастотного Nd:YAG лазера, построенного по схеме «задающий генератор — многокаскадный усилитель мощности — генератор второй гармоники». Задающий генератор представляет собой лазер с торцевой диодной накачкой и активной модуляцией добротности, обеспечивающий генерацию импульсов длительностью ~20 нс, с частотой следования импульсов 10 кГц и энергией в импульсе ~1 мДж. Многокаскадный усилитель мощности представляет собой 8 последовательно расположенных каскадов усиления с непрерывной торцевой диодной накачкой. Элементная база многокаскадного усилителя аналогична используемой в ранее разработанном пикосекундном лазере. В качестве генератора второй гармоники использовался кристалл LBO 5×5×25 мм с некритичным фазовым синхронизмом I типа ($\theta = 90°$, $\varphi = 0°$).

Максимальная полученная средняя мощность на выходе лазера на длине волны 1064 нм составила ~330 Вт, а на длине воны 532 нм — 185 Вт, что соответствует энергии в импульсе 33 мДж и 18 мДж на частоте следования импульсов 10 кГц соответственно. Эффективность ГВГ составила ~56 %. Нестабильность средней мощности в течение 10 мин работы на длине волны 532 нм составила менее 0.4 % СКО. Расходимость излучения на выходе лазера на длине волны 532 нм составила 0.7 мрад по уровню 0.5 средней мощности при диаметре пучка 1.8 мм, что соответствует ~2.5×DL.

Стоит отметить, что в данном лазере возможно использование в качестве задающего генератора пикосекундного лазера с длительностью импульсов ~35 пс, описанного в работе [1].

Представленный лазер имеет гибкую архитектуру, которая позволяет получать высокочастотное лазерное излучение с качеством, близким к дифракционно-

му, и осуществлять масштабирование уровня средней мощности за счет увеличения и уменьшения количества числа усилительных каскадов, что несомненно будет востребовано в спутниковых измерительных системах нового поколения.

Литература

1. Корнев А. Ф., Кацев Ю. В., Коваль В. В. и др. Пикосекундный Nd:YAG-лазер с широким рабочим температурным диапазоном (–40… +40° С) // Труды ИПА РАН. 2021. № 57. С. 16–22.
2. Hampf D., Schafer E., Sproll F., et al. Satellite laser ranging at 100 kHz pulse repetition rate // CEAS Space Journal. 2019. Т. 11. № 4. P. 363–370.

Перегрузка и охлаждение ионов Yb^+ в комбинированной квадрупольно-мультипольной ловушке для реализации микроволнового стандарта частоты

А. Е. Корольков[1,3], И. Журавлев[1,2], К. Павленко[4], И. А. Семериков[1,3], И. В. Заливако[1,3], А. С Борисенко[1,3], М. Д. Аксенов[1,3], П. Л. Сидоров[1], Н. В. Семенин[1], В. Н. Смирнов[1,2,3], К. Ю. Хабарова[1], Н. Н. Колачевский[1,3]

[1]ФИАН, г. Москва, Россия
[2]МФТИ, г. Долгопрудный, Россия
[3]РКЦ, г. Москва, Россия
[4]АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

Использование мультипольных ловушек в ионных стандартах частоты позволяет существенно снизить влияние эффекта Доплера второго порядка на характеристики стандарта. В данной работе мы численными методами проводим сравнение плотности распределения ионов в квадрупольной и мультипольной ловушке, а также сравнение сдвига частоты из-за эффекта Доплера второго порядка от микродвижений ионов в данных ловушках. Полученные результаты показывают преимущества мультипольных ловушек. Также мы демонстрируем экспериментальную реализацию комбинированной квадрупольно-мультипольной ловушки с возможностью перегрузки ионов между ними.

Линейные ловушки Паули часто используются для захвата заряженных частиц и проведения экспериментов в области спектроскопии и квантовой логики. Удержание заряженных частиц с зарядом ^+e и массой m в таких ловушках, имеющих $2k$ электродов, описывается с помощью следующего псевдопотенциала в радиальном направлении вблизи оси ловушки [1]:

$$\psi(r) = \frac{k^2}{4}\frac{e^2}{m\Omega^2}\frac{V_0^2}{r_0^2}\,\hat{r}^{\,2k-2}, \hat{r} = \frac{r}{r_0},$$

где V_0 — амплитуда переменного напряжения на электродах ловушки,
Ω — его угловая частота,
r_0 — внутренний радиус ловушки.

В то же время концентрация ионов в таком потенциале описывается распределением Больцмана:

$$n(r) = n(0)exp\left\{\frac{-\psi(r) - e\varphi(r)}{k_B T}\right\},$$

где k_B — постоянная Больцмана.

С учетом уравнения Пуассона, связывающего концентрацию ионов с потенциалом $\varphi(r)$, можно получить, что концентрация ионов в ловушке удовлетворяет следующему уравнению [2]:

$$n''(r) + \frac{n'(r)}{r} - \frac{n'(r)^2}{n(r)} - \frac{n(r)^2}{n_0 \lambda_D} = -k^2(k-1)^2 \frac{n(r)}{4\lambda_D^2} r^{2k-4}.$$

Мы численно решили это уравнение для квадрупольной и мультипольной ловушки с 16 электродами и оценили вклад ионов на разных расстояниях от оси ловушки в сдвиг частоты из-за эффекта Доплера второго порядка (рис. 1 а), а также зависимость этого сдвига от числа ионов в облаке (рис. 1 б).

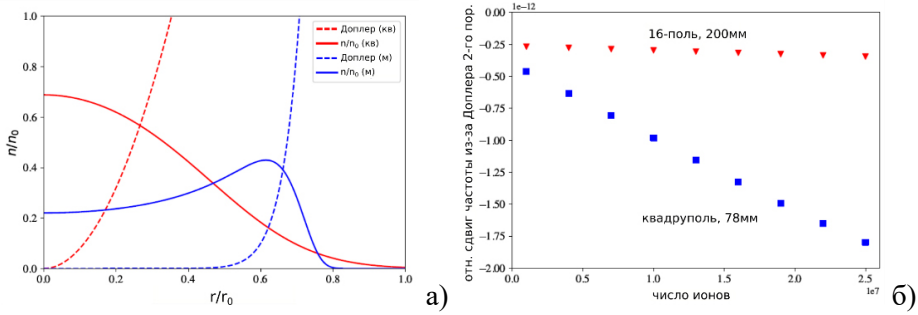


Рис. 1 Сдвиг частоты из-за эффекта Доплера второго порядка:
а) вклад ионов на разных расстояниях от оси ловушки в сдвиг частоты,
б) зависимость сдвига частоты от числа ионов в облаке

В нашей экспериментальной реализации мы используем комбинированную ловушку, состоящую из квадрупольной секции с хорошим оптическим доступом и мультипольной секции с 16 электродами, использующую описанные выше преимущества. Такую ловушку предполагается использовать для создания микроволнового стандарта частоты на ионах, где подготовка и считывание состояния ионов происходит в квадрупольной секции, а взаимодействие ионов с микроволновым полем — в мультипольной секции, что позволит снизить влияние эффекта Доплера второго порядка как основного вклада в систематическую погрешность определения частоты перехода.

Литература

1. Gerlich D. Inhomogeneous RF fields: a versatile tool for the study of processes with slow ions // Advances in chemical physics. 1992. Vol. 82. P. 1–176.
2. Prestage J. D., Tjoelker R. L., Maleki L. Higher pole linear traps for atomic clock applications // Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium. 1999. Vol. 1. P. 121–124.

Принципы работы и оценка некоторых характеристик функционального дополнения системы ГЛОНАСС

И. В. Котов, А. А. Аржанников, В. Д. Глотов

ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», г. Королёв, Россия

В целях контроля целостности ГНСС и повышения точности местоопределения используются широкозонные дифференциальные системы (англ. SBAS — Satellite Based Augmentation System). Основным потребителем SBAS систем являются воздушные суда гражданской авиации. В число SBAS систем входят: Система Дифференциальной Коррекции и Мониторинга (СДКМ, Россия), WAAS (США), EGNOS (Евросоюз), BDSBAS (Китай), GAGAN (Индия), MSAS (Япония), SouthPan (Австралия), ANGA (Африка), KAAS (Южная Корея). Для большинства SBAS систем основной обслуживаемой ГНСС является GPS (31 КА). СДКМ является отечественной разработкой, её отличием от других систем подобного типа является выбор дополняемой ГНСС. Для СДКМ основной дополняемой системой является ГЛОНАСС (24 КА), а сопутствующей – GPS (27 КА) [1, 2].

В ИАЦ КВНО в режиме реального времени передается поток измерений сети СДКМ (54 станции), а также поток целевой информации СДКМ в формате SISNeT, на основе которого в ИАЦ КВНО формируются на ежесуточной основе файлы ЭВИ с учетом поправок СДКМ и ионосферные карты СДКМ в файлах стандартных ГНСС-форматов (SP3 и IONEX). При использовании сформированных файлов SP3 и IONEX был проведен расчет оценки некоторых характеристик СДКМ (PDOP, HDOP, число видимых КА), а также оценка точности ионосферы СДКМ относительно глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО [3, 4], четырех глобальных карт ионосферы центров международной службы анализа IGS (CODE, ESOC, JPL, WHU), а также относительно оперативной модели Клобучара из кадра GPS. Расчет проводился за 17.11.2022 по всей зоне действия СДКМ.

Результаты расчетов показали высокий уровень доступности навигации СДКМ в основном двухсистемном режиме ГЛОНАСС+GPS (PDOP=1.2, HDOP=0.6, всего 51 КА в кадре СДКМ, в среднем 28 КА в кадре СДКМ, среднее число видимых КА 16.9), а также в односистемном режиме ГЛОНАСС (PDOP = 1.9, HDOP = 1.0, всего 24 КА в кадре СДКМ, в среднем 13 КА в кадре СДКМ, среднее число видимых КА 8.3). При этом из-за ограничений стандарта SBAS (27 из 31 КА) [1, 2] в односистемном режиме GPS уровень доступности СДКМ уступает стандартному (PDOP = 2.1, HDOP = 1.1, всего 27 КА в кадре СДКМ, среднее число видимых КА 8.5).

Результаты оценки характеристик ионосферы СДКМ показали, что точность ионосферы СДКМ по всей зоне обслуживания на суточном интервале 17.11.2022 сравнима с точностью глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО и других центров анализа IGS и существенно лучше оперативной модели Клобучара из кадра GPS. СКО ионосферной карты СДКМ относительно карты ИАЦ КВНО составила 2.3 TECu (0.37 м) (1 ед. TECu = 10^{16} электронов / кв. м, что соответствует задерж-

ке в ~16 см для L1). Взаимные СКО карт ИАЦ КВНО и четырех центров анализа IGS составили от 2.2 до 3.1 TECu (от 0.35 м до 0.5 м) по всей зоне обслуживания СДКМ. Для сравнения, СКО ионосферной модели Клобучара из кадра GPS составило ~9 TECu (1.44 м)

Работы по оценке характеристик СДКМ и других SBAS проводятся в рамках плановых работ ИАЦ КВНО, Заказчиком которых является Госкорпорация «Роскосмос». В дальнейшие планы ИАЦ КВНО входит оценка точностных характеристик СДКМ и других SBAS систем по всей зоне обслуживания.

Литература

1. Интерфейсный контрольный документ. Радиосигналы и состав цифровой информации функционального дополнения системы ГЛОНАСС Системы Дифференциальной Коррекции и Мониторинга. Редакция 2.0, 2020 г.
2. Сайт «СДКМ» [Электронный ресурс]. URL: https://www.sdcm.ru/ (дата обращения: 01.02.2023).
3. Аржанников А. А., Глотов В. Д., Митрикас В. В. Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 60. С. 3–11.
4. Раздел «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО АО ЦНИИмаш [Электронный ресурс]. URL: https://www.glonass-iac.ru/iono/ (дата обращения: 01.02.2023).

Устройство стабилизации частоты подстраиваемого генератора

Е. В. Крохина, О. В. Колосова, В. Л. Налетов, Л. А. Лисицын

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время при разработке радиотехнических устройств и комплексов космического назначения важной задачей является обеспечение требуемого уровня стабильности частоты гармонического сигнала. Особенно актуальной эта задача является для бортовых устройств синхронизации времени КА навигационной системы ГЛОНАСС. Варианты решения данной задачи представлены в работах исследователей навигационных систем [1]. Однако многие из них представляют собой классическую систему фазовой автоподстройки частоты, в которой стабилизация осуществляется с помощью сигнала-поправки. Обеспечение требований по стабильности сигнала представляет собой сложную задачу, поскольку уровень стабильности частоты квантовых генераторов — величина непрогнозируемая и случайная, значение которой зависит от многих факторов. Поэтому при разработке радиотехнических устройств необходимо учитывать физические свойства всех источников гармонических синусоидальных сигналов системы, т. е. возможность пропадания и возникновения флуктуаций сигнала.

В представленной работе устройство стабилизации частоты подстраиваемого генератора, содержащее подстраиваемый генератор, опорный генератор и фазовый детектор, отличается тем, что введен блок обработки сигнала управления, включающий в свой алгоритм нейро-нечеткую сеть. Вход управления подстраиваемого генератора соединен с выходом блока обработки сигнала управления.

Входами нейро-нечеткой сети являются амплитуда, фаза и частота разностного сигнала. Особенность такой системы состоит в обучении нейро-нечеткой сети реальными данными, отображающими как стабильное состояние генераторов, так и возможные отклонения. Модель сети устроена таким образом, что после обучения она не только выявляет скачок, но и парирует его, выдавая на выход код подстройки генератора. Блок формирования сигнала управления преобразовывает полученные данные с выхода нейро-нечеткой сети в требуемый формат и передаёт на вход подстраиваемого генератора.

Проверка работоспособности схемы была проведена посредством моделирования с помощью пакета прикладных программ Matlab — FuzzyLogicToolbox [2], предназначенного для проектирования и исследования систем нечеткой логики. Пакет FuzzyLogicToolbox поддерживает все фазы разработки нечетких систем, включая синтез, исследование, проектирование, моделирование и внедрение в режиме реального времени. Функции пакета реализуют большинство временных нечетких технологий, включая нечеткий логический вывод, нечеткую кластеризацию и адаптивную нейро-нечеткую настройку (ANFIS). Для обучения сети были выбраны экспериментально полученные данные стабильных сигналов на временном отрезке 60 дней. Заключительный шаг проверки алгоритма — загрузка данных обучения и тестирования в ANFIS-редактор среды Matlab для создания

нейро-нечеткой сети и её тестирования. После подбора оптимального количества итераций обучения сгенерированная сеть, парируя флуктуации входного сигнала, вывела сигнал управления, который входит в рамки допустимых значений.

Результаты моделирования показывают, что заявляемый метод осуществим и обеспечивает достижение технического результата, заключающегося в создании устройства стабилизации частоты подстраиваемого генератора, и оно характеризуется стабильностью и точностью формирующегося выходного сигнала подстраиваемого генератора в условиях возникновения частотных флуктуаций и аномалий различного рода.

Литература

1. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. М.: Техносфера, 2002.
2. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия — Телеком, 2007
3. Шахгильдян В. В., Ляховкин А. А. Системы фазовой автоподстройки частоты. М.: Связь, 1972.

Повышение точности аппроксимации движения земного полюса при изменении параметров чандлеровского и годичного колебаний

С. С. Крылов, В. В. Перепёлкин

МАИ, г. Москва, Россия

Ряд прикладных задач астрометрии и высокоточной навигации КА требует знаний ориентации Земли и параметров её вращения, которые необходимо прогнозировать [1]. Одними из наиболее трудно прогнозируемых параметров являются координаты земного полюса, т. к. на его движение влияют нестационарные возмущения различной физической природы. Колебательный процесс земного полюса не является полностью регулярным. Поэтому для прогноза его положения часто предлагается использовать численные методы, например, основанные на регрессионных моделях.

Анализ данных наблюдений и измерений Международной службы вращения Земли (МСВЗ) позволяет обнаружить явление смены колебательного режима полюса. Оно связано с изменением средней частоты его движения вокруг полюса инерции [2].

В данной работе рассмотрены кинематические и динамические эффекты в движении земного полюса, вызванные изменением соотношения амплитуд чандлеровской и годичной гармоник, когда колебательный процесс полюса переходит от одного режима с ведущей чандлеровской компонентой к режиму с более значимой годичной гармоникой, и наоборот. Описаны кинематические свойства движения полюса в окрестности изменения средней частоты его движения. Показано, что эффект смены колебательного режима заключается в согласованном изменении средней частоты движения полюса вокруг среднего его положения и в изменении чандлеровской частоты.

Получена модификация малопараметрической модели движения полюса, позволяющая распространить применение двухчастотной модели на длительный временной интервал и улучшить точность аппроксимации при сохранении числа оцениваемых параметров.

Литература

1. Марков Ю. Г., Михайлов М. В., Ларьков И. И. и др. Фундаментальные составляющие параметров вращения Земли в формировании высокоточной спутниковой навигации // Космические исследования. 2015. Т. 53, № 2. С. 152–164.

2. Крылов С. С., Перепёлкин В. В., Сое Вэй Ян Краткосрочный прогноз движения земного полюса с учетом лунных возмущений // Известия РАН МТТ. 2020. № 6. С. 157–164.

Компактные транспортируемые ультрастабильные лазерные системы для квантовых вычислений, метрологии и сенсорики

Д. С. Крючков[1], К. С. Кудеяров[1], Г. А. Вишнякова[1,2], Н. О. Жаднов[1], К. Ю. Хабарова[1], Н. Н. Колачевский[1,3]

[1]ФИАН, г. Москва, Россия
[2]МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия
[3]РКЦ (ООО «МЦКТ»), г. Москва, Россия

Активное развитие квантовой метрологии за последние годы привело к созданию большого количества оптических часов, обладающих неточностью и нестабильностью менее единицы шестнадцатого знака [1, 2]. Всё больший акцент делается на создание транспортируемых [3] и бортовых реперов и стандартов частоты, основанных на прецизионной спектроскопии ансамблей ультрахолодных атомов и одиночных ионов в ловушках. Вместе с этим растет актуальность характеризации новых реперов частоты и создания сети оптических часов, что имеет большую важность для формирования и поддержания глобальных шкал времени [4], в частности — UTC(SU), модернизации наземного сектора ГЛОНАСС, метрологического обеспечения перспективных миссий в дальнем космосе и интерферометрии со сверхдлинной базой. К тому же, методами прецизионной спектроскопии наиболее эффективно решаются многие другие фундаментальные и прикладные задачи: релятивистской геодезии [5], тестов фундаментальных теорий [6], включающих в себя определение дрейфа фундаментальных констант, поиск полей темной материи.

Во всех этих задачах ультрастабильная лазерная система является ключевым элементом: в оптических часах она обеспечивает спектроскопию метрологического перехода; в процессах интерферометрии, когерентной рефлектометрии и удаленного сличения оптических часов выполняет роль ультрастабильного локального осциллятора на оптической частоте. Причем для транспортируемых и бортовых применений необходимо создание как метрологических, так и «простых» компактных и виброустойчивых компоновок.

В работе рассматривается создание и характеризация компактного резонатора из стекла ULE (Ultra Low Expansion) с высокоотражающими зеркалами для длины волны 1550 нм собственного производства. Описаны особенности конструкции резонатора и вакуумной камеры, измерены его ключевые характеристики, исследованы характеристики лазерной системы, стабилизированной по этому резонатору: ширина спектра составила 50 Гц на времени 50 мс, относительная нестабильность частоты излучения — $5\cdot10^{-14}$ на времени усреднения 1 с. Подобные резонаторы могут быть применяться для создания компактных лазерных систем с целью использования в широком круге задач, не требующих рекордных показателей точности и стабильности, таких как прецизионная интерферометрия, когерентная рефлектометрия и передача ультрастабильных сигналов частоты.

Ультрастабильные лазерные системы являются важным элементом интерферометрических систем для спутниковой гравиметрии, позволяющей строить глобальные карты гравитационного потенциала. В рамках работ по подготовке к созданию проекта российской гравиметрической миссии разработан и создан макет лазерного интерферометра в транспондерной схеме, включающий компактную лазерную систему и позволяющий измерять расстояние детектированием фазы гетеродинного сигнала. Продемонстрировано прецизионное интерферометрическое измерение линейных сдвигов в диапазоне 17 мкм с погрешностью 320 пм на времени усреднения 1 с, 1.8 нм — 100 с.

Также в работе обсуждаются подходы к разработке и созданию метрологической стабилизированной лазерной системы с повышенной вибрационной устойчивостью для транспортируемых оптических часов. Рассматривается дизайн и изготовление опорного резонатора, системы подвеса и общей компоновки лазерной системы для эксплуатации вне лабораторных условий.

Литература

1. Oelker E., Hutson R., Kennedy C., et al. Demonstration of 4.8 × 10−17 stability at 1 s for two independent optical clocks // Nature Photonics. 2019. Т. 13. №. 10. С. 714–719.
2. Golovizin A., Fedorova E., Tregubov D., et al. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift //Nature communications. 2019. Т. 10. №. 1. С. 1724.
3. Khabarova K., Kryuvhkov D., Borisenko A., et al. Toward a New Generation of Compact Transportable Yb+ Optical Clocks // Symmetry. 2022. Т. 14. №. 10. С. 2213.
4. Riehle F. Optical clock networks // Nature Photonics. 2017. Т. 11. №. 1. С. 25–31.
5. Kornfeld R. P., Arnold B. W., Gross M. A., et al. GRACE-FO: the gravity recovery and climate experiment follow-on mission // Journal of spacecraft and rockets. 2019. Т. 56. №. 3. С. 931–951.
6. Safronova M. S., Budker D., DeMille D., et al. Search for new physics with atoms and molecules // Reviews of Modern Physics. 2018. Т. 90. №. 2. С. 025008.

Компенсация систематической составляющей погрешности автоматизированного астрономического универсала, обусловленной сбоями синхронизации данных

Н. В. Кузьмина, С. М. Тарасов, В. В. Цодокова

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург, Россия

В современных астрономических приборах, таких как автоматизированный астрономический универсал (ААУ) [1], определение значений всемирного координированного времени (UTC), а также формирование сигналов синхронизации (далее — сигналы PPS) осуществляются посредством спутниковой навигационной аппаратуры. По сигналам PPS телевизионной аппаратурой производится регистрация кадров с изображениями звезд, при этом с каждым сигналом PPS передаются значения времени UTC.

Однако, в результате сбоев в работе аппаратуры (телевизионной, спутниковой) или нарушения логики работы программного обеспечения ААУ может возникнуть ошибочная временная привязка зарегистрированного кадра, что приведет к возникновению систематической составляющей погрешности синхронизации данных астрономических наблюдений со шкалой времени UTC $\Delta T = 1$ с. Случайная составляющая этой погрешности в настоящей работе не учитывается, так как в ААУ она пренебрежимо мала (5 мкс) [2].

Погрешность синхронизации данных ААУ со шкалой времени UTC, в первую очередь, повлияет на точность определения Гринвичского звездного времени θ, которое будет получено с погрешностью $\Delta\theta = \omega\Delta T$, где $\omega \approx 15''/с$ — угловая скорость вращения Земли. Это, в свою очередь, приведет к появлению систематических составляющих погрешностей определения астрономических долгот и азимутов [2, 3], не позволяющих обеспечить требуемые точностные характеристики ААУ.

В работе представлен алгоритм обнаружения и компенсации погрешностей синхронизации данных ААУ со шкалой всемирного времени UTC, основанный на использовании результатов астрономических наблюдений в различных положениях визирной оси ААУ, контролируемых по показаниям датчиков углов, установленных в ААУ.

Литература

1. Тарасов С. М. Исследование влияния инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала в задаче определения азимута наземного ориентира // Гироскопия и навигация. 2021. Том 29, № 2 (113). С. 97–109.

2. Цодокова В. В., Гайворонский С. В., Кузьмина Н. В. Исследование влияния синхронизации данных автоматизированного зенитного телескопа на точность определения астрономических координат // Седьмая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017), 17–21 апреля 2017 г. Тезисы докладов. СПб.: ИПА РАН, 2017. С. 92–93.

3. Брумберг В. А., Глебова Н. И., Лукашова М. В. и др. Расширенное объяснение к «Астрономическому ежегоднику» // Труды ИПА РАН. 2004. Вып. 10. 488 с.

Влияние гравитационного воздействия Луны на колебания полюса Земли

С. А. Кумакшев[1], В. В. Перепелкин[2]

[1]ИПМех РАН, г. Москва, Россия
[2]МАИ, г. Москва, Россия

Движение полюса Земли имеет сложную траекторию и не определяется полностью двумя основными процессами: периодическим с периодом год и квазипериодическим с нерегулярной чандлеровской частотой [1]. Частотный анализ колебаний полюса показывает наличие многочисленных колебательных составляющих с довольно небольшими амплитудами. Анализируя источники этих воздействий, надо обратить внимание на то, что Земля движется в составе Солнечной системы. Устойчивость этой системы обеспечивается гравитационными силами. Соответственно на Землю действуют многочисленные внешние гравитационные силы и моменты. Луна, как ближайший источник таких воздействий, движется по сложной траектории вокруг Земли. Тем не менее, из траектории Луны можно выделить основные составляющие этого движения, определяемые кеплеровскими элементами орбиты. Очевидно, что гравитационное воздействие Луны на колебания полюса Земли будет определяться в основном именно этими составляющими [2]. Для подтверждения работы этого гравитационного механизма необходимо выделить из траектории полюса колебания с такими периодами и фазами, которые были бы близки (совпадали) с характеристиками основных составляющих лунной орбиты. Исследование осложняется тем, что лунная орбита имеет квазипериодические параметры. В проведенном исследовании использовался ряд C01 данных наблюдений и измерений Международной службы вращения Земли. Обработка наблюдений осуществлялась на 122-летнем интервале, начиная с 1900 г. и до 2023 г. Из основных составляющих траектории Луны, определяющих пространственное движение, были выбраны обращение узла лунной орбиты и обращение перигея.

Ранее было показано, что долгопериодические лунные гармоники присутствуют в вариациях амплитуд чандлеровской и годичной составляющих [3, 4]. В данной работе с помощью численной обработки данных наблюдений C01 выделены квазистационарные гармоники с частотой обращения узла лунной орбиты (а также с удвоенной частотой) и с частотой обращения перигея.

Найденные гармоники согласованы по фазе с положениями узла лунной орбиты и ее перигея. Это подтверждает наличие механизма гравитационного влияния Луны на колебания полюса Земли. Амплитуды этих гармоник показывают масштаб гравитационного воздействия со стороны Луны.

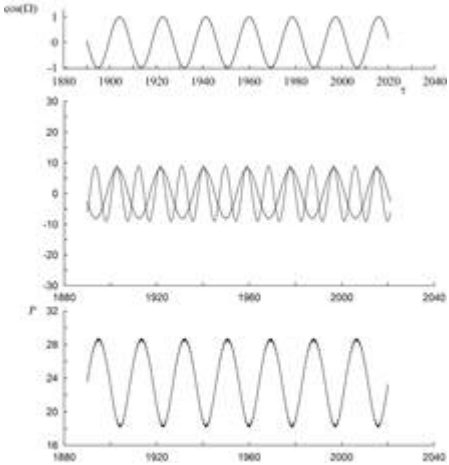


Рис. 1. Сверху вниз: гармоника долготы восходящего узла Луны; выделенные гармоники с частотой обращения узла и удвоенная; изменение угла наклона плоскости лунной орбиты к экватору

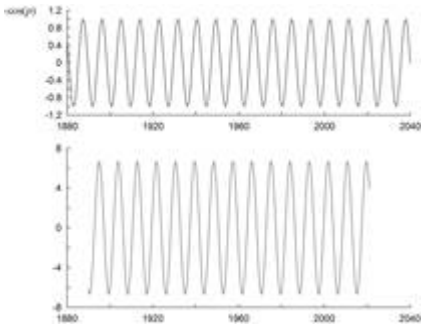


Рис. 2. Сверху вниз: гармоника долготы перигея Луны; выделена гармоника с частотой обращения перигея

Литература

1. Akulenko L. D., Kumakshev S. A., Markov Yu. G. Model of the gravitational-tidal mechanism of exciting oscillations of the Earth's pole // Doklady Physics. 2005. Vol. 50, № 2. P. 106–111.
2. Kumakshev S. A. Gravitational-tidal model of oscillations of earth's poles // Mechanics of Solids. 2018. Vol. 53, № 2. P. 159–163.
3. Perepelkin V. V., Rykhlova L. V., Filippova A. S. Long-perod variations in oscillations of the Earth's pole due to Lunar perturbations // Astronomy Reports. 2019. Vol. 63, № 3. P. 238–247.
4. Perepelkin V. V., Rykhlova L. V., Soe W. Y. In-phase variations in the parameters of the Earth's pole motion and the Lunar orbit precession // Astronomy Reports. 2022. Vol. 66, № 1. P. 80–91.

Синтез полосы частот в Ka-диапазоне при обработке РСДБ-наблюдений

А. С. Кумейко, И. Ф. Суркис

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Точность определения групповой задержки является одной из главных характеристик радиоинтерферометра. Для ее повышения в современных системах постпроцессорной корреляционной обработки групповая задержка определяется в синтезированной полосе.

С 2015 г. программный коррелятор RASFX [1] используется для обработки широкополосных РСДБ-наблюдений на радиотелескопах РТ-13 в S (13 см), X (3.5 см) и Ka (1 см) диапазонах. Хотя в Ka-диапазоне регистрируется до 3 частотных каналов с шириной полосы пропускания 512 МГц, групповые задержки вычисляются отдельно в каждом канале.

Для улучшения точности определения групповых задержек реализован синтез полосы частот по трем каналам Ka-диапазона с получением синтезированной полосы шириной 5.1 ГГц. Проведена экспериментальная обработка часовой сессии наблюдений. Фазовая калибровка частотных каналов выполнена по опорному скану наблюдений [2].

В работе приведены результаты обработки, описан метод фазовой калибровки. Показаны первые результаты в виде корреляционных откликов, близких к расчетным моделям, также получены задержки и отношения сигнал-шум.

Литература

1. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 6. С. 1–9.
2. Kondo T., Takefuji K. An algorithm of wideband bandwidth synthesis for geodetic VLBI // Radio Sci. 2016. 51. Doi:10.1002/2016RS006070.

Определение углов нутации по часовым РСДБ-наблюдениям

С. Л. Курдубов[1], Р. М. Урунова[1,2]

[1]ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Принято, что часовые РСДБ-наблюдения используются для регулярных вычислений поправок к Всемирному времени ΔUT1 [1]. В данной работе рассматривается возможность получения поправок к углам нутации или координатам небесного полюса на основании этих же часовых сессий. Вычисления проводятся с помощью программного пакета QUASAR [2], который позволяет обрабатывать объединенные часовые сессии по двум и более дням.

Результаты в виде полученного ряда параметров вращения Земли сравниваются с комбинированными рядами международного центра службы вращения Земли, а также с результатами глобального уравнивания, полученными ИПА РАН [3]. При этом точность поправок зависит от количества объединенных сессий. Данный метод позволит получить независимый ряд координат небесного полюса, который в дальнейшем может быть использован для изучения природы свободной нутации ядра Земли.

Литература

1. Куделькин А. А., Курдубов С. Л. Оптимизация планирования часовых РСДБ-сессий для определения поправок Всемирного времени // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 51. С. 73–81.
2. Губанов В. С., Курдубов С. Л., Суркис И. Ф. Новая версия пакета QUASAR для обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. 2007. Вып. 16. С. 61–83.
3. Курдубов С. Л., Губанов В. С. Глобальное уравнивание РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 244–246.

Совершенствование нормативно-правовой и нормативно-технической базы фундаментального и метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС

Е. Р. Лазаренко[1], С. И. Донченко[2], О. В. Денисенко[2]

[1]Росстандарт, г. Москва, Россия
[2]ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) обеспечивает выполнение ключевых индикаторов и показателей реализации мероприятий по поддержанию и развитию системы ГЛОНАСС. Эталонная база ГСВЧ составляет основу комплекса средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС и формирует ее опорное время — национальную шкалу времени UTC(SU). Комплекс средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС решает следующие основные задачи:

– согласование UTC(SU), на основе которой строится системная шкала времени ГЛОНАСС, со шкалой всемирного координированного времени UTC;

– согласование координат объектов на поверхности Земли с координатами в международной земной системе координат;

– определение параметров вращения Земли (координат полюса и всемирного времени).

В соответствии с п. 15 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 апреля 2008 г. № 323 на Росстандарт, в ведении которого находится ГСВЧ, возложены полномочия по созданию и развитию следующих систем метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС, функциональных дополнений и аппаратуры спутниковой навигации совместно с Государственной корпорацией по космической деятельности «Роскосмос» и Министерством обороны РФ, а также по государственному метрологическому надзору за метрологическим обеспечением системы ГЛОНАСС, функциональных дополнений и аппаратуры спутниковой навигации, включая организацию и проведение испытаний аппаратуры спутниковой навигации, отнесенной к средствам измерений.

Основой для реализации Росстандартом данных полномочий является Федеральный закон от 26 июня 2008 г. №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений». Выполнение требований данного закона обеспечивается широким кругом подзаконных актов и нормативно-технических документов, включающих в том числе приказы Росстандарта (например, об утверждении Государственных поверочных схем), а также национальные и межгосударственные стандарты, в первую очередь относящиеся к системе обеспечения единства измерений.

Наиболее важными государственными поверочными схемами для метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС являются Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты (утверждена приказом Росстандарта от 26 сентября 2022 г. № 2360) и Государственная поверочная схе-

ма для координатно-временных измерений (утверждена приказом Росстандарта от 29 декабря 2018 г. № 2831).

В рамках ФЦП «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» была разработана Программа совершенствования нормативно-правовой и нормативно-технической базы навигационной деятельности до 2030 г., согласованная 13 федеральными органами исполнительной власти и генеральным конструктором системы ГЛОНАСС, включавшая 454 документа нормативно-правового и нормативно-технического характера, которые затрагивают различные области и сферы применения навигационных технологий, разработан проект стратегии развития системы нормативно-правового и нормативно-технического регулирования в сфере навигационной деятельности до 2030 г., а также проекты ряда нормативно-правовых и нормативно-технических актов, позволяющих обеспечить возможность использования существующих и перспективных услуг системы ГЛОНАСС в интересах социально-экономического развития РФ с учетом мировых тенденций, предложения в Программу национальной стандартизации.

Однако на сегодняшний день работы по развитию системы нормативно-правового и нормативно-технического обеспечения навигационной деятельности в рамках федерального проекта «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» государственной программы РФ «Космическая деятельность России» не начаты, мероприятия по совершенствованию имеют фрагментарный характер.

Таким образом, совершенствование нормативно-правовой и нормативно-технической базы фундаментального и метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС является необходимым условием для достижения системой требуемого со стороны перспективных потребителей уровня точности и функциональности, а мероприятия по развитию нормативно-правовой и нормативно-технической базы являются неотъемлемой частью развития системы ГЛОНАСС.

Развитие Федеральной сети геодезических станций

А. Ю. Лапшин, В. А. Луповка, С. В. Староверов, Д. И. Дудников, А. Ф. Татаренков, А. С. Червяков, А. Г. Табунков , Е. С. Бекчанова, И. А. Сухарев-Крылов, Г. Э. Мельник, А. Г. Марин, А. А. Смирнова, И. А. Постоенко, Н. А. Бовшин, Т. Л. Сидорова-Бирюкова

ППК «Роскадастр», г. Москва, Россия

В рамках государственной программы «Национальная система пространственных данных» реализуется проект развития федеральной сети геодезических станций.

В период 2021–2022 гг. разработан и эксплуатируется аппаратно-программный комплекс (АПК ФСГС), который в автоматическом режиме осуществляет ежедневный сбор и обработку данных спутниковых наблюдений со станций IGS, ФАГС и дифференциальных геодезических станций (ДГС), включенных в состав ФСГС, с последующим общим уравниванием. Информация о ДГС, включенных в состав Федеральной сети, доступна как владельцам станций, так и зарегистрированным пользователям через интернет-портал https://fsgs.cgkipd.ru/.

В 2022–2023 гг. выполняются мероприятия по развитию АПК ФСГС. В частности, ресурсами АПК ФСГС стало возможным получать ежесуточные решения по уточнению эфемерид и поправок часов НИСЗ ГЛОНАСС и GPS, а также кумулятивное решение, содержащее оценки координат и параметров модели движения пунктов ФСГС, за весь период ГНСС-измерений.

Для осуществления метрологического обеспечения ФСГС в составе АПК ФСГС разработан инструмент, позволяющий автоматизировать процесс поверки спутниковой геодезической аппаратуры на пунктах сети и формирование протоколов поверки.

Более 2000 ДГС (22 сети) уже подключены к АПК ФСГС.

За период 2021–2022 гг. также созданы 45 новых пунктов ФАГС на территории РФ в соответствии с требованиями IGS к пунктам подобных классов. По состоянию на конец 2022 г. всего функционирует 99 пунктов ФАГС.

Концепция поэтапного развития структуры спутниковой навигационной системы для обеспечения перспективных требований к навигационно-информационному обеспечению

Н. В. Леонидов, Д. И. Марарескул, И. И. Шилко, Ю. Б. Волошко, О. В. Ружилова

АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Железногорск, Россия

На сегодняшний день учёные и инженеры подобрались к пределу возможностей модернизации спутниковых навигационных систем опираясь исключительно на орбитальные группировки с равномерным распределением на средних круговых орбитах [1, 2].

Современные средства моделирования и способы цифрового проектирования позволяют создавать несимметричные компоновки заполнения орбитальных группировок, достигая при этом лучших технических характеристик при меньших затратах на производство, чем при использовании классических схем размещения космических аппаратов и контура управления [3].

Литература

1. Лонг Я. Дополнение навигационной системы на основе низкоорбитальных спутников // Материалы 14-й встречи международного комитета по глобальным навигационным спутниковым системам. 2019. 26 с.
2. Хенкель П. Точное позиционирование точек для ГНСС следующего поколения // Материалы Европейской Навигационной Конференции (ENC 2020) / Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON) German Institute of Navigation. Дрезден, 2020. 11 с.
3. Леонидов Н., Волошко Ю., Выгонский Ю. Перспективные направления развития орбитальной группировки ГЛОНАСС с использованием CDMA — нового типа сигнала: материалы Европейской Навигационной Конференции (ENC 2020) / Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON) German Institute of Navigation. Дрезден, 2020. 11 с.

Автономная астронавигационная система «Навигатор»

М. В. Лукашова, М. Л. Свешников, Е. Ю. Парийская,
Д. А. Желдак, Г. А. Космодамианский, В. И. Скрипниченко

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Исключительно важным направлением развития морских астронавигационных эфемерид является создание программных систем (ПС) для решения задач судовождения [1]. В ИПА РАН на завершающем этапе разработки находится автономная астронавигационная программная система «Навигатор», предназначенная для этих целей.

Программная система «Навигатор» является кроссплатформенным приложением, разработанным на языке C++ в рамках объектно-ориентированной технологии проектирования и программирования на базе библиотеки Qt версии 5.11.0, что даёт возможность её использования на различных программных платформах, таких как LINUX, Windows, macOS и др.

ПС «Навигатор» предназначена для решения типовых задач морской астронавигации: определение места судна (ОМС) и поправки компаса (ОПК). Она состоит из двух составных частей: вычислительного программного модуля и графической интерактивной оболочки (Планетария). ПС «Навигатор» позволяет визуально с помощью Планетария оценить астронавигационную обстановку на заданный момент времени в заданном месте, в зависимости от навигационных условий выбрать решаемую задачу, самостоятельно подобрать светила для наблюдений или воспользоваться автоматически выбранными звёздами по критерию наиболее благоприятных для получения точных результатов наблюдений; а затем, после проведённых с борта судна секстаном наблюдений и ввода полученных значений в окно входных данных, получить ОМС или ОПК. ОМС основывается на измерениях высот светил и азимутов, а ОПК — на измерениях пеленгов навигационных светил. Общее количество решаемых задач — 10. Задачи отбирались с учётом требования необходимости провести наблюдения при любых погодных условиях и в любое время суток. С этой целью в программе используется не только каталог 356 ярких оптических звёзд, но и каталог 6180 звёзд ближнего ИК диапазона. Измерения производятся максимум для четырёх объектов при движении судна во время наблюдения.

Данные наблюдений каждого объекта усредняются с учётом параметров движения судна и выявлением грубых измерений по малой выборке. В ПС используются фундаментальные эфемериды Солнца, Луны и планет EPM2021 [2], полученные с помощью многоцелевого программного комплекса «Эфемеридные Расчёты в Астрономии» (ERA) [3], разработанного в ИПА РАН, значения параметров вращения Земли, публикуемые на сайте ИПА РАН. Рефракция учитывается по Пулковским таблицам 1985 г. или по алгоритму Международного астрономического союза (МАС). Редукция наблюдений производится в соответствии с рекомендациями МАС 2000-2012 гг.

Подбор светил для наблюдений осуществляется пользователем в интерактивном режиме с помощью графического интерфейса в окне «Планетарий», отобранные звезды отмечаются на планисфере, а их параметры отображаются в таблице отобранных звёзд.

Ввод выполненных наблюдений осуществляется с помощью интерактивного диалога, обеспечивающего редактирование и проверку введённых значений. Количество наблюдений для каждого объекта ограничено девятью.

Результат решения задачи выводится на экран и записывается в журнал; подробный протокол решения записывается в файл; для некоторых задач строится графическое решение с выводом на планшет.

Реализована возможность запуска тестовых задач и задач с вводом данных из файла. Предоставляется возможность выбора системных настроек и сохранения текущей конфигурации.

В ПС «Навигатор» разработан подробный раздел «Школа», представляющий из себя объяснение к МАЕ с интерактивными примерами вычисления эфемерид. В разделе реализованы все десять параграфов объяснения из МАЕ в формате HTML и все двадцать четыре примера с интерфейсом для ввода исходных данных. Руководство пользователя разработано в виде стандартной справочной системы Qt help.

ПС «Навигатор» следует считать актуальным направлением в развитии средств морской астронавигации.

Литература

1. Глебова Н. И., Лукашова М. В., Нецветаев И. Н. и др. Модернизация морских навигационных эфемерид // Труды конференции «Навигация, гидрография и океанография (НГО-2011)». 2011. С. 52–56.

2. Pitjeva E. V., Pavlov D. A., Aksim D. A., Kan M. O. Planetary and lunar ephemeris EPM2021 and its significance for Solar system research // Proceedings of the International Astronomical Union. Symposium S364. 2022. Vol. 15, P. 220–225.

3. Pavlov D. A., Skripcnichenko V. I. Rework of the ERA software system: ERA 8 // Proceedings of the Journées 2014 «Systèmes de Référence Spatio-Temporels». – Pulkovo observatory, 2015. – P. 243–246.

Квантовые футштоки и эффект Саньяка

Е. М. Мазурова[1], А. Н. Петров[1,2]

[1]ППК Роскадастр, Москва, Россия
[2]ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

Одна из проблем главной высотной основы России состоит в том, что вся высотная сеть опирается на один футшток — Кронштадтский, при этом территория страны вытянута по широте с Запада на Восток. Естественно, точность высотной сети увеличится на порядки, если высотная основа страны будет опираться на несколько футштоков, достаточно равномерно расположенных по территории страны. Один из подходов модернизации главной высотной основы страны — построение сети квантовых футштоков, оснащенных высокоточными стандартами частоты, синхронизированными либо с помощью оптоволоконных кабелей высокого качества, либо на основе спутниковых технологий.

Наиболее распространенным и наиболее развитым методом оптоволоконной связи на большие расстояния является двусторонняя оптическая передача. Для выполнения технических требований по качеству передачи времени и частоты необходимо учитывать все возмущающие воздействия, возникающие в процессе распространения светового сигнала по оптоволокну. Большинство этих эффектов имеют чисто классическое (ньютоновское) происхождение: они вызваны температурным дрейфом, изменением давления, механическими деформациями и т. д. Кроме них существуют релятивистские эффекты, которые сравнительно малы или исчезающе малы, однако часть из них нельзя игнорировать при точной синхронизации высокоточных стандартов частоты и протокола сравнения. В докладе представлены результаты исследований эффекта Саньяка, главного из релятивистских эффектов, возникающего при распространении сигнала в волоконно-оптических кабелях большой протяженности, расположенных на поверхности Земли, и обусловленного ее вращением.

Литература

1. Мазурова Е. М., Петров А. Н. Теоретические обоснования эффекта Саньяка // Геодезия и картография. 2022. № 10. С. 2–8. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-988-10-2-8.
2. Мазурова Е. М., Петров А. Н. Эффект Саньяка в оптоволоконной синхронизации высокочастотных стандартов частоты // Геодезия и картография. 2022. № 12. С. 12–21. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-988-12-12-21.
3. Малыкин Г. Б. Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 12. С. 1325–1349. DOI: 10.3367/UFNr.0170.200012c.1325.
4. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Reviews in Relativity. 2003. 6. P. 1–42. URL: http://www.livingreviews.org/lrr-2003-1 (дата обращения: 15.09.2022).
5. BrumbergV. A., Kopejkin S. M. Relativistic reference systems and motion of test bodies in the vicinity of the Earth // Il Nuovo Cimento B. 1989. 103(1). P. 63–98. DOI: 10.1007/BF02888894.

6. Ciufolini I., Pavlis E. C. A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense-Thirring effect // Nature. 2004. 431, pp. 958–960. DOI: 10.1038/nature03007.

7. Damour T., Soffel M., Xu C.-M. General-relativistic celestial mechanics. I. Method and definition of reference systems // Physical Review D. 199. 143. P. 3273–3307. DOI: 10.1103/PhysRevD.43.3273.

8. Damour T., Soffel M., Xu C.-M. General-relativistic celestial mechanics II. Translational equations of motion // Physical Review D. 1992. 45. P. 1017–1044. DOI: 10.1103/PhysRevD.45.1017.

9. Damour T., Soffel M., Xu C.-M. General-relativistic celestial mechanics III. Rotational equations of motion // Physical Review D. 1993. 47. P. 3124–3135. DOI: 10.1103/PhysRevD.47.3124.

10. Diaz J., Rodríguez-Gómez R., Ros E. White Rabbit: When every nanosecond counts // Xcell Journal. 2015. 91. P. 18–25.

11. Everitt C.W.F., Debra D. B., Parkinson B. W., et. al. Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity // Physical Review Letters. 2011. 106. P. 221101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.221101.

12. Gersl J., Delva P., Wolf P. Relativistic corrections for time and frequency transfer in optical fibres // Metrologia, 2015. 52 (4). P. 1–42. DOI: 10.1088/0026-1394/52/4/552.

13. Kopejkin S. M. Celestial coordinate reference systems in curved space-time. Celestial Mechanics. 1988. 44. P. 87–115. DOI: 10.1007/BF01230709.

14. Post E. J. Sagnac Effect // Reviews of Modern Physics. 1967. 39. P. 475–481. DOI: https://doi.org/10.1103/RevModPhys.39.475.

15. Rost M., Piester D., Yang W., Feldmann T., Wübbena T., Bauch A. Time transfer through optical fibres over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps // Metrologia. 2012. 49 (6). P. 772–778. DOI: 10.1088/0026-1394/49/6/772.

16. Sagnac G. L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme // Comptes rendus de l'Académie des Sciences. 1913. 157. P. 708–710. URL: http://www.ether-wind.narod.ru/Sagnac_1913_10/Sagnac_1913_10_fr.pdf (дата обращения: 15.09.2022).

17. Schiff L. I. On Experimental Tests of the General Theory of Relativity // American Journal of Physics. 1960. 28. P. 340–343. DOI: 10.1119/1.1935800.

18. Shapiro I. I. Fourth Test of General Relativity // Physical Review Letters. 1964. 13. P. 789–791. DOI: 10.1103/PhysRevLett.13.789.

19. Soffel M., Klioner S. A., Petit G., et. al. The IAU 2000 Resolutions for Astrometry, Celestial Mechanics, and Metrology in the Relativistic Framework: Explanatory Supplement // The Astronomical Journal. 2003. 126 (6). P. 2687–2706. DOI: 10.1086/378162.

Космические аппараты Polytech Universe-1, Polytech Universe-2

С. Б. Макаров

СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Сверхмалые космические аппараты Polytech Universe-1 и Polytech Universe-2 были созданы для изучения уровня электромагнитного излучения на территориях техносферы, морей и океанов, лесных массивов, энергоемких объектов. Аппараты являются полностью отечественной разработкой.

Задача проекта — создание трёхмерной нестационарной модели распределения уровня электромагнитного излучения в различных диапазонах частот для построения территориальных карт распределения этих уровней в рамках долговременного (до 3 лет) анализа и изучения статистических результатов измерений, передаваемых с борта КА. В проекте участвуют Высшая школа Прикладной физики и космических технологий Института электроники и телекоммуникаций СПбПУ, а также ведущие российских предприятий военно-промышленного комплекса.

В докладе рассмотрены промежуточные результаты реализации проекта, ближайшие планы и перспективы развития проекта в будущем.

Особенности формирования достоверной шкалы времени в сетях связи

С. Ю. Медведев[1], К. Г. Мишагин[1,2], А. В. Рыжков[3], Б. А. Сахаров[1], М. Л. Шварц[3]

[1]АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия
[2]ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия
[3]МТУСИ, г. Москва, Россия

Современные системы связи основываются на кодовом или временном разделении каналов, предполагающем высокоточную синхронизацию начальной фазы. Для обеспечения их функционирования в сетях реализуются системы частотно-временного обеспечения, т. е. совместного использования частотной и временной (фазовой) синхронизации.

Наиболее простым решением задачи частотно-временного обеспечения является использование данных о шкале времени, получаемых на выходе приёмников ГНСС. Однако в последние годы во всём мире наблюдается процесс снижения надёжности данного метода в связи с помехами различного рода: промышленные помехи, помехи радиопередающих устройств, преднамеренные помехи, широкополосные шумовые помехи (jamming) и подмена сигналов ГНСС ложными сигналами (spoofing). Таким образом, появилась настоятельная необходимость применения наземных каналов для приёма данных о шкале времени от национальных стандартов частоты и времени или лабораторий UTC. Для этой цели могут быть использованы технологии PTP и SyncE, а также передача в потоках E12. Однако практика применения показала, что и эти системы также не обладают достаточной надёжностью.

В работе рассматривается решение на основе атомных стандартов частоты, которое представляется оптимальным с учетом указанных выше проблем. Идея заключается в построении рабочего эталона частоты и времени, подстраивающего свою шкалу по данным о шкале UTC, получаемым по независимым каналам (ГНСС, оптоволоконные линии связи), с относительно большой периодичностью при непрерывном анализе качества этих данных, а также качества выходных сигналов эталона. Подобные системы получили название APNT — Assured Positioning, Navigation and Timing. В работе предлагается структура системы APNT, даны оценки точности частотной и фазовой синхронизации.

Мониторинг малых небесных тел: цели и задачи практического применения

Ю. Д. Медведев[1], Ю. С. Бондаренко[1], Д. А. Маршалов[1], Б. М. Шустов[2], М. Ю. Ховричев[3]

[1]ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]ИНАСАН, г. Москва, Россия
[3]ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Систематические наблюдения (мониторинг) малых небесных тел — важный канал развития наших представлений о Солнечной системе и ее эволюции. Кроме того, мониторинг малых небесных тел (МНТ) имеет четкое практическое значение. Такой практической целью мониторинга МНТ является оценка и прогноз угроз, обусловленных фактором существования МНТ естественного происхождения: сближающихся с Землей астероидов и комет, а также входящих в околоземное космическое пространство (ОКП) метеороидных потоков.

Угрозу представляют все МНТ, входящие в ОКП. Столкновения с метеороидами размером более 1 см могут серьезно повредить или даже уничтожить КА. Более мелкие частицы могут повредить солнечные панели, оптические поверхности космических телескопов (камер) и т. д. Тела крупнее 10 м по современным представлениям рассматриваются как источник астероидно-кометной опасности. Прямой угрозы КА такие тела не несут, поскольку вероятность столкновения КА с крупным МНТ очень мала. Однако, как показывает опыт исследований в метеорной астрономии, крупные тела (и астероиды и кометы) являются источниками образования метеороидных потоков. Эти метеороидные потоки представляют опасность для КА, но наблюдать их весьма затруднительно. Однако, наблюдая крупные «родительские» тела можно прогнозировать и параметры сопутствующих потоков при событиях конкретных сближений крупных МНТ с Землей. Прогнозы метеорных потоков основаны на моделях метеорного вещества в ОКП и носят лишь статистический характер. Непосредственные наблюдения метеороидных потоков до их входа в атмосферу практически невозможны из-за малых размеров частиц, образующих такие потоки. Датчики космического базирования, обеспечивающие регистрацию столкновений с метеороидами и частицами пыли, годятся для измерений некоторых параметров уже столкнувшихся с КА частиц и служат для накопления данных, необходимых для дальнейшего построения моделей метеорного вещества в ОКП.

Задачами мониторинга МНТ являются:

– обнаружение новых опасных для Земли МНТ;
– сбор, хранение, систематизация и доступ к информации об МНТ;
– определение предварительных орбит вновь открываемых МНТ;
– улучшение орбит — перевычисление элементов орбит известных МНТ с учетом новых наблюдений;

– прогнозирование угроз — определение обстоятельств нахождения МНТ в околоземном пространстве и столкновений с Землей;

– выдача целеуказаний на проведение дополнительных наблюдений МНТ;

– получение точных астрометрических измерений каждого МНТ, чтобы обеспечить своевременную оценку орбиты и последующую каталогизацию ранее неизвестных потенциально опасных МНТ или уточнение орбит известных МНТ;

– получение физических характеристик, требующих особого внимания МНТ, с тем чтобы оценить степень их риска при столкновении с Землей или КА;

– оценки плотности распределения метеорных частиц в ОКП.

Потенциальными потребителями данных о мониторинге малых небесных тел могут быть государственные органы, космические агентства, частные компании, занимающиеся космической деятельностью, и общественность. Выполнение перечисленных выше задач на систематической основе предполагает создание специальной системы (подсистемы). Основные требования к такой подсистеме со стороны потенциальных потребителей могут включать следующие:

– данные и информация (прогнозы) должны быть точными и надежными, чтобы обеспечить эффективное применение заблаговременных предупреждений и мер по смягчению последствий;

– данные и информация должны быть в основном доступны для всех потенциальных пользователей, включая государственные учреждения, космические агентства, частные компании и широкую общественность. В некоторых случаях (например, во избежание паники при появлении сообщений о возможном столкновении крупного МНТ с Землей) информация будет распространяться в соответствии с оговоренным регламентом.

Негравитационные эффекты в движении кометы 45 P/ Хонда-Мркос-Пайдушакова

Ю. Д. Медведев, С. Р. Павлов, Ю. А. Чернетенко

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Комета 45P была обнаружена 3 декабря 1948 г. японским астрономом Минору Хондой, чешским и словацким астрономами Антоном Мркосом и Людмилой Пайдушаковой. Комета динамически принадлежит семейству Юпитера и движется по слабо наклоненной орбите с периодом 5.25 года. Значение MOID (минимальное расстояние между орбитами) этой кометы с орбитой Земля 0.0604 а. е. делает возможным тесные сближения этой кометы с Землей.

В появлениях 2011 г. и 2017 г. произошло уникальное событие, комета сблизилась с Землей в двух появлениях подряд: 14 августа 2011 г комета подошла к Земле на расстояние 0.06120 а. е., а 11 февраля 2017 г. — на расстояние 0.08319 а. е. Это дало возможность получить большое количество позиционных наблюдений этой кометы, а также радиолокационных наблюдений: измерений задержек и смещений Доплера. Что, в свою очередь, позволило более тщательно исследовать динамику кометы на интервале между сближениями, поскольку позиционные наблюдения в момент сближения и радиолокационные наблюдения имеют высокую пространственную точность. Попытки объединить общепринятой моделью наблюдения этой кометы, включающие моменты сближений в 2011 г. и 2017 г., не привели к успеху. При представлении наблюдений единой орбитой присутствовали систематические уклонения. Не случайно в каталоге JPL приводятся две орбиты для этих наблюдений [1].

В докладе мы рассматриваем различные эффекты, которые могли бы объяснить эти систематические уклонения. Таковыми, по нашему мнению, являются изменения смещения фотоцентра кометы и изменения негравитационных ускорений со временем. Рассматривается также возможность сближения кометы в этот период с одним из астероидов главного пояса.

Литература

1. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology [Электронный ресурс]. URL: http://ssd.jpl.nasa.gov (дата обращения: 15.03.2023)..

Решение задачи Молоденского по чистым аномалиям силы тяжести с относительной ошибкой порядка квадрата сжатия

И. И. Меженова[1], В. В. Попадьёв[2]

[1]ППК «Роскадастр», г. Москва, Россия
[2]МИИГАиК, г. Москва, Россия

В рамках доклада рассматривается решение задачи по определению аномального потенциала по чистым аномалиям силы тяжести на поверхности сжатого эллипсоида с сохранением членов порядка квадрата эксцентриситета, опубликованное в статье [1].

Подобное приближенное решение для смешанных аномалий силы тяжести опубликовано М. С. Молоденским в работах 1956 и 1960 гг. [2, 3]. Поскольку в современных условиях для определения доступны геодезические высоты гравиметрических пунктов, следует распространять выводы теории Молоденского и на чистые аномалии силы тяжести.

В самом начале решения Молоденского авторами доклада обнаружена ошибка при выводе производной от обратного расстояния между двумя точками на эллипсоиде по направлению внешней нормали. Тем не менее эта ошибка компенсировалась отбрасыванием членов со степенью выше квадрата эксцентриситета и не оказала влияние на выводы В. В. Бровара 1996 и 1999 гг. [4, 5]. Это решение задачи Молоденского с учётом сжатия использовалось редко, вероятно поэтому ошибка осталась незамеченной.

Авторы тщательно проверили выводы Молоденского 1956 и 1960 гг., исправили ошибку в выражении производной обратного расстояния по направлению внешней нормали к поверхности эллипсоида, численно подтвердили правильность полученных результатов и получили аналитическое решение задачи по определению аномального потенциала по чистым аномалиям силы тяжести на поверхности сжатого эллипсоида с сохранением членов порядка квадрата эксцентриситета.

Литература

1. Меженова И. И., Попадьёв В. В. Решение задачи Молоденского по чистым аномалиям силы тяжести с относительной ошибкой порядка квадрата сжатия // Геодезия и картография. 2022. № 9. С. 14–20.
2. Молоденский М. С. Решение задачи Стокса с относительной погрешностью порядка квадрата сжатия Земли // Тр. ЦНИИГАиК. 1956. Вып. 112. С. 3–8.
3. Молоденский М. С., Еремеев В. Ф., Юркина М. И. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли // Тр. ЦНИИГАиК. – 1960. – Вып. 131. – С. 59–66.
4. Бровар В. В., Юркина М. И. Становление теоретической геодезии XX века. В сб.: Развитие гравиметрии и магнитометрии в XX веке. Труды конференции 23—25 сентября 1996 г. М.: ОИФЗ, 1997. С. 5–61.
5. Бровар В. В., Бровар Б. В. Высокоточный метод определения внешнего возмущающего потенциала реальной Земли // В сб.: «Физическая геодезия». М.: ЦНИИГАиК, 1999. С. 14–54.

Точность определения скоростей движения геодезических пунктов

Г. Э. Мельник[1,2], И. А. Ощепков[1]

[1]ППК «Роскадастр», г. Москва, Россия
[2]ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Целью данного исследования является изучение точности определения скоростей движения геодезических пунктов на земной поверхности. Известно, что медленные, но постоянные смещения, вызванные тектоническими процессами, могут быть определены либо непосредственно из повторных или непрерывных геодезических измерений, либо по моделям движения тектонических плит. Оба подхода имеют свои достоинства и недостатки, но особое внимание следует уделить оценке точности, поскольку параметры движения пунктов являются составным элементом современных систем координат.

В качестве исходных данных для анализа использованы полученные из архива геодезической лаборатории университета Невады в Рино [1] временные ряды прямоугольных геоцентрических координат на приблизительно 20 000 постоянно действующих геодезических ГНСС-пунктах, расположенных глобально по всей планете.

Одной из первоочередных задач в рамках данного исследования была фильтрация массива данных с целью исключения временных рядов, по тем или иным критериям не подходящих для точного определения скоростей движения земной поверхности. После фильтрации в дальнейшее исследование было оставлено более 10 000 геодезических пунктов, для которых по методу наименьших квадратов были вычислены скорости изменения координат в виде простейшей модели линейной регрессии. Остаточные величины (невязки) служили исходными для оценки точности вычисления скоростей пунктов по временным рядам.

Для исследования точности определения скоростей по моделям движения тектонических плит, основанных на теореме вращения Эйлера, в качестве эталона использованы данные первой части эксперимента. Рассмотрены модели: NUVEL-1A [2], ITRF2014 [3], MORVEL56 [4] и GSRM 2.1 [5]. Разности вычисленных по моделям и временным рядам скоростей геодезических пунктов служили исходными для оценки точности вычисления скоростей пунктов по моделям движения тектонических плит.

Литература

1. Blewitt G., Hammond W. C., Kreemer C. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science // Eos. 2018. Т. 99. № 10.1029. С. 485.

2. Gripp A. E., Gordon R. G. Current plate velocities relative to the hotspots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model // Geophysical Research Letters. 1990. Т. 17. № 8. С. 1109–1112.

3. Altamimi Z. Métivier L., Rebischung P., et al. ITRF2014 plate motion model // Geophysical Journal International. 2017. T. 209. № 3. C. 1906–1912.

4. Argus D., Gordon R., Demets C., Zheng L. NNR-MORVEL56: No-net-rotation model of geologically current plate motions // AGU Fall Meeting Abstracts. 2010. T. 2010. C. G43A-0819.

5. Kreemer C., Blewitt G., Klein E. C. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2014. T. 15. № 10. C. 3849–3889.

База скоростей станций ГНСС СПбГУ для решения различных задач

П. В. Мовсесян

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Для мониторинга медленных геодинамических процессов в настоящее время используются данные ГНСС-станций.

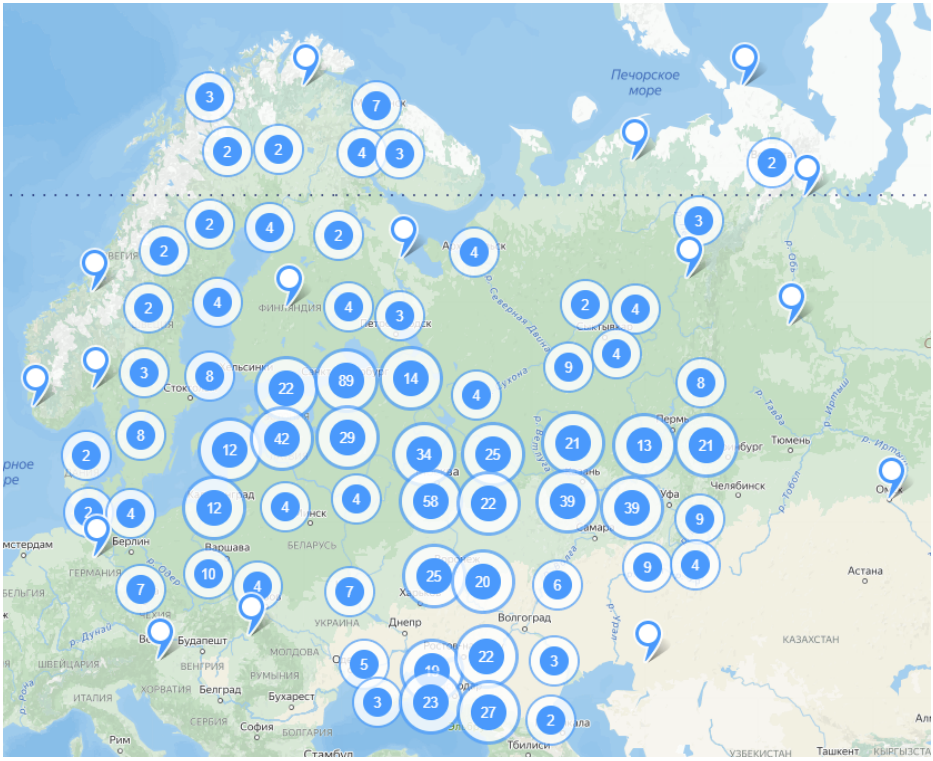
Благодаря высокому числу и плотному расположению таких станций было выделено множество геотектонических плит. Из-за большого количества станций актуальна задача организации обработки, хранения и визуализиции их данных. Такие базы скоростей ГНСС-станций существуют, например база JPL [1] и база ГАО РАН [2]. У первой слабое покрытие территории России, у второй процесс обработки и визуализации данных имеет очень высокую трудоемкость.

База данных скоростей от ГАО РАН охватывает область, приблизительно ограниченную рамками Восточно-Европейской платформы, на данный момент имеются данные о более чем 800 станциях. Процесс обработки сырых данных состоит из ГНСС-обработки, затем анализа ряда получаемых положений станций [3].

На основе данных базы ГАО РАН была разработана база скоростей, использующая современные методы хранения и визуализации данных. Это позволяет значительно упростить процесс визуализации положений станций, убирая необходимость проводить его вручную. Для хранения результатов обработки используется база данных, из которой по запросу посетителя сайта базы формируются данные для визуализации.

Была выполнена автоматизация процессов загрузки данных с баз. На данный момент тестируется процесс обработки данных с большей степенью автоматизации. Некоторые этапы обработки на данный момент выполняются вручную, но уже были разработаны планы работ по их автоматизации. В будущем ожидается запуск самостоятельной ГНСС-обработки на базе вычислительных мощностей СПбГУ. За счет более высокой степени автоматизации ожидается упрощение поддержки обработки столь высокого числа станций, что уменьшит задержи между появлением сырых данных и получением позиций по ним. Независимое написание скриптов обработки позволит учитывать множество вариантов, связанных с операциями между загрузкой и обработкой данных.

Помимо визуализации и обработки данных базы реализована возможность получения текущего состояния таблиц с положениями для самостоятельного анализа в машиночитаемом формате. База размещена по адресу [4].



Литература

1. GNSS Time Series [Электронный ресурс]. URL: https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html (дата обращения: 11.03.2023).
2. База данных скоростей ГНСС-станций [Электронный ресурс]. URL: http://www.gaoran.ru/russian/database/station/databasev_rus.html (дата обращения: 01.03.2023).
3. Горшков В. Л., Мохнаткин А. В., Щербакова Н. В. База скоростей станций ГНСС Восточно-Европейской платформы для решения научных и прикладных задач // Геодезия и картография. 2021. № 1. С. 34–44. Doi: 10.22389/0016-7126-2021-967-1-34-44.
4. Скорости ГНСС-станций [Электронный ресурс]. URL: https://gnss.pu.ru (дата обращения: 11.03.2023).

Магнитное поле Земли как источник информации для определения параметров движения объектов

А. А. Мусин

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, г. Мытищи, Россия

Рассмотрена возможность получения данных о параметрах движения объекта через измерения магнитного поля Земли в условиях отсутствия сигналов космических навигационных систем.

С появлением ГНСС и инерциальных навигационных систем (ИНС) задачи определения координат местоположения и параметров движения объекта значительно упростились. Имея на борту летательного аппарата навигационный приемник сигналов ГНСС можно непрерывно отслеживать свои координаты и параметры движения.

В то же время применение ГНСС и ИНС для определения параметров вектора состояния подвижного объекта характеризуется недостатками. Например, при использовании ИНС погрешности накапливаются с течением времени или в зависимости от пройденного расстояния. ГНСС имеет низкий, на уровне шумов, уровень сигнала, невозможность оперативно изменить кодовую последовательность сигнала КА. Следовательно, сигналы ГНСС можно заглушить или подделать. Данное явление получило широкое распространение в последнее время и называется GPS Spoofing.

Из-за угрозы подобных несанкционированных воздействий стало весьма актуальным требование автономности работы навигационных систем (НС). Как один из вариантов автономной работы НС можно рассмотреть работу по магнитным геофизическим полям.

В работах [1, 2] приводятся результаты экспериментальных исследований автономной навигации в условиях отсутствия сигналов ГНСС по магнитному полю Земли (МПЗ). Обязательным условием функционирования данных систем является наличие подготовленной навигационной карты параметров МПЗ. Для практического внедрения вышеописанных систем в бортовые комплексы летательных аппаратов необходимо обеспечить картографирование МПЗ, создать и поддерживать актуальную базу данных МПЗ. Все это существенно усложняет процесс решения навигационной задачи.

Предлагается рассмотреть метод решения навигационной задачи по МПЗ, не требующий магнитных карт. Для решения навигационной задачи предлагаемым методом необходимо определить: начальные координаты объекта, направление движения, скорость и время движения.

Это позволит определить расширенный вектор состояния потребителя:

$$\overrightarrow{\Pi} = \left| x\, y\, z\, t\, V_x V_y V_z \right|,$$

где x, y, z — координаты потребителя, V_x, V_y, V_z — составляющие вектора скорости потребителя, t — текущее время. Если в определении первого и последнего пун-

ктов трудностей не возникает, то в определении направления и скорости движения они есть.

Начальные координаты объекта определяются с помощью навигационной аппаратуры потребителей. Время движения рассчитывается с помощью системы единого времени.

Определить направление движения объекта можно через вектор магнитной индукции $\vec{B}$, воспользовавшись при этом векторными магнитометрами, ортогональная система из которых позволит измерить компоненты магнитного поля, а следовательно, и направление движения объекта.

Для решения навигационной задачи в части определения направления движения в условиях внешнего магнитного поля Земли, учитывая уровень МПЗ от 20 до 80 мкТл, наиболее подходящими являются феррозондовые магнитометры. Они также доступны по цене, прочны и компактны, а их миниатюризация в последнее время достигла уровня интегральных микросхем. Данные обстоятельства, а также обычно низкое энергопотребление таких изделий, делают их предпочтительными для различных приложений и решения нашей задачи в частности.

Определить скорость объекта можно с помощью электродвижущей силы (ЭДС) электромагнитной индукции «Ɛ» в движущемся проводнике. При перемещении проводника длиной l в постоянном магнитном поле свободные электрические заряды внутри него под действием силы Лоренца тоже перемещаются. Возникает разность потенциалов, которая вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \left|\vec{B}\right|\left|\vec{v}\right| l \, sin\theta .$$

Из данной формулы можно выразить скорость движения объекта.

Исходя из вышеописанного, возможно реализовать систему, состоящую из:

1 – навигационной аппаратуры потребителей;

2 – системы ортогональных магнитометров, позволяющая определить направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ Земли, то есть направление движения;

3 – проводящего контура, позволяющего определить ЭДС на его концах, для расчета скорости движения;

Таким образом, представлен метод определения вектора состояния потребителя $\overline{\Pi}$ на основе измерений магнитного поля Земли без использования магнитных карт. Это потенциально позволит дополнить существующие системы навигации: ГНСС, ИНС; либо стать их альтернативой.

Литература

1. Сазонова Т. В. Экспериментальные исследования точностных характеристик корреляционно-экстремальных навигационных систем по магнитному полю Земли // Альманах современной метрологии. 2020. № 4(24). С. 86–96.

2. Фатеев В. Ф., Бобров Д. С., Гостев Ю. В. и др. Макет системы навигации по геофизическим полям // Альманах современной метрологии. 2020. № 4(24). С. 173–184.

Разработка отечественного астрофотометрического каталога звёзд всего неба в интересах обеспечения специальных комплексов

М. И. Олейников, В. В. Широбоков

ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время современные специальные комплексы в своём составе имеют оптические датчики и информационные системы. Под информационной системой (ИС) подразумевается часть комплекса, выполняющая роль чувствительного элемента, воспринимающего электромагнитное излучение определённой длины волны.

Исходя из этого, по рабочему спектральному диапазону ИС можно разделить на системы видимого, инфракрасного и радиолокационного диапазонов, а по их назначению — на основные (целевые) и вспомогательные (обеспечивающие).

В общем случае ИС оптического диапазона решают широкий спектр задач: как обеспечивающих — в том числе навигационных задач, связанных с определением ориентации и местоположения, так и целевых — координатной привязки и определения параметров орбитального движения объектов космического мусора [1], а также привязки блеска к эталонной фотометрической шкале наблюдаемых на фоне звёзд объектов космического мусора.

Так, для обеспечения ориентации КА с заданными характеристиками (определяются назначением КА) необходимо выполнение следующих требований:

– точность ориентации до 0.1…0.01″;

– время обновления информации не хуже 10…100 мс;

– определение координат и угловых скоростей при скоростях вращения до 15…30°/с.

Для выполнения указанных требований при проектировании необходимо учитывать астрометрическую и фотометрическую информацию. Также возрастают требования к полноте каталога — необходимо использовать звезды до 15 зв. величины.

Для абсолютной ориентации образца вооружения с точностью 0.1″ и лучше необходимы астрометрические каталоги звезд с погрешностями 0.1…0.01″, содержащие звезды до 12…15 зв. величины, по которым есть в том числе фотометрические данные.

По данным Центра астрономических данных в Страсбурге (The Centre de données astronomiques de Strasbourg — CDS) в настоящее время в открытом доступе находится более 300 различных фотометрических каталогов [2]. Дата выпуска каталогов от 1950-х до 2020-х гг.

Также имеется порядка десяти астрометрических каталогов звёзд, в том числе фундаментальные каталоги FK1-FK6.

Несмотря на большое количество и разнообразие каталогов звёзд, имеются следующие проблемные вопросы по их использованию:

1. В действующей нормативно-технической документации не определены:

– каталоги звезд, которые должны быть использованы на этапах создания и применения специальных комплексов;

– унифицированный научно-методический аппарат, определяющий порядок расчета координатной информации;

– унифицированный научно-методический аппарат пересчета навигационных данных в различные системы координат.

2. В нашей стране не существует отечественного опорного астрофотометрического каталога звёзд, который бы содержал данные звёзд по всей небесной сфере в заданном спектральном диапазоне.

3. Существующие фотометрические системы [3] не позволяют полностью реализовать потенциал фотоприемных устройств.

4. Систематическая ошибка определения проницающей способности различных наземных ОЭС может достигать 3 звездных величин из-за отличия блеска одних и тех же звёзд в различных каталогах.

5. Точность данных, содержащихся в существующих каталогах, подвержена деградации.

6. Отсутствие единого методического подхода по использованию разнородных фотометрических систем звёздных каталогов для решения задач привязки к опорным звёздам не позволяет достоверно оценить количество опорных звёзд, появляющихся в поле зрения информационных средств различного назначения в ходе их применения.

В связи с этим возникает необходимость создания отечественного однородного астрофотометрического многоцветного каталога звёзд всего неба для обеспечения специальных комплексов.

Литература

7. Молотов И.Е., Агапов В.М., Стрельцов и др. Проблемы оптического мониторинга космического мусора // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2020. № 7. 17 с.

8. Catalogues and files available at CDS [Электронный ресурс]. URL: https://cdsarc.u-strasbg.fr/cats/cats.html (дата обращения 10.04.2023).

9. Bessell M. S. Standard photometric systems // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2005. Vol. 43. P. 293–336.

Приливы и фигура Земли

И. А. Ощепков, И. И. Меженова, И. Х. Невретдинов

ППК «Роскадастр», г. Москва, Россия

Приливные силы, действующие на Землю со стороны тел Солнечной системы, хотя по природе своей и являются гравитационными, но непрерывно изменяют во времени все три изучаемые в рамках геодезии аспекта планеты: фигуру, гравитационное поле и вращение. Поправки, вводимые в результаты высокоточных геодезических измерений, во многом могут и устраняют этот источник ошибок, ведь эфемериды крупных ближайших к Земле небесных тел могут быть вычислены с высокой точностью на любой момент времени. Камнем преткновения к построению безупречной теории полного учёта влияния приливных сил является неполнота знаний внутреннего строения и динамики Земли.

В действительности само понятие фигуры Земли и все связанные с ней и точно измеряемые геодезические величины не имеют смысла без конкретного выбора и указания способа учёта влияния приливных сил, особенно постоянной их части, под действием которой планета находится в постоянно деформированном состоянии. Классическое для геодезии определение силы тяжести как результирующей силы притяжения и центробежной силы в таком случае не является вполне корректным и требует пересмотра. Это же в полной мере относится к постановке и решению геодезических краевых задач, обычно внешних относительно притягивающего тела — Земли.

Практическим следствием указанных выше проблем является часто ошибочное использование в одной процедуре вычисления величин, в которых приливные силы учтены по-разному, то есть введены разные системы приливов. Например, такое может возникнуть при некорректном выборе фундаментальных геодезических постоянных, как в государственных системах координат. Но особенно актуально это в теории высот, когда геодезическая и физическая высоты, а также геоидальная часть относятся, в сущности, к разным определениям фигуры Земли.

В докладе сделана попытка обратить внимание слушателя на указанные выше проблемы с позиции выработки универсального подхода по учёту приливных эффектов в теории и практике высокоточных геодезических работ в рамках координатно-временного и навигационного обеспечения.

Развитие государственной гравиметрической сети России

И. А. Ощепков, Е. П. Разинькова, В. С. Башкатов, О. А. Забузова, И. А. Сухарев-Крылов, А. К. Ефименко, Е. А. Чистякова

ППК «Роскадастр», г. Москва, Россия

Государственная гравиметрическая сеть России представляет собой совокупность закреплённых на местности гравиметрических пунктов, на которых выполняются абсолютные и/или относительные измерения ускорения силы тяжести, определяются высоты и координаты в государственных геодезических системах ускорения силы тяжести (гравиметрической системе), высот и координат соответственно.

В докладе обсуждаются вопросы определения и установления государственной гравиметрической системы нового поколения, а также необходимые для этого изменения в структуре и инфраструктуре государственной гравиметрической сети.

Одним из ключевых элементов такой инфраструктуры являются гравиметрические пункты непрерывного мониторинга, на которых реальное значение ускорения силы тяжести известно в любой момент времени с высокой точностью и есть возможность проводить сравнения абсолютных гравиметров. В структуре государственной гравиметрической сети такие пункты занимают верхний уровень иерархии и называются исходными (главными). Один из таких пунктов создаётся в настоящее время в городе Москве на базе гравиметрической лаборатории ППК «Роскадастр».

Регулярное проведение упомянутых выше сравнений абсолютных гравиметров, международных и национальных, также является важнейшей составляющей инфраструктуры гравиметрической системы, поскольку обеспечивает прослеживаемость результатов измерений к СИ или, при недоступности по какой-либо причине этого варианта, групповому эталону. Тем самым и задаётся гравиметрическая система отсчёта.

Дальнейшее распространение гравиметрической системы выполняется через абсолютные измерения ускорения силы тяжести на пунктах фундаментальной гравиметрической сети. При этом выбор места для создания фундаментального пункта должен определяться основной научной задачей, решаемой сетью этого класса: изучение вариаций гравитационного поля Земли во времени. Гравиметрические пункты должны совмещаться со средствами непрерывных определений координат (ГНСС и др.) и других геодезических и геофизических параметров.

В состав работ на фундаментальном пункте входит: определение координат и высот пункта и его пунктов-спутников; абсолютные измерения и определение вертикального градиента ускорения силы тяжести на пункте; относительные измерения ускорения силы тяжести между пунктом и его пунктами-спутниками. Разработанная методика выполнения измерений позволяет практически на всех фундаментальных пунктах, независимо от условий наблюдений, получить зна-

чение ускорения силы тяжести с суммарной стандартной неопределённостью не превышающей 8 мкГал на любой эффективной высоте, а на пунктах-спутниках — не превышающей 10 мкГал на высоте марки. Последнее, помимо прочего, достигается тщательным и трудоёмким эталонированием статических гравиметров на специально созданном для этих целей гравиметрическом базисе (полигоне).

С увеличением количества пунктов, на которых выполнен указанный выше комплекс измерений, и ростом числа аппаратуры, применяемой для измерений, появляется необходимость в автоматизации большинства операций, выполняемых при реализации государственной гравиметрической системы, начиная от ведения электронных журналов проведения поверок и исследований аппаратуры и заканчивая предоставлением результатов измерений заинтересованным пользователям. Все эти модули являются частью создаваемого центра данных гравиметрической сети Российской Федерации.

Радиолокационные карты видимой стороны Луны с высоким пространственным разрешением

С. Р. Павлов, Ю. С. Бондаренко, Д. А. Маршалов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Радиолокация является одним из наиболее эффективных методов наземного дистанционного исследования Луны, позволяющим проводить картографирование ее поверхности с пространственным разрешением не достижимым для наземных средств измерений на других длинах волн. При этом разрешающая способность радиолокационной системы не зависит от земной атмосферы и расстояния до цели, а задаётся исключительно характеристиками излучаемого сигнала. Радиолокационные изображения поверхности Луны получают с использованием так называемого метода Доплер-задержки, когда изображение формируется в системе координат на основе временной задержки компонентов эхо-сигнала и их доплеровского сдвига по частоте относительно местоположения цели. При этом получаемые радиолокационные изображения не привязаны к селенографическим координатам, что сильно затрудняет их практическое применение.

В работе предложен новый метод преобразования временной задержки и частоты эхо-сигнала к селенографической широте и долготе, основанный на линейной интерполяции по известным узловым значениям. Предложенный метод был применен к данным радиолокационных измерений районов Апеннин, Моря Ясности и кратера Тихо на видимой стороне Луны на длине волны 4.2 см.

В результате были получены радиолокационные карты этих районов в селенографической системе координат с пространственным разрешением порядка 120 м. Карты также содержат информацию о расположении и количестве поверхностных и взвешенных в лунном реголите пород размерами более 10 см. Полученные радиолокационные карты высокого разрешения позволяют изучать скрытые от видимых изображений особенности лунной поверхности и недр и могут быть полезны для изучения геологической истории Луны, разведки и добычи полезных ископаемых, выбора безопасных посадочных площадок, особенно в связи с возросшим на сегодняшний день интересом многих стран к освоению Луны.

Сверхминиатюрный квантовый стандарт частоты на КПН-эффекте

В. Г. Пальчиков

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

В настоящее время отсутствие малогабаритных высокостабильных квантовых стандартов частоты не позволяет в полной мере реализовать в прецизионной аппаратуре потребителей потенциальные точности системы ГЛОНАСС. Недостатком традиционных квантовых стандартов частоты на основе газовой ячейки является использование СВЧ-резонатора, наличие которого не позволяет существенно уменьшить габариты такого стандарта. Использование эффекта когерентного пленения населенностей (КПН) позволяет отказаться от использований СВЧ-резонатора, что позволяет кардинально уменьшить размеры стандарта при сохранении высоких метрологических характеристик.

Целью настоящей работы является разработка сверхминиатюрного высокостабильного квантового стандарта частоты на основе эффекта КПН для прецизионной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС. В работе представлены результаты разработки и создания квантового стандарта частоты на основе резонанса КПН, наблюдаемого в D1 линии 87Rb. Исследовано влияние различных физических факторов на частоту выходного сигнала, а также определены оптимальные параметры стандарта для достижения наилучшей стабильности частоты.

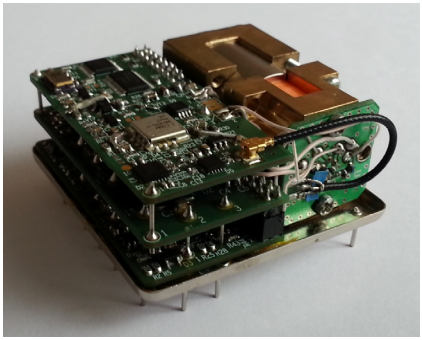
Разработанный сверхминиатюрный стандарт частоты времени и частоты на основе эффекта КПН является первым реализованным стандартом подобного типа в России [1]. Впервые в России создана и освоена технология изготовления сверхминиатюрных рубидиевых ячеек со смесью буферных газов на оптическом контакте, а также технология производства одномодовых лазеров с вертикальным резонатором в миниатюрном (на уровне нескольких кубических миллиметров) исполнении. Продемонстрирована долговременная непрерывная автономная работа (более нескольких месяцев) стандарта, а также достижение высокой долговременной нестабильности частоты (порядка нескольких единиц 10(–12)) на суточном интервале времени измерений, что соответствует передовому мировому уровню.

Спутниковые глобальные навигационные системы, такие как ГЛОНАСС или GPS, получат существенное развитие вместе с развитием технологии компактных высокостабильных часов. Усовершенствование часов как ключевого элемента различных системе навигации позволит значительно улучшить точности позиционирования, чем это возможно сейчас.

Разработанный стандарт частоты предназначен для использования в качестве элемента навигационно-временных устройств для изделий высокоточного применения, обеспечивая их прогнозируемой временной информацией с требуемой точностью при потере сигналов ГНСС. Другие области применения: связь с передачей большого потока данных (широкополосный Интернет и т. д.), высоко-

защищенная связь с быстрой сменой несущей частоты, синхронизация удаленных объектов и т. д.

а)



б)

Рис. 1. Атомный стандарт времени и частоты на КПН-эффекте (объем — 60 см^3, ширина и глубина — 50 мм, высота — 24 мм): а) общий вид, б) вид со снятой крышкой корпуса

Литература

1. Скворцов М. Н., Игнатович С. М., Вишняков В. И. и др. // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. С. 576−584.

Достигнутые характеристики и направления совершенствования системы высокоточного определения эфемеридно-временной информации, реализующей услугу высокой точности для гражданских потребителей

В. В. Пасынков[1], В. Ф. Брагинец[2]

[1]АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия
[2]Филиал «ПНБО» АО «НПК «СПП», г. Королев, Моск. обл., Россия

Для удовлетворения требований гражданских потребителей система ГЛОНАСС должна предоставлять услуги позиционирования высокой точности (режим PPP (Precise Point Positioning)). Глобальная система высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации (СВО ЭВИ) в реальном времени для гражданских потребителей является функциональным дополнением системы ГЛОНАСС и обеспечивает услугу высокой точности системы ГЛОНАСС путём предоставления ассистирующей информации для абсолютного высокоточного позиционирования (АВП) [1]. СВО ЭВИ формирует и предоставляет ассистирующую информацию для реализации потребителями следующих режимов АВП:

– оперативного с начальной инициализацией (в реальном времени);
– апостериорного (в режиме постобработки).

С использованием ассистирующей информации СВО ЭВИ в оперативном режиме с начальной инициализацией обеспечивается определение местоположения с погрешностью 0.09 м (СКП) в зоне действия услуги, в апостериорном режиме — с погрешностью 0.05 м (СКП).

В 2022 г. Госкорпорация «Роскосмос» и АО «НПК «СПП» заключили лицензионный договор, согласно которому АО «НПК «СПП» дается право применения СВО ЭВИ в соответствии с его функциональным назначением с целью оказания услуг гражданским потребителям, а именно предоставление ассистирующей информации на возмездной основе для реализации услуги позиционирования высокой точности.

В докладе представлены уточненные характеристики СВО ЭВИ, результаты определения местоположения в апостериорном режиме и в режиме реального времени по результатам практического применения высокоточной информации потребителями, а также направления совершенствования системы на период до 2030 г. Отмечено, что формируемые в СВО ЭВИ данные соответствуют по точностным характеристикам данным лучших зарубежных центров анализа. Основным сдерживающим фактором для широкого предоставления услуги высокой точности в реальном времени является отсутствие космического канала доставки информации.

Также приведены оценки точности абсолютного высокоточного позиционирования с использованием апостериорных данных СВО ЭВИ для нескольких

станций с известными ITRF2020 координатами: для узлов коллокации ИПА РАН «Бадары», «Зеленчукская» и «Светлое» (badg, zeck, svtl), а также для двух зарубежных станций (pots (Потсдам) и sgoc (Индия)). Оценки применения техники PPP с использованием апостериорных данных СВО ЭВИ показывают высокую эффективность абсолютного высокоточного позиционирования и потенциал в достижении точности навигации на уроне 5 мм, то есть по среднеквадратической погрешности лучше 1.5 мм.

Литература

1. Глобальная навигационная система ГЛОНАСС. Глобальная система высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации в реальном времени для гражданских потребителей (СВО ЭВИ). Интерфейсный контрольный документ (редакция 1.0). М.: «АО «НПК «СПП», 2020.

Использование лазерно-оптических бортовых систем для повышения точности системы ГЛОНАСС

В. В. Пасынков[1], С. И. Донченко[3], В. В. Мурашкин[1], Е. В. Титов[2]

[1]АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия
[2]Филиал «ПНБО» АО «НПК «СПП», г. Королев, Моск. обл., Россия
[3]ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Задачи поддержания, развития и использования системы ГЛОНАСС [1] являются актуальными и непосредственно сопряжены с использованием перспективных лазерно-оптических бортовых систем.

При частотном разделении сигналов ГЛОНАСС возникают межлитерные задержки, влияющие на погрешность навигационных определений потребителя, из-за неравномерности группового запаздывания сигналов на различных частотах в приемном тракте аппаратуры и погрешности калибровки передающего тракта навигационных КА. Этот вид погрешности является значимым для всех одночастотных потребителей системы ГЛОНАСС и двухчастотных, использующих открытые сигналы стандартной точности, что обусловлено особенностями наземного сегмента [2], выполняющего расчет параметров навигационного сообщения по сигналам высокой точности. Для двухчастотного потребителя, использующего эти же сигналы и навигационные сообщения, реализуется эффект взаимной компенсации погрешности. В то же самое время отличие группового запаздывания сигналов в аппаратуре опорной станции наземного сегмента от запаздывания в аппаратуре потребителя проявляется в полной мере, и эффективно парируется с использованием данных системы калибровки из состава Системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок [3]. Не охваченными контуром калибровки остались одночастотные потребители (в том числе новых сигналов с кодовым разделением) и двухчастотные потребители сигналов открытого доступа.

При поиске «образцовых» данных для преодоления возникших трудностей был сделан выбор в пользу беззапросного тракта в оптическом диапазоне на базе отечественных квантово-оптических систем с длиной волны 0.532 нм, который получил название беззапросной КОС (БКОС). Элементами этого тракта стала специальная аппаратура регистрации моментов посылки лазерного импульса наземной станцией и его регистрации на борту КА. Как следствие, на всех КА системы ГЛОНАСС нового поколения обеспечивается получение как классических запросных (двухпутевых) измерений, так и беззапросных (однопутевых) измерений с субнаносекундной точностью определения расхождения шкал времени по данным лазерно-оптических систем.

Обработка измерений запросного и беззапросного тракта позволяет получать их разностные комбинации в интересах сравнения шкал времени бортовых и наземных стандартов на ранее не достижимом пикосекундном уровне точности. Точность данных БКОС является достаточной для обеспечения летных испыта-

ний перспективных образцов бортовых стандартов нового поколения с суточной нестабильностью частоты σ на уровне 3×10^{-15}. Дополнительно поставлена и решена задача сравнения шкал времени удаленных наземных стандартов посредством формирования разностных измерений в режиме пространственно-временной редукции с точностью, не достижимой ранее при использовании ни одной из известных техник (методов). Точность сравнения ШВ удаленных наземных стандартов по данным БКОС оценивается на уровне ~30–50 пс (СКО).

Достигнутый уровень точности данных БКОС является достаточным для калибровки беззапросных измерительных трактов в интересах перспективных КА системы ГЛОНАСС, включая тракты запросных систем, межспутниковых линий, а также ионосферно-свободных линейных комбинаций измерений беззапросных измерительных средств по сигналам с частотным и с кодовым разделением. Полученные результаты соответствуют мировому уровню точности решения задач в области метрологии и обеспечения единства измерений, а созданные БКОС и технологии на основе использования их измерений в полной мере способствуют решению задач метрологического обеспечения космического комплекса системы ГЛОНАСС с перспективными КА серии «Глонасс-К» и наземным сегментом в процессе его летных испытаний и штатной эксплуатации.

Литература

1. Подпрограмма «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России» (утв. пост. Правительства Российской Федерации от 20 марта 2021 г. № 422), 2021.

2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

3. Глобальная навигационная система ГЛОНАСС. Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВО ЭВП). Интерфейсный контрольный документ (редакция 3.0). М.: «ОАО «НПК «СПП», 2011.

Проблемные вопросы фундаментального КВНО в интересах ГЛОНАСС в современных условиях и предложения по их парированию

В. В. Пасынков[1], А. В. Ипатов[2]

[1]АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия
[2]ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Фундаментальное КВНО получило импульс развития в первой ФЦП ГЛОНАСС 2001–2011 гг. [1], когда наряду с задачей по восстановлению орбитальной группировки была поставлена задача достижения конкурентоспособного уровня с американской GPS. Эта задача была успешно решена в два этапа.

На первом этапе в 2002–2007 гг.:

– в СМПО реализованы современные (актуальные) модели движения и измерений, а также технология их обработки;

– разработана и внедрена беззапросная технология ЭВО на базе впервые созданной в ГЛОНАСС сети БИС (3 станции);

– создана и внедрена в ГЛОНАСС редакция ПЗ-90.02 [2];

– осуществлен переход на ежесуточное обновление ПВЗ;

– достигнут уровень ЭВО 3.0 м [3] (СКО, ЭПД) и паритет с американской GPS.

На втором этапе в 2008–2012 гг.:

– были разработаны и внедрены модернизированное СМПО в части модели движения и измерений и технология ЭВО;

– расширена сеть БИС (до 11 станций);

– внедрена новая редакция ГГСК ПЗ-90.11 [4];

– осуществлен переход на ежесуточное обновление ПВЗ по собственным данным РТ-32 сети «Квазар-КВО», обеспечена независимость от данных международных служб, достигнут уровень ЭВО 1.4 м [5] (СКО, ЭПД) и обеспечено поддержание паритета с американской GPS.

В 2012–2020 гг. (за период второй ФЦП [3]) получено много положительных результатов, но, к сожалению, непосредственной реализации в оперативном ЭВО ГЛОНАСС они не получили.

Сеть беззапросных станций наземного сегмента развита до 20 станций, модернизированы технология и модели движения и измерений, интегрально обеспечившие достижение точности эфемерид на уровне 0.1–0.2 м (сопоставимо с лучшим мировым уровнем) и ЧВП — на уровне 0.2–0.9 м (в зависимости от характеристик БСУ). Модернизирована сеть «Квазар-КВО» на базе трёх РТ-13 [6], с обеспечением оперативного обновления ПВЗ каждые 6 ч и точностью получения всемирного времени на уровне 30 мс. Созданы новые стандарты частоты наземного сегмента по суточной нестабильности шестнадцатого знака и квантово-оптические средства нового поколения «Точка», обеспечивающие сличения

удаленных стандартов частоты на пикосекундном уровне точности в оптическом диапазоне [7]. Существенно улучшены характеристики межспутниковой линии на КА «Глонасс-К» и продемонстрированы возможности существенного улучшения ЭВО при комбинированном использовании наземных и межспутниковых измерений, а также колокации с измерениями РСДБ нового поколения [8]. Проведен эксперимент [9] по обеспечению работы РСДБ-станций по сигналам ГЛОНАСС и др. [10, 11].

Однако по ряду объективных причин, и самое главное — по причине неготовности модернизированного наземного сегмента, до непосредственной реализации в контуре штатного ЭВО ГЛОНАСС не доведено. Параллельные попытки улучшения отдельных характеристик также успехом не увенчались. Запланированная модернизация ГГСК на 2020 г. не состоялась.

Объективно ГЛОНАСС с фактическим уровнем характеристик навигационного поля в настоящее время не занимает лидирующие позиции по сравнению с другими ГНСС. За прошедшие десять лет европейская «Галилео» развернута до полного состава, китайская «Бейдоу» за истекшие пять лет полностью обновлена КА нового поколения (Бейдоу-3), и эти обе системы демонстрируют дециметровый уровень точности навигационного поля, превосходящий даже американскую GPS с блоками нового поколения IIIF.

Безусловно одним из основных условием улучшения характеристик ГЛОНАСС является восполнение ОГ нового поколения «Глонасс-К2». Однако, как и двадцать лет назад, чтобы обеспечить конкурентоспособный уровень с зарубежными ГНСС, также необходимо:

– совершенствовать модели и технологии ЭВО, в том числе по комбинированию наземных и межспутниковых измерений;

– развивать сеть станций, в том числе по работе с новыми сигналами с кодовым разделением;

– внедрить технологию калибровки навигационных сигналов КА системы ГЛОНАСС и БИС наземного сегмента на основе оптической беззапросной КОС;

– модернизировать узлы колокации и сеть станций Квазар-КВО, в том числе по работе РСДБ-станций по новым сигналам ГЛОНАСС с кодовым разделением, улучшить колокацию на основе модернизации КОС аппаратурой НБКОС, и гравиметром;

– совершенствовать отечественную ГГСК ПЗ-90.

Одним из направлений должно быть углубление международного сотрудничества:

– создание сети узлов колокации стран БРИКС и включение РСДБ нового поколения (РТ-13) и КОС нового поколения («Точка») для работы в этой сети;

– сгущение сети БИС на территории РФ и включение БИС ФАГС для работы в международных миссиях.

Литература

1. Федеральная целевая программа «Глобальная навигационная система» на период 2002-2011 гг. (утверждена постановлением Правительства РФ от 20.08.2001 № 587, с изменениями постановлением Правительства РФ от 12.09.2008 № 680). 2008.
2. Распоряжение Правительства №797-р от 20.06.2007.
3. Данилюк А. Ю., Жуков А. Н., Забокрицкий А. В. и др. Текущее состояние и перспективы развития эфемеридно-временного обеспечения в МГНСС ГЛОНАСС с использованием измерений РСДБ // Труды ИПА РАН. 2007. Вып. 16.
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 24 ноября 2016 г. №1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы».
5. Пасынков В. В. О достижении конкурентоспособного уровня точности навигационного поля ГЛОНАСС на основе создания узлов колокации КОС, БИС и РСДБ // Труды Международная конференция «Одно- и двухсторонняя лазерная дальнометрия в колокации с радиотехническими системами для ГНСС» 2012 г. ИПА РАН, г. Санкт-Петербург.
6. Ипатов А. В. Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований. PACS numbers: 07.57. – c, 84.40 – x, 89.20 –a. Doi: 10.3367/UFNr.0183.201307i.0769.
7. Жабин А. С., Лепёшкин Д. В., Пасынков В. В. и др. Перспективные направления использования запросно-беззапросных квантово-оптических систем нового поколения в интересах улучшения метрологического обеспечения ГЛОНАСС на этапе штатной эксплуатации // 10-й Международный симпозиум «Метрология времени и пространства». Тезисы. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2021. 3 с.
8. Пасынков В. В., Бакитько Р. В., Круглов А. В. Совершенствование запросной технологии расчета эфемерид ГЛОНАСС // Труды ИПА РАН. 2019. № 50. С. 58–72.
9. Пасынков В. В., Суркис И. Ф., Титов Е. В. и др. Обработка и анализ РСДБ-наблюдений космических аппаратов системы ГЛОНАСС комплексом «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 61. С. 3–27.
10. Пасынков В. В., Красильщиков М. Н., Кружков Д. М. Современные задачи совершенствования координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС и перспективные методы их решения. I. Совмещение систем координат, используемых различными информационными технологиям и в интересах уточнения положения геоцентра // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 4. С. 156–165.
11. Пасынков В. В., Красильщиков М. Н., Кружков Д. М. Современные задачи совершенствования координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС и перспективные методы их решения. II. Совмещение систем координат, используемых различными информационными технологиями в интересах уточнения всемирного времени // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 5. С. 108–116.

Варианты дополнения системы ГЛОНАСС низкоорбитальным сегментом для парирования региональности наземного сегмента ЭВО

В. В. Пасынков[1], К. В. Кисленко[2], Е. В. Титов[2]

[1]АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия
[2]Филиал «ПНБО» АО «НПК «СПП», г. Королев, Моск. обл., Россия

Исторически наземный сегмент ГЛОНАСС был региональным, то есть ограничен территорией РФ (СССР). Конкурировать с американской GPS и европейской Galileo, которые имеют глобальные сегменты как по получению измерений, так и по возможностям обновления бортовых эфемерид, особенно частотно-временной информации на борту, крайне сложно. Создание глобальной зарубежной сети станций ГЛОНАСС сталкивается с существенными ограничениями. Также существует угроза отключения РФ от мирового интернета, при которой доступ к ресурсам международных данных, необходимых для высокоточного расчёта орбит и часов ГЛОНАСС, будет либо ограничен, либо вообще недоступен. Помимо региональности, ГЛОНАСС в настоящее время существенно уступает всем зарубежным системам по характеристикам бортовых стандартов, что требует более частого обновления ЧВП в сравнении с зарубежными системами.

Одним из возможных путей парирования региональности наземного сегмента и обеспечения независимости от мирового интернета является перенос средств измерений системы ГЛОНАСС в космос.

Основной предпосылкой для дополнения ГЛОНАСС низкоорбитальным сегментом является практическая отработка техники высокоточной навигации для низкоорбитальных спутников, позволяющая для атмосферных КА достигать точность расчета орбит на уровне единиц сантиметров.

В частности, технология высокоточной навигации активно используется в режиме постобработки для КА геодезии, картографирования и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Практические результаты использования сигналов ГЛОНАСС показали, что в случае динамического расчёта орбит с кусочно-линейными эмпирическими согласующими ускорениями достигается точность расчета траекторной информации на уровне 1.5–2 см. При этом обязательным условием является получение параметров фактической ориентации КА.

Потенциал использования низкоорбитального дополнения имеет большие перспективы для развития системы глобального координатно-временного обеспечения и позволяет решать следующие задачи:

– глобальный мониторинг и контроль целостности навигационного поля ГНСС;

– повышение точности и надежности ЭВО за счет использования межспутниковых измерений;

– возможность излучать более мощные помехоустойчивые навигационные сигналы;

– повышение уровня качества навигационных услуг прецизионных координатно-временных определений на базе PPP-технологий;

– комплексирование услуг передачи данных и координатно-временного обеспечения.

В мировой практике активно ведутся работы по созданию низкоорбитальных сегментов ГНСС. Европейскую навигационную систему Galileo планируется реорганизовать в систему Kepler [1], включающую низкоорбитальный сегмент, обеспечивающий оперативную синхронизацию шкал времени всех спутников системы по оптическим линиям связи, получение дополнительного объема измерительной информации — высокоточных межспутниковых лазерных измерений дальности, поддержание шкалы времени системы с использованием бортовых высокостабильных опорных генераторов частоты. Архитектура и заложенные принципы функционирования системы Kepler обеспечивают решение проблемы синхронизации навигационных сигналов путем прямых измерений по оптическим линиям связи. Космический сегмент, включающий среднеорбитальные и низкоорбитальные спутники, способен функционировать автономно — поддерживать синхронизацию шкал, выполнять определение орбиты и обеспечивать устойчивость баллистической структуры. Для синхронизации с вращением Земли необходима и достаточна одна наземная станция контроля.

Для китайской системы Beidou разворачивается функциональное дополнение Centispace-1 на базе низкоорбитальных спутников [2]. Centispace-1 как многоспутниковая полнофункциональная система будет способна обеспечить предоставление услуги высокой точности, контроль и повышение целостности навигационного поля среднеорбитальной ГНСС. В широтном диапазоне от 30° до 60° орбитальной структурой Centispace-1 обеспечиваются условия видимости четырех и более спутников, что дает возможность автономного предоставления навигационных услуг потребителям.

В докладе рассматриваются варианты развертывания низкоорбитального дополнения системы ГЛОНАСС, определяются критерии выбора и принципы орбитального построения системы, состав наземного сегмента. Приводятся предложения по составу и характеристикам бортовой аппаратуры низкоорбитальных навигационных спутников.

Отработку технологии использования низкоорбитального сегмента ГЛОНАСС предлагается реализовать на базе спутников орбитальной группировки «Гонец-М». С учетом незначительного дооснащения бортовой аппаратуры КА в ближайшей перспективе станет возможным обеспечить многократное непрерывное покрытие измерениями по всем орбитам навигационных спутников ГЛОНАСС, что откроет дополнительную возможность повысить точность ЭВО и реализовать глобальный мониторинг целостности навигационного поля без необходимости развертывания обширных наземных сетей станций мониторинга.

Литература

1. Kepler. 3rd generation Global Navigation Satellite System [Электронный ресурс]. URL: https://www.kepler.global/conf/system/ (дата обращения 12.03.2023).

2. Yang Long «The Centispace-1: A LEO Satellite-Based Augmentation System», 14th Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems, 2019.

Апробирование метода исключения полиномиального тренда из измерений параметров вращения Земли с помощью двойного вейвлет-преобразования

С. Л. Пасынок

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

При изучении вариаций ПВЗ необходимо корректно исключить из результатов измерений долгопериодический тренд. Как правило, это осуществляется применением соответствующего фильтра [1] или прямого вейвлет-преобразования [2]. Однако успех результата такой операции зависит от формы фильтра или применяемых базисных функций (в случае вейвлет-преобразования) и неоднозначен. В настоящем докладе предлагается для этой цели применять метод двойного вейвлет-преобразования, который позволяет полностью исключить полиномиальный тренд из результатов измерений без искажения формы высокочастотной части исходного сигнала.

Метод был использован для исключения долгопериодического полиномиального тренда из наблюдаемых значений ПВЗ и последующего уточнения коэффициентов осредненных моделей сезонных вариаций угловой скорости вращения Земли и движения земного полюса.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения метода двойного вейвлет-преобразования для решения этой задачи.

Литература

1. Vondrak J., Cepek A. Combined smoothing method and its use in combining Earth orientation parameters measured by space techniques // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. № 147. 2000. P. 347–359.

2. Курбасова Г. С., Рыхлова Л. В., Вейвлет-анализ многолетнего смещения полюса Земли // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 9 (111). С. 128–137.

Текущее состояние работ ГМЦ ГСВЧ в части определения ПВЗ

С. Л. Пасынок[1], С. Ю. Антропов[1], И. В. Безменов[1], А. Э. Дроздов[1], В. Е. Жаров[2], И. Ю. Игнатенко[1], Е. Н. Цыба[1], В. Н. Федотов[1]

[1]ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия
[2]ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

В Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения ПВЗ (ГМЦ ГСВЧ) проводится большой объем работ в области определения и прогнозирования ПВЗ [1]. Прежде всего это работы по осуществлению мероприятий в рамках ГСВЧ, которые включают: проведение навигационных и спутниковых лазерных дальномерных измерений на пунктах метрологического контроля Росстандарта, расположенных в городском поселении Менделеево и городах Новосибирск, Иркутск, Хабаровск и Петропавловск-Камчатский; обработку результатов ГНСС-, СЛД- и РСДБ-измерений ГСВЧ и международных служб; определение ПВЗ в рамках отдельных методов измерений; совместную обработку данных измерений и результатов определения ПВЗ в рамках отдельных методов измерений; а также формирование справочной информации о ПВЗ и ее распространение. Роль ФГУП «ВНИИФТРИ» в качестве ГМЦ ГСВЧ закреплена Постановлением Правительства РФ № 225.

Также в ГМЦ ГСВЧ ведутся работы по эксплуатации средств определения и прогнозирования ПВЗ на основе совместной обработки файлов измерений в формате SINEX, коррелятора ГМЦ ГСВЧ и спутниковой дальномерной лазерной станции КСФО ГЛОНАСС «Точка», СОД Росстандарта; проводятся исследования по вычислению орбит и поправок часов КА, а также по обработке данных спутниковых альтиметрических измерений. В докладе кратко рассмотрено текущее состояние этих работ.

Литература

1. Pasynok S., Bezmenov I., Ignatenko I., et al. Current state and future plans of the Earth's orientation parameters evaluation activities in MMC SSTF // Proceedings of the VAK-2021 conference / Ed. by A. M. Cherepashchuk, et. al. Janus-K, 2022. P. 103–104.

Вариации параметров движения земного полюса с частотой прецессии лунной орбиты

В. В. Перепёлкин, А. С. Филиппова, А. А. Шабунина

МАИ, г. Москва, Россия

В докладе приводятся результаты исследования динамики возмущенного колебательного процесса земного полюса, синфазного с прецессионным движением лунной орбиты. С помощью численной обработки ряда C01 данных наблюдений и измерений о движении земного полюса на длительном интервале времени начиная с 1900 г. показано наличие колебательного процесса, связанного с прецессионным движением орбиты Луны. Предложено несколько способов преобразования координат земного полюса к системе, в которой его движение происходит синфазно с изменением ориентации плоскости лунной орбиты по отношению к экватору Земли. Параметры преобразования определяются средними параметрами движения земного полюса и не зависят явно от времени. В первом способе преобразования используется только численная обработка данных наблюдений, а во втором — кинематические свойства движения полюса.

Показано, что в новой системе полярный радиус совершает колебания, синфазные с колебаниями угла наклона плоскости лунной орбиты к земному экватору, а колебания полярного угла происходят синфазно с отклонением вдоль экватора точки пересечения лунной орбиты с экватором.

С помощью численного интегрирования уравнений движения земного полюса и обработки данных NCEP/NCAR циркуляции атмосферы и данных NASA/JPL углового момента океана получен вклад основных геофизических возмущений (атмосферного и океанического) в колебательный процесс, синфазный с прецессией лунной орбиты. Показано, что найденные гармоники только частично могут быть обусловлены колебаниями подвижных сред атмосферы и океана.

Литература

1. Перепёлкин В. В., Рыхлова Л. В., Филиппова А. С. Долгопериодические вариации в колебательном процессе земного полюса, вызванные Лунным возмущением // Астрон. Журн. 2019. Т. 96. № 3. С. 255–264.

2. Перепёлкин В. В., Рыхлова Л. В., Вэй Ян Сое О синфазности вариаций параметров движения земного полюса и прецессии орбиты Луны // Астрон. Журн. 2022. Т. 99, № 1. С. 75–87.

Вопросы прослеживаемости результатов калибровки беззапросных радиотехнических измерительных средств в части систематической погрешности псевдодальности к первичным эталонам

Д. С. Печерица, А. М. Каверин, С. Ю. Бурцев

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Систематическая погрешность измерений псевдодальности — существенная составляющая полной погрешности измерений псевдодальности для всех беззапросных измерительных средств из состава наземного сегмента системы ГЛОНАСС и её различных функциональных дополнений. При определённых условиях эта составляющая может считаться постоянной, а значит её можно скомпенсировать по результатам калибровки. При этом требования к измерительным средствам растут, растут соответственно и требования к неопределённости калибровки.

Новые требования касаются не только точностных характеристик, но и усложнения конструкции калибруемых средств. Например, возникает задача удалённой калибровки измерительных средств на большом удалении от эталона, попутной оценки параметров опорного генератора, расширяется номенклатура принимаемых навигационных сигналов и ГНСС, в конструкции калибруемых средств используются адаптивные антенные решётки, направленные антенны и т. п.

В докладе приведена концепция обновлённой схемы прослеживаемости результатов калибровки к первичным эталонам единиц величин, в том числе к новому государственному первичному специальному эталону координат местоположения. Описаны методы калибровки, приведены оценки точности.

Анализ результатов оценивания задержек навигационных сигналов на борту космических аппаратов системы ГЛОНАСС за период 2019-2022 гг.

Д. С. Печерица, Е. А. Карауш

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Существует много исследований, посвященных проблеме определения межчастотных задержек сигналов ГНСС при излучении антенной навигационного космического аппарата (НКА) и при приеме антенной навигационной аппаратуры потребителя. Особое внимание сосредоточено на алгоритмических способах определения таких задержек сигналов для отечественной системы ГЛОНАСС [1–2].

Значения межчастотных задержек сигналов ГЛОНАСС значительно различаются для навигационной аппаратуры различных производителей и для НКА. Решение проблемы калибровки приемников ГНСС осуществляется с помощью метода имитационного моделирования или дифференциального метода на нулевой базовой линии [3]. Однако всё ещё актуальным остается вопрос определения межчастотных задержек сигналов, возникающих при излучении антенной НКА.

Разработанный способ определения значений таких задержек [4] показал принципиальную возможность его применения. В данном исследовании был проведён анализ оценок межчастотных задержек НКА ГЛОНАСС на длительном интервале времени — с января 2019 г. по февраль 2023 г. В качестве исходных данных использованы псевдодальномерные измерения в диапазонах L1, L2, высокоточная эфемеридно-временная информация и суточные сообщения о составе орбитальной группировки [5] за рассматриваемый период. Межчастотные задержки сигналов были оценены для 30 НКА, функционирующих в период наблюдений. Результаты показали случаи кратковременных изменений значений задержек НКА, их нестабильность, а также были идентифицированы особенности некоторых НКА из состава орбитальной группировки ГЛОНАСС.

Литература

1. Wang N., Yuan Y., Li Z., et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations // J. Geodesy. 2016. Vol. 90, Iss. 3. P. 209–228.

2. Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P. Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps // Navigation: Journal of The Institute of Navigation. 2014, no. 61(3). P. 191–201.

3. Печерица Д. С., Федотов В. Н. Калибровка беззапросных измерительных систем ГЛОНАСС с обеспечение прослеживаемости к государственным первичным эталонам единиц величин // VII всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017), 17–21 апреля 2017 г., Санкт-Петербург: тезисы докладов. Спб.: ИПА РАН, 2017. С. 204–205.

4. Карауш Е. А., Печерица Д. С. Оценивание межчастотных задержек навигационных космических аппаратов. Труды ИПА РАН. 2020. № 52. С. 27–30.

5. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения [Электронный ресурс]. URL: https://glonass-iac.ru/.

Комплексная радиотехническая система координатно-временного и информационного обеспечения потребителей как альтернативный инструмент устойчивого навигационного и частотно-временного обеспечения

С. Б. Писарев

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлена комплексная радиотехническая система координатно-временного и информационного обеспечения (КРС КВИО), позволяющая за счет совместного использования разнородных навигационно-временных систем космического и наземного базирования преодолеть недостатки, присущие ГНСС.

Определены характеристики КРС КВИО по точности координатно-временного обеспечения, которые могут быть достигнуты в региональных и локальных зонах.

Представлен состав системы. Предложено в качестве дополняющих навигационно-временных систем использовать ГНСС, сеть импульсно-фазовых передающих станций ДВ диапазона совместно с сетью контрольно-корректирующих станций, а также для отдельных компактных зон, требующих обеспечения повышенных характеристик, — локальную систему навигации.

Приведена структура КРС, описано взаимодействие составных частей системы.

Показано, что КРС КВИО способна стать региональным средством высокоточного, надежного и устойчивого координатно-временного обеспечения.

Литература

1. Шебшаевич В. С. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М: Радио и связь, 1993. 408 с.
2. Соненберг Г. Д. Радиолокационные и навигационные системы. Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1982. 400 с.

Результаты последнего уравнивания ФАГС в системе ITRF

В. В. Попадьёв

ППК «Роскадастр», г. Москва, Россия

Реализации земных систем координат в XX веке прошли путь от каталогов разрозненных астрономо-геодезических сетей до постоянно действующих станций.

Основным материалом для получения рядов координат пунктов ФАГС в системе ITRF стали результаты обработки и уравнивания измерений с п. ФАГС за 2015–2022 гг. (п. 5.2. НИР «ГЕОКАРТА-2030»). За исходные взяты пункты из ядра IGS, обеспечивающие глобальное встраивание ФАГС в каркас IGS.

Обработка и уравнивание выполнены «в четыре руки» в 2022 г.: Г. Э. Мельник (GAMIT), Т. Л. Сидорова-Бирюкова (GAMIT), к. т. н. Н. А. Бовшин (GeoMASTER), к. т. н. В. А. Луповка (BERNESE).

В зависимости от уровня точности решаемых задач результаты уравнивания сети могут быть интерпретированы в виде системы координат с разным нарастающим уровнем детализации:

1. Координаты пунктов сети, фиксированные на всё время вплоть до введения другой реализации системы координат.

Типичным примером таких систем являются «статические» системы координат: 1932, 1942 и 1995 гг. При этом накопление ошибок линейно-угловых измерений слабо чувствительно к геодинамическим изменениям земной коры, вертикальные движения земной коры оцениваются с помощью геометрического нивелирования. Такая реализация обеспечивает обработку и уравнивание геодезических построений, создаваемых наземными методами: триангуляции, полигонометрии, трилатерации — применение этих относительных методов обеспечивает приведение на единую стандартную эпоху.

2. Координаты пунктов сети, фиксированные на определённую стандартную эпоху.

Пример реализации — координаты пунктов ГГС России в системе ГСК-2011, приведение на стандартную эпоху осуществляется косвенным образом с помощью параметров международной системы координат ITRF, в которой ГСК-2011 тождественна ITRF-2008 на эпоху 2011.0 по определению.

3. Координаты пунктов сети фиксированы на определённую стандартную эпоху, имеются оценки линейных «скоростей» изменения координат для приведения к некоторой эпохе, близкой по времени к стандартной эпохе.

Скорости пунктов IGS используются для приведения на эпоху измерений лишь самих пунктов IGS, принимаемых за опорные (твёрдые), при этом их прямое интерполирование на п. ФАГС безосновательно, поскольку для этого нужно принимать гипотезу твёрдости некоторой тектонической плиты, а также предположение об отсутствии локальных движений земной коры или неподвижности ос-

нования пункта. Оценка линейных и нелинейных изменений положений п. ФАГС должна выполняться только на основании их обработки.

4. Координаты пунктов сети фиксированы на определённую стандартную эпоху, имеются оценки линейных «скоростей» изменения координат для приведения к некоторой эпохе, также близкой по времени к стандартной эпохе.

При этом периодические нелинейные вариации учитываются с помощью гармонического анализа (например разложения в ряд Фурье). Разрывные эффекты на границах тектонических образований могут быть учтены отдельно в небольшой окрестности, например с помощью локальной матрицы поправок.

Для приведения координат между эпохами (на начало года или внутри года) могут использоваться параметры линейного преобразования, которые вычисляются авторами системы координат или потребителями.

5. Геофизические интерпретации, например, о минимуме изменений системы координат относительно выбранной эпохи, выделение тектонических образований, их полюсов и параметров вращения, выделение дополнительных тектонических границ и др. могут быть использованы в качестве дополнительных путей повышения и подержания точности.

Полученные временные ряды геоцентрических координат п. ФАГС и их изменения в топоцентрической системе сглажены с помощью линейно-гармонической аппроксимации, где сначала выделяется и удаляется линейный (многолетний) тренд в изменении координат (к примеру, X) в виде:

$$X(MJD) = a \cdot MJD + b,$$

что эквивалентно принятой в практике модели

$$X(MJD) = X_0 + vX \cdot \left(MJD - MJD_0\right),$$

где X_0 — положение пункта на стандартную эпоху, при этом

$$a = v_X, \quad b = -v_X \cdot MJD_0,$$

где многолетняя скорость изменения v_X выражена в м/сут. В итоге положение пункта на любой момент времени представлено следующим образом:

$$\begin{gathered} X(MJD) = X_0 + v_X \cdot \left(MJD - MJD_0\right) + \\ + C_1 \cos \omega MJD + S_1 \sin \omega MJD + \\ + C_2 \cos 2\omega MJD + S_2 \sin 2\omega MJD + \cdots, \end{gathered}$$

где круговая частота $\omega = 2\pi/365$, гармонические коэффициенты C_n, S_n учитывают внутригодовые вариации координат пункта. Коэффициенты X_0, $v_X = 0$, C_n, S_n наиболее стабильных пунктов — исходный материал для задания системы координат на территории страны.

Погрешности оценки ионосферной задержки сигналов ГЛОНАСС по двухчастотным фазовым измерениям

В. Б. Пудловский

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Обработка сигналов ГНСС в двух диапазонах частот позволяют определять задержку навигационного сигнала за счет рефракции в ионосфере, а также полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы. Большинство используемых методов оценки ионосферной задержки основаны на обработке совместных измерений по коду и фазе несущей частоты в двух диапазонах сигналов навигационного спутника. Для этих методов необходимо оценивать значения систематических ошибок, связанные с различной задержкой сигналов в разных диапазонах частот в радиочастотном тракте передатчика спутника и приемника навигационной аппаратуры, называемые дифференциальными кодовыми задержками [1].

Для исключения влияния дифференциальных кодовых задержек на погрешность оценки наклонного ПЭС предложен метод обработки только одновременных фазовых измерений в разных диапазонах частот по сигналам двух или трёх спутников ГЛОНАСС [2]. Для разрешения неоднозначности фазовых измерений эти спутники должны иметь близкое угловое положение относительно приёмника.

Приведен состав источников неопределенности полученных оценок задержки в ионосфере и ПЭС. По результатам обработки нескольких суточных измерений получены погрешности оценки наклонного ПЭС относительно значений вертикального ПЭС из центра CODE [3]. Значение погрешности оценки наклонного ПЭС данным двухчастотным фазовым методом не превысили 2 TECU (с вероятностью 0.95).

Литература

1. Ясюкевич Ю. В., Мыльникова А. А., Куницын В. Е., Падохин А. М. Влияние дифференциальных кодовых задержек GPS/ГЛОНАСС на точность определения абсолютного полного электронного содержания ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. № 6. С. 790–796.

2. Pudlovskiy V. B. Ionospheric slant total electron content determination from multi-frequency GNSS signals carrier-phase measurements // Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 119168C (15 December 2021) https://doi.org/10.1117/12.2603477.

3. Center for Orbit Determination in Europe (CODE) [Electronic resource]. URL: http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/2021/ (дата обращения: 10.03.2023).

Совершенствование теории высот в гравитационном поле Земли

С. С. Рахмонов, В. В. Попадьев

[1]Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
[2]Институт математики и механики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Сейчас важной научной проблемой геодезии является реализация международной системы высот [1], которая по сути является системой разностей потенциалов. Для представления геопотенциальных чисел в линейной мере можно выбрать нормальные, ортометрические либо динамические высоты. Вокруг этого выбора до сих пор не утихают споры.

Теория высот в гравитационном поле изучена и изложена в трудах многих отечественных и зарубежных ученых. Сейчас мы можем оценить достоинства и недостатки различных трактовок и общие соображения этого вопроса, привести исторический и современный обзор обработки высокоточного нивелирования, рассмотреть нормальную высоту, как элемента теории Молоденского и в отрыве от неё [2].

Целью доклада является сравнение ортометрических и нормальных высот с ранее не рассмотренных позиций: поведение высот на большом и значительном удалении от земной поверхности, оценка возможности точного вычисления на практике при различных исходных данных.

Сложности вычисления геоида и ортометрической высоты связаны с недостаточностью знаний о строении всей Земли. Можно рассмотреть три способа практического определения геоида [3, 4]: с использованием скважинного гравиметра в вертикальной шахте; геометрическое нивелирование вглубь карьера; строго горизонтальная шахта от берега или футштока. Эти три практических способа определения геоида до сих пор не применены на практике. Нормальная высота была введена Молоденским в качестве вспомогательной высоты при решении геодезической краевой задачи, определена им как «ортометрическая высота в нормальном поле». Аналогом геоида в нормальном поле является уровенный эллипсоид, а не квазигеоид.

Для выбора подходящей системы справедливо выполнить сравнение вычисленных ортометрических и нормальных высот. Поскольку в реальности строение Земли точно неизвестно, сравнить системы высот возможно только на физической модели. Интересные результаты можно наблюдать в условиях горных районов, поскольку разность между системами высот будет сильно выражена. В качестве физической модели можно создать модель одиночной горы в виде однородного шара, наполовину погруженного в отсчетную поверхность, и вычислять все элементы реального поля и все высоты (об этом был доклад В. В. Попадьёва «Сравнение нормальной и ортометрической систем высот» в 2019 г.).

Криволинейный интеграл, соответствующий нормальной высоте, можно вычислять вдоль трёх направлений: по нормали к поверхности эллипсоида,

по силовой линии нормального поля силы тяжести, вдоль координатной линии сфероидальной системы координат [1, 4]. Определение нормальной высоты как длины нормали к эллипсоиду не имеет физического смысла, а как длины силовой линии — имеет, и такой способ определения нормальной высоты является более правильным, но он не лишен недостатка: у нескольких точек на одной сильно удаленной уровенной поверхности могут быть весьма разные длины силовых линий. В публикации [5] предложен способ вычисления нормальной высоты как длины координатной линии сфероидальной системы, рабочие формулы исправлены и модифицированы в [1, 4].

Литература

1. Попадьев В. В., Рахмонов С. С. Способ высокоточного вычисления нормальной высоты как длины координатной линии на произвольных расстояниях от Земли // Геодезия и картография. 2022. Т. 83, № 11. С. 12–20. Doi: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-12-20.
2. Попадьев В. В., Мосолкова И. Ю., Рахмонов С. С. Оценка изложения теории высот в отечественной литературе // Геодезия и картография. 2021. Т. 82, № 10. С. 52–63. Doi: 10.22389/0016-7126-2021-976-10-52-63.
3. Popadyev V., Rakhmonov S. Some remarks about orthometric and normal height systems // EGU General Assembly 2022. Vienna, 23–27 May 2022. EGU22-10246. URL: https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10246, 2022 (дата обращения 3.03.2023).
4. Popadyev V., Rakhmonov S. High-precision calculating the normal height as the coordinate line's length // EGU General Assembly 2023. Vienna, 24–28 Apr 2023. EGU23-3334. URL: https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-3334 (дата обращения 3.03.2023).
5. Юркина М. И. Чтобы уточнить высоту до долей миллиметра // Геодезистъ. 2004, № 2. С. 19–20.

Сравнение характеристик бортовых стандартов частоты на основе высокоточных данных международной службы ГНСС

А. В. Сальцберг, К. Г. Шупен, О. Е. Нечаева

ААО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

В связи с широким распространением ГНСС во всех сферах современного общества постоянно повышаются требования, предъявляемые к точности предоставляемых навигационных услуг. В свою очередь, точность навигации потребителя в значительной степени определяется свойствами квантового стандарта частоты (КСЧ), функционирующего на борту КА ГНСС. Тип КСЧ и его характеристики имеют решающее значение для построения стратегии синхронизации времени в ГНСС с целью уменьшения погрешности прогнозирования расхождения бортовых шкал времени (БШВ) КА относительно шкалы системного времени ГНСС. Вклад погрешности прогнозирования расхождения шкал времени в значение эквивалентной погрешности измерения дальности потребителя определяет точность навигационных и координатно-временных определений по сигналам КА ГНСС.

В докладе показаны результаты анализа характеристик бортовых КСЧ разных типов и оценки потенциальной точности синхронизации БШВ КА различных ГНСС на основе реальных данных.

Представлены оценки точностных характеристик (ТХ) бортовых КСЧ за 2022 г. на основе высокоточных апостериорных данных ИАЦ КВНО [1], находящихся в открытом доступе. Выполнено их сравнение с полученными ранее результатами за 2020 г. [2]. Приведена интерпретация полученных результатов с точки зрения анализа состава шумов, присущих различным типам КСЧ. Получены минимальные значения достижимой точности прогнозирования частотно-временных поправок к БШВ КА и их вклад в эквивалентную погрешность дальности потребителя за счет космического сегмента ГНСС. Отдельное внимание уделено сопоставлению ТХ демонстрируемых КСЧ различного типа.

Показано, что сравнительный анализ ТХ КСЧ, применяемых в современных ГНСС, позволяет наилучшим образом отслеживать и учитывать особенности поведения каждого бортового КСЧ в составе ГНСС при эксплуатации.

Литература

1. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) ФГУП ЦНИИмаш. Прикладной потребительский центр [Электронный ресурс]. URL: https://www.glonass-iac.ru/.

2. Сальцберг А. В., Шупен К. Г., Феоктистов А. Ю. Оценка состояния бортовых стандартов частоты глобальных навигационных спутниковых систем в процессе эксплуатации // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 11. С. 151–160.

Комплекс средств подтверждения характеристик сложных комплексированных навигационных систем

С. Г. Серко, А. А. Мусин

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, г. Мытищи, Россия

Проведена оценка характеристик комплексированной навигационной системы с применением комплекса средств подтверждения характеристик сложных комплексированных навигационных систем

Потребность определять собственные координаты объекта (потребителя) имеет тысячелетнюю историю, а методы ее реализации постоянно совершенствуются. Наиболее распространенными из них являются применение навигационной аппаратуры потребителя (НАП) и инерциальных навигационных систем (ИНС).

У НАП при большой динамике движения потребителя снижается точность навигационного решения и помехоустойчивость, параметры ориентации потребителя также не обеспечиваются надлежащим образом.

ИНС, напротив, лишены этих недостатков (точно определяют параметры ориентации потребителя), но при определении координат и скорости потребителя постоянно накапливают ошибку. НАП в подавляющем большинстве случаев являются средствами измерений утвержденного типа. Оценка соответствия их характеристик проводится по утвержденным методикам поверки с применением имитаторов сигналов ГНСС и (или) с применением аттестованных геодезических пунктов. ИНС не являются средствами измерений, оценка их точностных характеристик проводится с применением механических стендов по методикам производителей.

Для компенсации недостатков НАП и ИНС разрабатывают комплексированные навигационные системы с целью получения совместного навигационного решения. Комплексирование объединяет достоинство двух систем, в результате чего повышается точность и помехоустойчивость системы в целом. Такие комплексированные навигационные системы обычно называют инерциально-спутниковыми навигационными системами (ИСНС). ИСНС широко применяются в различных областях авиации, морском флоте, различных наземных системах и т. п. В связи с этим существует большое количество разновидностей ИСНС, отличающихся габаритами и технической реализацией.

Подтверждение характеристик ИСНС на этапах разработки, выпуска из производства, а также при эксплуатации является важной, нужной и в тоже время непростой задачей. Для подтверждения характеристик ИСНС применяются комплексы, сочетающие в себе прецизионные механические и радиотехнические устройства. Механическими устройствами являются стенды (стенд наклонно-поворотных перемещений, центростремительных ускорений, линейных перемещений) позволяющие имитировать физическую траекторию движения, скорость ее изменения с нормированными метрологическими характеристиками и оценивать характеристики инерциальной части ИСНС. Радиотехническими устройствами

являются имитаторы сигналов ГНСС, позволяющие создавать искусственное навигационное поле с нормированными метрологическими характеристиками, воспринимаемое спутниковой частью ИСНС как реальное навигационное поле ГНСС. В данных комплексах необходимо очень точно синхронизировать траектории движения, воспроизводимые имитатором сигналов ГНСС и механическими стендами.

Также могут проводиться натурные испытания с применением мобильных лабораторий и специализированных трасс.

На территории Главного центра расположен комплекс, включающий в себя: стенд испытаний на воздействие вертикальных и горизонтальных перемещений, стенд испытаний на воздействие наклонно-поворотных перемещений и температуры, стенд испытаний на воздействие центростремительных ускорений и температуры, мобильная лаборатория испытаний сложных комплексированных навигационных систем. Данный комплекс предназначен для измерений точностных характеристик: ИСНС, НАП (аппаратуры спутниковой навигации), ИНС, используемых в современных и перспективных образцах. Комплекс имеет возможность формирования и выдачи сигналов ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou, QZSS и средств функциональных дополнений. Кроме того, стенд испытаний на воздействие наклонно-поворотных перемещений и температуры и стенд испытаний на воздействие центростремительных ускорений и температуры оснащены термокамерой для проведения испытаний в различных температурных режимах.

Для оценки возможности применения комплекса был проведен эксперимент по оценке характеристик ИСНС для наземных транспортных средств LANDINS 6005216 производства компании IXSEA.

В ходе испытаний были получены результаты эксперимента горизонтальных перемещений ИСНС в плоскости широта-долгота на стенде испытаний на воздействие вертикальных и горизонтальных перемещений и углового перемещения ИСНС в плоскости широта-долгота без изменения высоты на стенде испытаний на воздействие наклонно-поворотных перемещений и температуры. Оценка характеристик ИСНС проводилась в двух режимах работы: комплексированное решение (с коррекцией по сигналам ГНСС), решение только по ИНС (без коррекции по сигналам ГНСС).

Эксперимент показал, что комплекс позволяет подтверждать характеристики ИСНС типа LANDINS.

Литература

1. Перов А. И. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. М.: Радиотехника, 2020. 1072 с.

2. Анучин О. Н., Емельянцев Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб.: Государственный Научный Центр Российской Федерации, 1999. 357 с.

3. Шатилов А. Ю., Нагин И. А. Тесносвязанный алгоритм комплексирования НАП СРНС многоцелевого ИНС. М.: Радиотехника, 2012. 420 с.

Перспективное координатно-временное навигационное обеспечение потребителей повышенной точности на базе СДКМ-КФД

В. Г. Сернов, Д. В. Филимонова, Ю. В. Исаев

АО «Российские космические системы», г. Москва, Россия

В целях повышения точности КВНО потребителей РФ зачастую используют зарубежные навигационные сервисы, такие как TerraStar-L, Starfix, Leica xRTK, Trimble RTX, StarFire, обеспечивающие широкий диапазон точностей от 4 см до 1 м (СКО) [1].

В современных условиях отказ иностранных поставщиков от поставки оборудования и ПО, сервисной и технической поддержки ставит под угрозу развитие и качество работы существующих средств высокоточной навигации в РФ.

В тоже время рамках государственной программы АО «Российские космические системы» разработана система широкозонной дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ-КФД) [2]. Основой СДКМ-КФД является сеть контрольно-корректирующих станций, информация с которых передается в центр обработки данных (ЦОД). ЦОД вырабатывает ионосферные поправки (ионосферная сетка) и корректирующие поправки к параметрам орбит всех навигационных спутников, которые применены в любой точке территории РФ.

Проведенные исследования показали, что применение корректирующей информации СДКМ-КФД совместно с измерительной информацией серийно поставляемых навигационных приемников позволяет потребителям определять свое местоположение с точностью 0.5 м, что является достаточным для выполнения широкого ряда потребительских задач [3].

Использование корректирующей информации СДКМ-КФД возможно с существующим парком навигационной аппаратуры. Для этого необходимо на потребительской стороне обеспечить преобразование широкозонных поправок в информацию, принимаемую конкретным типом аппаратуры. При этом погрешность определения положения с использованием преобразованных поправок СДКМ-КФД не будет зависеть от расстояния до станции СДКМ-КФД.

Таким образом, используя каналы связи на базе существующих российских КА-ретрансляторов для доведения информации СДКМ-КФД до потребителя при использовании алгоритмов преобразования поправок, можно обеспечить повышенную точность определения координат потребителей на всей территории РФ вне зависимости от доступности зарубежных навигационных сервисов, что может быть применимо для ряда специализированных задач в морских, железнодорожных, сельскохозяйственных, нефтегазовых и других областях.

Литература

1. Trimble RTX [Электронный ресурс]. https://www.aspector.ru/category/trimble-rtx/ (дата обращения: 20.02.2023).

2. Сернов В. Г., Куршин В. В., Исаев Ю. В., Филимонова Д. В. Российское широкозонное функциональное дополнение СДКМ и возможности его развития // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ, 2022.

3. Радионавигационный план Российской Федерации. Утвержден приказом Минпромторга России от 4 сентября 2019 г. №3296. Москва, 2019.

Определение координат и времени пункта по локальным радиосигналам

С. С. Смирнов[1,3], С. Д. Петров[1] Д. А. Трофимов[1], И. В. Чекунов[2]

[1]СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия
[3]ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Определение координат пунктов или транспортных средств на суше, воде и в воздушном пространстве является одной из основных практических задач астрономии. В настоящее время данные задачи, особенно для транспорта, решаются, как правило, с помощью ГНСС. Можно говорить о практически безальтернативном господстве ГНСС при решении этих задач в повседневной деятельности. Сложившееся положение представляется опасным, так как работоспособность ГНСС может быть нарушена в результате применения средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) как путем подавления сигнала, так и путём его подмены ложным сигналом (спуфинг). Данная проблема известна давно, постоянно идёт развитие технологий, алгоритмов обработки, которые повышают устойчивость ГНСС к применению РЭБ, однако из-за низкой мощности навигационных спутниковых сигналов в силу ограничений энерговооруженности навигационных космических аппаратов (НКА) ГНСС полностью полагаться на данные технологии и алгоритмы нельзя, вероятность полного подавления сигнала ГНСС остается значимой. Кроме того, возможна ситуация выхода ГНСС из строя по причине кибератаки или непреднамеренного сбоя. Необходимы резервные способы определения координат, способные заменить ГНСС в случае их недоступности.

До появления ГНСС основными методами определения координат для транспортных средств были методы практической астрономии, наземные радионавигационные системы и инерциальные навигационные системы. Методы практической астрономии можно считать неуязвимыми для РЭБ, точными и оперативными, особенно при условии применения современной элементной базы и автоматизированной обработки наблюдений, однако сильно метеозависимыми. Инерциальные навигационные системы достаточно быстро теряют точность определения координат для подвижного объекта, необходима постоянная коррекция данных систем на основе координатно-временной информации, полученной иными методами. Наземные радионавигационные системы, как правило, создавались достаточно давно, они не обеспечивают глобального охвата, и точности не сопоставимы с ГНСС. Отсюда видно, что есть потребность во всепогодном оперативном методе определения координат, который является резервным по отношению к ГНСС.

Таким методом может стать локальная радионавигационная система нового типа. Подобные работы ведутся за пределами нашей страны. В качестве прототипа подобных систем можно рассматривать систему DORIS, построенную на наземных радиомаяках. Приемная аппаратура DORIS устанавливается на научных космиче-

ских аппаратах и используется для построения их точных орбит. Более близким примером того, что может быть использовано для задач практической навигации, является навигационная система STOIC, разрабатываемая в США для нужд вооруженных сил. Данная система основана на наземных радиомаяках, может быть оперативно развернута на какой-либо местности для навигации в её окрестности. Предусмотрены специальные режимы работы для обеспечения устойчивости к РЭБ.

В работе предложена локальная радионавигационная система, имеющая следующие особенности: дальномерный принцип работы (передача навигационного сигнала с дальномерным кодом); основной элемент системы — компактный автономный радиомаяк, оснащенный хранителем времени и частоты, с необходимой стабильностью; частотные характеристики навигационного сигнала могут меняться по специальному алгоритму для обеспечения устойчивости к РЭБ. Данная система построена по очень похожим на ГНСС-принципам, что позволяет использовать отработанные алгоритмы и технологии. В то же время применение наземных радиомаяков даст возможность практически неограниченно повышать мощность радиосигнала, что вместе со сменой частоты позволит минимизировать влияние РЭБ.

На основе программно-определяемого радио создан макет локальной радионавигационной системы, который в настоящее время состоит из четырех радиомаяков и приемника навигационного сигнала. Принципы постройки системы взяты из системы GPS, однако кодирование сигналов производится по образцу ГЛОНАСС. Были проведены практические испытания, показавшие принципиальную работоспособность системы, достигнуты точностные характеристики на уровне нескольких дециметров. Испытания показали чувствительность системы к переотражениям, особенно в ближней зоне. Для повышения точности необходимо применить алгоритмы фильтрации сигналов, применяемые в современных навигационных приёмниках, что в перспективе позволит достичь сантиметрового уровня точности координатных определений.

Адаптивная коррекция искаженных измерений тропосферной задержки прохождения радиосигнала в режиме реального времени

В. Г. Стэмпковский

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Измерение тропосферной задержки прохождения радиосигнала в режиме реального времени доступно только с использованием радиометров водяного пара [1]. Подверженность измерений радиометров искажениям в неблагоприятных погодных условиях затрудняет их практическое использование [2]. Идентификация проблемных измерений и их коррекция на основе адаптивного подхода рассматриваются как метод повышения достоверности результатов.

Предлагаемый метод корректировки результатов измерений основан на использовании базы данных наблюдений, рассматриваемых как эталонных. Статистический анализ годовых рядов наблюдений позволяет оценить параметры процесса изменения величины задержки во времени. Для каждого годового интервала времени такие параметры, как минимальное возможное значение, максимальное и среднее оцениваются независимо. Полученные значения используются в эвристическом алгоритме коррекции, в котором задействованы еще четыре параметра, имеющие физический смысл. Это максимальные значения первой производной измеряемой величины (в данном случае задержка). Причем каждое из значений применяется в зависимости от предшествующего и текущего значения самой измеряемой величины.

Метод опробован на фактических и синтезированных данных, он показал удовлетворительные результаты и устойчивость при фильтрации искажений.

Литература

1. Niell A. E., Coster A. J., Solheim F. S., et al. Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI // J. Atmospheric and oceanic technology. 2001. Vol. 18. P. 830–850.

2. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмпковский В. Г., Шишикин А. М. Определение влажной тропосферной задержки по данным радиометра водяного пара в неблагоприятных погодных условиях // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 45. С. 9–13.

Прогнозирование величины задержки прохождения радиосигнала в тропосфере на основе статистического анализа

В. Г. Стэмпковский

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Прохождение радиосигнала в тропосфере вносит погрешность позиционирования средствами ГНСС. Моментальная оценка задержки прохождения радиосигнала в газовой среде требует специальных технических средств и в большинстве случаев использования навигационных средств недоступна. В то же время, состояние тропосферы обладает некоторой стабильностью и сезонной повторяемостью. Последнее открывает возможность применения статистического анализа истории наблюдений для прогноза оценки максимальной погрешности позиционирования, вызываемой тропосферной задержкой прохождения радиосигнала.

Наличие сети ГНСС-станций и базы данных с результатами наблюдений и оценками величины тропосферной задержки [1] в местах размещения станций создают основу для обобщения и интерполяции результатов оценивания в произвольной географической точке. Полученные результаты с использованием аппроксимации специального вида годовых наблюдений и интерполяции с определением достаточного набора станций методом нелинейной оптимизации могут быть использованы для предварительной оценки точности позиционирования в произвольном месте нахождения приемника ГНСС-сигналов.

Более эффективно данный подход может быть применен для получения параметров алгоритма коррекции данных радиометра, для которого нет эталонного ряда наблюдений (для близко расположенного ГНСС-приемника). Результат интерполяции позволяет применить синтез случайного процесса изменения тропосферной задержки для решения оптимизационной задачи нахождения требуемых параметров алгоритма.

Литература

1. NASA. Earthdata [Электронный ресурс]. https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/troposphere/zpd/ (дата обращения 10.04.2023).

Автоматизированная фокусировка антенной системы радиотелескопа РТ-32

В. Г. Стэмпковский, М. А. Шишикин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Сфокусированность антенной системы (АС) радиотелескопа РТ-32 достигается механическими средствами и на нее оказывают влияние постоянно действующие факторы, такие как жесткость и сбалансированность конструкции АС. Гомологичность главного зеркала АС компенсирует гравитационные деформации. Однако в виду того, что АС многодиапазонная и фазовые центры приемников разных диапазонов имеют разные координаты в системе координат главного зеркала, гомологичность лишь частично облегчает задачу обеспечения сфокусированности АС. Исходная фокусировка с использованием обратной связи по величине принимаемого сигнала осуществляется с использованием ручного управления. Во время наблюдений расфокусированность компенсируется автоматическим введением поправок к координатам главного зеркала АС из специально подготовленной базы данных.

Ручная фокусировка ввиду ее трудоемкости проводится на фиксированном угле места близком к 45 градусов. Но гравитационное воздействие распространяется не только на главное, но и вторичное зеркало, нарушая тем самым сфокусированность АС. Автоматизированная, а в перспективе и автоматическая фокусировка позволят более полно использовать возможности АС т.к. не ограничены каким-то одним положением выполнения процедуры фокусировки.

Предлагаемая реализация автоматической фокусировки основана на создании математической и программной модели радиотелескопа. На модели имитируется сканирование окрестности некоторого космического источника (плоский фронт) с записью регистрируемого сигнала. Многократное сканирование при различных координатах вторичного зеркала формирует базу данных сканов. Каждому скану приписываются в виде атрибутов координаты. Непосредственно фокусировка осуществляется из некоторого положения АС получением двух сканов по координатам главного зеркала и поиском в базе данных на совпадение с образцами сканов с заданной точностью. Если совпадение достигнуто, то определяется поправка положения вторичного зеркала для лучшей сфокусированности АС.

Исследование переходных и колебательных процессов в движении антенной системы при сопровождении космического источника радиосигнала

В. Г. Стэмпковский, М. А. Шишикин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Алгоритм сопровождения в целом обеспечивает потребности наблюдений в режиме РСДБ и радиометрическом режиме. Однако при выполнении специальных задач, таких как поиск поправок и сканирование, переходные процессы могут быть объектом пристального внимания, т. к. при этом происходит нежелательное раскачивание антенной системы (АС).

Целью исследования указанных процессов является развитие модели антенной системы [1]. Создание адекватной модели, на которой алгоритмы управления дают такой же результат, как и на объекте управления. Наличие адекватной модели позволяет разработать и отладить алгоритмы управления без разрушающего влияния на АС. Успешная разработка алгоритма сопровождения на математической модели АС была осуществлена при создании системы управления макета РСДБ-радиотелескопа [2]. Средством достижения поставленной цели служит программный инструмент записи телеметрии, включающей целеуказание, текущие координаты, текущее управляющее воздействие (управляющее напряжение на приводе). Воспроизведение записанной телеметрии на модели с параллельной отработкой целеуказания позволяет итеративно корректировать модель АС.

Воспроизведение телеметрии занимает такое же время, как и запись, поэтому визуальный анализ различий поведения модели и объекта управления АС представляет собой трудоемкую задачу. Автоматизация данного процесса, с одной стороны, облегчает создание модели, с другой, когда модель станет достаточно адекватной, автоматический анализ телеметрии может стать средством оперативной диагностики состояния АС.

Литература

1. Стэмпковский В. Г. Математическая модель антенной системы // Труды ИПА РАН. 2012 Вып. 24. С. 87–91.
2. Быков В. Ю., Стэмпковский В. Г., Шишикин А. М. Антенная система прототипа мобильного РСДБ-радиотелескопа // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 46. С. 10–18.

РСДБ-коррелятор с обратной связью для обработки наблюдений искусственных спутников Земли

И. Ф. Суркис

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Существующие РСДБ-корреляторы [1,2] ведут обработку наблюдений по «моделям» — заранее вычисленным предварительным значениям геометрических задержек. Модели используются корреляторами для сопровождения сигналов по задержке и доплеровской частоте. Для правильной работы коррелятора модели должны быть достаточно точными — с ошибкой в пределах сотен нс и ошибкой скорости изменения десятки пс/с. Недостаточная точность модели приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и искажению результатов работы коррелятора.

Как правило, для РСДБ-наблюдений квазаров и других космических объектов с известными координатами условие корректности модели выполняется. Однако при наблюдении искусственного спутника Земли (ИСЗ), параметры движения которого предварительно известны с низкой точностью, ошибка модели велика. В этом случае корреляционная обработка РСДБ-наблюдений проводится по крайней мере в две итерации, после первой корреляционной обработки модель уточняется, и обработка повторяется [3].

В 2022 г. в ИПА РАН разработана «лабораторная установка» программного РСДБ-коррелятора с обратной связью. Реализующий FX-алгоритм обработки коррелятор перед началом обработки получает только одно «грубое» значение задержки и скорости ее изменения. Далее коррелятор ведет обработку, после каждого периода накопления корректирую значения задержки и скорости ее изменения и используя данные для следующего периода.

Коррелятор проверен на обработке сканов РСДБ-наблюдений ИСЗ.

Литература

1. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента, 2018. Вып. 6. С. 8−16.

2. Deller A. T., Brisken W. F., Phillips C. J., et al. DiFX-2: A more flexible, efficient, robust, and powerful software correlator // PASP. 2011. Vol. 123, 275. Doi: 10.1086/658907.

3. Васильев М. В., Зимовский В. Ф., Мельников А. Е. и др. Наблюдения космических аппаратов на радиоинтерферометрическом комплексе “ Квазар-КВО // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 6 С. 111–124.

Планирование и обработка дифференциальных РСДБ-наблюдений космических аппаратов ГЛОНАСС

И. Ф. Суркис, И. А. Арнаут, В. Ф. Зимовский, А. С. Кумейко, А. Е. Мельников, С. Р. Павлов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

РСДБ-наблюдения КА и находящихся на близких угловых расстояниях опорных квазаров (дифференциальные РСДБ-наблюдения) являются одним из современных методов уточнения параметров движения космических аппаратов (КА). По наблюдениям квазаров с хорошо известными координатами определяются инструментальные параметры интерферометра (разность хода стандартов времени, атмосферные задержки). Как правило, метод применятся для наблюдения КА дальнего космоса, но может применяться и к искусственным спутникам Земли (ИСЗ).

До 2022 г. в ИПА РАН проводились РСДБ-наблюдения КА [1, 2], но не дифференциальным методом. Эксперименты по улучшению орбиты ИСЗ методом дифференциальных РСДБ-наблюдений проведены в ИПА РАН в 2022 г. КА ГЛОНАСС наблюдались в L1 диапазоне (18 см) на радиотелескопах РТ-32 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

Специально разработанная система планирования дифференциальных РСДБ-наблюдений ИСЗ позволила отобрать десятки опорных квазаров.

Корреляционная обработка наблюдений проведена на корреляторе RASFX. Наблюдения квазаров выполнялись в четырех частотных каналах с шириной полосы по 16 МГц. В ходе постпроцессорной обработки был проведен синтез частотной полосы с получением более точных значений групповых задержек.

Проведен анализ наблюдений КА ГЛОНАСС и уточнены параметры их движения. Результаты анализа приводятся в докладе.

Литература

1. Пасынков В. В., Суркис И. Ф., Титов Е. В. и др. Обработка и анализ РСДБ-наблюдений космических аппаратов системы ГЛОНАСС комплексом «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 61. С. 3–27.
2. Васильев М. В., Зимовский В. Ф., Мельников А. Е и др. Наблюдения космических аппаратов на радиоинтерферометрическом комплексе «Квазар-КВО» // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 6 С. 111–124.
3. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. Вып. 6. С. 8−16.

Отработка методики прогнозирования расхождения шкал бортовых часов с помощью программного имитатора

В. М. Тиссен, А. Ю. Балахненко, В. Д. Рачков

ЗСФ ФГУП «ВНИИФТРИ» г. Новосибирск, Россия

Точность КВНО зависит от множества влияющих факторов, среди которых расхождение шкал бортовых часов относительно шкалы центрального синхронизатора вносит значимый вклад в суммарную погрешность навигационных измерений. Для компенсации этой погрешности рассчитываются частотно-временные поправки (ЧВП) к бортовым часам, которые в составе навигационного сообщения передаются на борт навигационных спутников (НС).

Для оценивания ЧВП используются различные модели ухода бортовых часов. Как правило, эти модели основаны на уравнениях, в которых учитываются сдвиг и дрейф частоты генератора квантовых часов [1]. Шумовые процессы различной природы и мощности приводят к нестабильностям хода часов систематического и случайного характера, оценку величин которых выполнить весьма затруднительно. По этой причине в большинстве случаев принимаются линейные модели, параметры которых переопределяются каждые два часа на предусмотренный период закладки в бортовой компьютер навигационных спутников эфемеридно-временной информации. Однако при увеличении периода закладки эфемеридно-временной информации возникает необходимость в более долгосрочных прогнозах.

Предлагаемая нами прогностическая модель ухода часов навигационных спутников состоит из комбинации полинома второй степени и квазипериодической компоненты, представляющей собой суперпозицию ограниченного числа гармоник, параметры которых оцениваются с помощью МНК. Верификация данной модели выполнялась как по реальным данным рядов ЧВП, так и по данным, синтезированных искусственным путем с помощью разработанного программного имитатора [2]. Полученные результаты показали целесообразность использования программного имитатора для отработки технологии прогнозирования ухода бортовых часов на различные сроки.

Литература

1. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS / пер. с англ. Ю. С. Домнина / под ред. В. М. Татаренкова. М.: Техносфера, 2002. 400 с.
2. Тиссен В. М. Имитационная модель нестабильности атомных часов // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2011. № 3 (16). С. 107–11.

Вариации параметров вращения Земли и их использование для повышения точности прогностических моделей

В. М. Тиссен, А. С. Толстиков, Г. В. Шувалов

ЗСФ ФГУП «ВНИИФТРИ» г. Новосибирск, Россия

С появлением ГНСС и других новых методов космической геодезии точность определений ПВЗ возросла на порядки в сравнении с эпохой астрометрических наблюдений. Развитие средств вычислительной техники открыло новые возможности в исследовании и анализе временных рядов. При исследовании рядов ПВЗ широкое распространение получили методы динамического вейвлет-анализа, сингулярного спектрального анализа, нейронные сети, а также детерменированные модели, применяемые, в частности, в международной службе вращения Земли (МСВЗ) [1–3]. Несмотря на появление многих новых методов, проблема высокоточного прогнозирования ПВЗ остается актуальной, особенно в свете принятия ФЦП развития ГЛОНАСС до 2030 г.

Главными проблемами в прогнозировании ПВЗ являются: зависимость результатов от даты начала прогноза, длины интервала обучающей выборки и применяемого математического метода. Это приводит к погрешностям как аддитивного, так и мультипликативного характера. Для решения перечисленных проблем предложена методика прогнозирования координат полюса и Всемирного времени, основанная на последовательном построении гармонических моделей трендовых, квазипериодических, регулярных и высокочастотных вариаций. Оценка параметров гармонических компонент данных моделей производится с помощью МНК и других статистических методов на интервалах известных данных от 2 до 40 лет в зависимости от вида прогнозируемой вариации. Такой подход к созданию моделей прогноза ПВЗ практикуется впервые, поэтому в настоящее время он находится в стадии доработки и перевода на автоматический режим вычислений.

К числу интересных результатов моделирования можно отнести динамику чандлеровских вариаций, являющихся наиболее значимыми в общем частотном спектре изменений координат полюса x_p, y_p.

На рисунке показаны чандлеровские вариации по двум координатам полюса с января 2000 г. по ноябрь 2022 г.

Обоснованность разработанного метода построения прогностических моделей ПВЗ подтверждается результатами, полученными, в частности, для координат полюса за 2022 г., в сравнении с аналогичными результатами USNO.

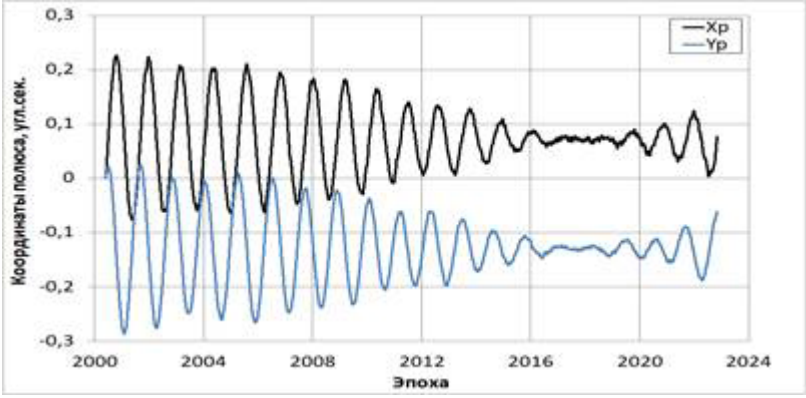


Рис. 1 Изменение амплитуды ЧП по координатам x_p, y_p. 2000–2023 гг.

Таблица 1 Сравнение СКП прогнозов координат полюса за 2022 гг.

СКП, mas прогнозир. параметра	**Участники**	**Дни**				
		1	**10**	**30**	**60**	**90**
x_p	ЗСФ «ВНИИФТРИ»	0.33	3.60	9.55	10.90	14.05
	USNO	0.37	3.80	13.00	20.20	26.50
y_p	ЗСФ «ВНИИФТРИ»	0.25	2.70	8.35	14.70	19.45
	USNO	0.27	3.10	10.25	16.55	29.30

Литература

1. McCarthy D. D., Petit G. IERS Conventions (2003). IERS Technical Note № 32. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004.

2. Гречкосеев А. К., Толстиков А. С., Тиссен В. М. и др. Модификация базового метода сингулярного спектрального анализа для повышения точности прогнозирования неравномерности вращения Земли. Вычислительные технологии. 2020. Т. 25, № 3. С. 54–65.

3. Горшков В. Л. О методах прогнозирования в геодинамике // Известия ГАО РАН. – 2004. – № 214. – С. 313–335.

Фотоэлектронная регистрация звездных прохождений

А. Л. Толстой, С. Д. Петров, Д. А. Трофимов, С. С. Смирнов

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Регистрация звездных прохождений на пассажном инструменте через меридиан или первый вертикал места вплоть до конца прошлого столетия традиционно использовалась для решения таких задач, как абсолютное определение прямых восхождений звезд, долгот пунктов Лапласа, а также Всемирного времени. Последнее время все эти задачи решаются посредством РСДБ, а также радио- и оптических наблюдений ИСЗ в силу высокой точности последних. С другой стороны, РСДБ и спутниковые методы опираются на масштабную инфраструктуру, развитие и эксплуатация которой требует существенных материальных затрат. Вместе с тем современные технологии в области фотоэлектроники, адаптивной оптики и вычислительной техники также развиваются очень быстро и на сегодняшний день позволяют организовать традиционные оптические наблюдения звездных прохождений так, чтобы их точность, если не сравнялась с РСДБ и спутниковыми методами, то, по крайней мере, существенно возросла в сравнении с уровнем девяностых годов прошлого века.

В данной работе предлагается оборудовать классический пассажный инструмент современным приемником излучения. В качестве такого приемника выбрана монохромная КМОП-матрица астрономического типа. Как известно из практики применения подобных матриц, их разрешающая способность при использовании с объективами малой силы за счет программной обработки изображений может достигать десятых долей секунды дуги, несмотря на аномальную рефракцию атмосферы. Применение же средств адаптивной коррекции звездных изображений позволяет достигать разрешающей способности в сотые доли секунды дуги и выше. Кроме того, в отличие от ранее используемых в астрономии ПЗС-матриц, опрос пикселей в КМОП-приемниках выполняется индивидуально и с более высоким быстродействием. Данная особенность КМОП-матриц позволяет рассчитывать, что наряду с высоким пространственным разрешением можно получить также и высокое временное разрешением регистрации звездных прохождений. Это позволит решать такие задачи, как определение прямых восхождений звезд, долгот пунктов и Всемирного времени с точностью, сравнимой с РСДБ и спутниковыми методами.

В работе представлена методика наблюдений на пассажном инструменте, оснащенном КМОП-матрицей, а также даны предварительные результаты наблюдений. В процессе обработки наблюдений было выявлено пагубное воздействие шума с фиксированным распределением (линейчатой структуры присущей кадрам, созданным при помощи КМОП-матриц) на качество автоматизированной обработки изображений. Авторами найдена методика, позволяющая минимизировать воздействие упомянутого выше шума.

Применение излагаемой в данной работе методики обработки изображений, получаемых при помощи астрономической фотокамеры, установленной вместо окуляра в фокальной плоскости пассажного инструмента, позволяет регистрировать прохождения звезд с точностью по времени большей, чем на предшествующем фотоэлектрическом пассажном инструменте за достаточно короткое время. Текущие результаты дают основание полагать, что в итоге разрабатываемый метод позволит определять Всемирное время с точностью не хуже одной миллисекунды времени.

Опыт исследований прилимбовой зоны Солнца по наблюдениям на крупных полноповоротных радиотелескопах

Н. А. Топчило[1], В. Г. Нагнибеда[1], Н. Г. Петерова[2]

[1]СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Одной из проблем исследований атмосферы Солнца, представляющей собой сложное, нестационарное плазменное образование, является прилимбовая зона. Она содержит большое количество 3-мерных структур разных типов и размеров, наблюдение которых в этой зоне сопряжено с большими трудностями как на микроволнах, так и в УФ-диапазоне (LASCO). Обычно используемый в солнечных радионаблюдениях метод прямоугольного картографирования при выделении источника на лимбе Солнца приводит к большим ошибкам.

Для полноповоротных антенн, имеющих характерный размер ДН в несколько угловых минут предлагается использовать иной метод — круговое сканирование [1], когда телескоп движется по окружности относительно центра Солнца и задача его реализации ставится для радиотелескопов, входящих в комплекс «Квазар-КВО» ИПА РАН. Этот и другие разработанные методы были реализованы в начале 80-х годов на радиотелескопе РТ-22 ФИАН, а в конце 80-х — и на РТ-22 КрАО.

Приведены результаты наблюдений солнечных протуберанцев за лимбом Солнца и волокон на диске в прилимбовых областях на волнах 8 мм и 1.35 см. Определены их положение, размеры вдоль лимба и высоты. Отмечены случаи наблюдений выбросов корональной массы (CME) и измерено магнитное поле. Позднее подобные методы много лет использовались для картографирования Солнца на радиотелескопе РТ-7.5 МВТУ им. Баумана на волнах 3.4 и 2.5 мм.

В настоящее время ценность разработанных методов продолжает оставаться значимой, поскольку крупных полноповоротных антенн в мире на порядки больше, чем интерферометров. Они могут обеспечить непрерывный мониторинг Солнца и охватить весь микроволновый диапазон. В данном направлении могли бы принять участие и радиотелескопы ИПА РАН.

Литература

1. Топчило Н. А. Автоматизированные наблюдения Солнца. II. Методы наблюдений // Вестник ЛГУ. 1983. № 1 С. 99–110.

Обработка лазерно-локационных измерений при сличении шкал времени на космическом аппарате и станции лазерной локации

В. Н. Тряпицын[1], И. Ю. Игнатенко[2]

[1]ФГБУН «КрАО РАН», пос. Научный, Ав. Рес. Крым
[2]ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

В работе проведен анализ лазерно-локационных измерений на станциях ИРКУТСК и Менделеево по ИСЗ ГЛОНАСС, который оборудован специальной аппаратурой для регистрации по бортовому стандарту времени и частоты моментов падения лазерных импульсов на поверхность ИСЗ. Подобный эксперимент на КА ГЛОНАСС проводился ранее и кроме малого количества точек показал также большой разброс полученных значений разности шкал времени как на КА, так и на станции лазерной локации (SLR). Показано, что основной проблемой при обработке измерений килогерцовых лазеров является установление однозначного соответствия моментов стартов измерений и зарегистрированных моментов фиксации падения лазерных импульсов на отражательную панель.

Анализ полученных массивов моментов времени (по стандартам времени на КА и SLR) показал хорошее согласие с теоретическими результатами [1, 2]. Результаты работы система T2L2 во Франции [3] устойчивы, но сильно зависят от качества используемой приемной аппаратуры на станции лазерной локации. Программный комплекс, используемый при обработке измерений, менее чувствителен к качеству приемной аппаратуры и работает с CRD-форматами как в режиме FULL RATE (отфильтрованный массив всех измерений), так в режиме NPT (нормальные точки).

Обсуждается необходимость включения в результирующие массивы моментов времени существующих релятивистских поправок за движение станции лазерной локации относительно КА.

Литература

1. Игнатенко И.Ю., Тряпицын В. Н., Игнатенко Ю. В. Метод определения разности шкал времени бортовых часов ИСЗ и станции лазерной локации // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 45. С. 51–56.

2. Samain E., Guillemot Ph., Exertier P., et al. Time transfer by laser link - T2L2: first data. Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. Poznań, October 2008. Vol. 1. P. 682–689.

3. T2L2: Calibration. https://cddis.nasa.gov/lw17/docs/presentations/session13/01b-T2L2_%20Calib.pdf.

Малогабаритный носимый высокоточный относительный гравиметр «Пешеход»

В. Ф. Фатеев, С. Б. Акпанбетов, Д. С. Бобров, Р. А. Давлатов, Д. С. Олейников

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

В настоящее время существует необходимость в использовании малогабаритных носимых высокоточных гравиметров для обеспечения поиска и разведки месторождений полезных ископаемых, для топогеодезического обеспечения территорий России, в том числе Северного морского пути и зоны Арктики, а также при разработке перспективной комплексной системы навигации по гравитационному полю Земли.

Самое широкое распространение в мире и в России получили канадские гравиметры Scintrex CG-5 Autograv (их вес 8 кг, погрешность измерений не более 5 мкГал). Однако в настоящее время приобретение гравиметра Scintrex CG-5 Autograv ограничено или невозможно из-за санкций. Отечественными перебазируемыми высокоточными гравиметрами приемлемой точности являлись ГНШ-МА, ГНУ-КВ и др. По мере увеличения доли рынка иностранных гравиметров, применяемых в гравиметрии и других областях промышленности, отечественные средства измерений выводятся и выводились из обращения. К настоящему времени производство отечественных гравиметров прекращено, технологии изготовления утеряны. Таким образом, возникает задача разработки отечественного высокоточного относительного гравиметра, не уступающего по точности зарубежным аналогам.

В данной работе представлены результаты разработки гравиметра «Пешеход», принцип действия которого основан на использовании прецизионных пружинных весов. Изменение силы тяжести определяется путем измерения величины растяжения металлической пружины. При этом используется емкостной съем для оценки значения перемещения пружины. Система съема представляет собой конденсатор с тремя пластинами. При этом между двух стационарных пластин располагается подвижная (она же – чувствительный элемент). Плоский чувствительный элемент имеет специальный горизонтальный подвес на вольфрамовой нити, натянутой между плечами специально термообработанного «лука» из пружинного сплава БРБ-2. Емкостная схема съема оригинальная и обладает чувствительностью к перемещениям около 0,1 нанометра.

Гравиметр может стать аналогом зарубежного гравиметра Scintrex по точности и эксплуатационным свойствам. Вместе с тем, по сравнению с ним он обладает следующими преимуществами:

1. Более высокая ударостойкость в полевых условиях, поскольку используется металлический чувствительных элемент (Sintrex оснащен хрупким кварцевым чувствительным элементом).

2. Возможность серийного конвейерного изготовления всех элементов прибора, включая чувствительный элемент (кварцевый чувствительный элемент Sintrex изготавливается вручную).

3. Низкая стоимость серийного изготовления.

4. Отсутствие потребности в аккумуляторных батареях большой емкости (в Sintrex требуется постоянный подогрев кварцевого чувствительного элемента до 75ºС при любой внешней температуре).

В работе представлены результаты предварительных испытаний экспериментального образца гравиметра «Пешеход», а также его технические характеристики.

Космический пункт геофизической колокации

В. Ф. Фатеев, Д. С. Бобров, В. П. Лопатин, Р. А. Давлатов М. М. Мурзабеков

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Результаты космических измерений гравитационного поля Земли (ГПЗ) находят широкое применение. Сферами их использования являются:

– перспективные автономные навигационные системы по геофизическим полям Земли;

– фундаментальные исследования по уточнению модели ГПЗ и изучению внутреннего строения Земли;

– прикладные геофизические исследования для обеспечения безопасности (вулканология, сейсмология), а также в интересах геологии и разведки полезных ископаемых.

Для решения задачи навигации по геофизическим полям необходимо создание навигационно-гравиметрических карт с погрешностью менее 1 мГал и навигационно-магнитометрических карт с погрешностью менее 1 нТл. Пространственное разрешение создаваемых карт должно быть менее километра. Современные глобальные модели ГПЗ и МПЗ предъявляемым требованиям не удовлетворяют.

В этой связи предлагается космический измерительный пункт геофизической колокации, который способен повысить точность и пространственное разрешение навигационных гравиметрических и магнитометрических карт на глобально удаленных территориях и акваториях.

Предварительный состав предлагаемого пункта геофизической колокации включает:

– бортовой измеритель разности гравитационных потенциалов «Земля-борт», реализованный на высокостабильных стандартах частоты и времени (СЧВ) с нестабильностью 10^{-16}–10^{-17};

– радиогравиметр на НАП ГНСС, ориентированный в «зенит», измеряющий первый градиент потенциала — ускорение свободного падения (УСП) КА;

– лазерный трехосевой бортовой градиентометр и микроакселерометр на свободных массах;

– лазерный измеритель типа «спутник-спутник», испытанный в проекте GRACE, для измерения второго градиента потенциала ГПЗ;

– второй измеритель «спутник-спутник», который вместе с предыдущим позволяет определять третий градиент потенциала ГПЗ;

– радиоизмеритель УОЛ на основе четырех дополнительных НАП ГНСС, ориентированных «в горизонт»;

– радиоизмеритель профиля высоты океана и характеристик его поверхности на основе бистатической РЛС (БРЛС), использующей сигналы ГНСС, ориентированной «в надир»;

– магнитометр и магнитный градиентометр.

В состав оборудования КА может быть включен классический радиоальтиметр. Кроме того, в состав должно входить необходимое вспомогательное оборудование.

Для обоснования работоспособности предлагаемых новых гравитационных измерителей проведен ряд наземных и наземно-космический экспериментов, в том числе:

– два эксперимента по измерению УСП КА по их сигналам, оценка погрешности составила несколько мГал;

– натурные эксперименты по оценке возможностей БРЛС на сигналах ГНСС, в том числе в безэховой камере;

– ряд экспериментов по обоснованию способов измерения разности гравитационных потенциалов с помощью высокостабильных СЧВ (квантовые нивелиры);

Кроме того, изготовлен и испытан стенд для определения характеристик лазерных градиентометров и микроакселерометров на полусвободных массах. В первых экспериментах получена погрешность единицы Этвеш.

Рассмотренное предложение по созданию космического пункта гравиметрической и магнитометрической колокации может быть использовано при создании высокоточных геофизических карт для геофизической навигации, а также при разведке полезных ископаемых на шельфе Северного Ледовитого океана.

Кроме того, этот комплекс может стать элементом проектируемой космической геодезической системы «ГЕО-ИК-3».

Мобильный пункт геофизической колокации

В. Ф. Фатеев, Д. С. Бобров, М. М. Мурзабеков, Р. А. Давлатов, В. П. Лопатин

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

В современных требованиях к геоинформационному обеспечению различных отраслей науки и промышленности (например, помехозащищенная навигация транспортных средств, геология, служба мониторинга опасных геодинамических явлений, инженерно-строительные изыскания и т. д.), зачастую обозначено получение актуальной геофизической информации в максимально сжатые сроки. Одним из видов такой информации являются сведения о параметрах гравитационного (ГПЗ) и магнитного (МПЗ) полей Земли.

В области помехозащищенной навигации транспортных средств требуются навигационные карты параметров ГПЗ и МПЗ в районах применения перспективных автономных систем навигации по геофизическим полям Земли [1].

В области геологоразведки требуется максимально детальное знание о характеристиках месторождений полезных ископаемых [2]:

– размер залежи в плане и глубина залегания;
– мощность продуктивного пласта и т. д.

В инженерно-строительной отрасли необходимо знание несущей характеристики грунтов и современной подземной инфраструктуры, которое невозможно представить без подземных коммуникаций и сооружений, выполняющих разнообразные функции [3].

На сегодняшний день наибольшее распространение получили методы геоинформационного обеспечения на основе наземной и воздушной геофизической съемки. При этом такие методы обладают рядом преимуществ и недостатков. Преимуществом наземных методов является высокая точность измерений, однако главным их недостатком является их высокая стоимость и низкая оперативность. Основным преимуществом воздушных методов является высокая оперативность, однако самым главным недостатком таких методов является чрезвычайно высокая стоимость их применения и низкая точность измерений.

Таким образом, возникает необходимость в разработке оперативного высокоточного метода измерений параметров ГПЗ и МПЗ.

Одним из возможных вариантов решения этой задачи является использование комплекса разнородных измерителей параметров ГПЗ и МПЗ, размещаемого в каждой точке. Такой комплекс предлагается назвать пунктом гравиметрической и магнитометрической (геофизической) колокации. В состав мобильного пункта геофизической колокации должны входить следующие перспективные высокоточные измерители:

– измеритель разности гравитационных потенциалов на основе высокостабильного стандарта частоты и времени;

– измеритель первой производной гравитационного потенциала (ускорение свободного падения) на основе перспективного атомного абсолютного гравиметра и высокоточного относительного гравиметра;

– измеритель второй производной гравитационного потенциала (гравитационные градиенты) на основе высокоточного гравитационного градиентометра;

– измеритель составляющих уклонения отвесной линии на основе зенитного телескопа и ПЗС-камеры;

– измеритель модуля и составляющих вектора магнитной индукции.

Одновременное измерение параметров ГПЗ с помощью указанных гравитационных измерителей позволяет существенно повысить подготовки навигационных карт параметров ГПЗ и МПЗ, а также однозначно определить плановое местоположение и глубину залегания залежи полезных ископаемых, подземного сооружения, его массу и контуры. При этом измерительные средства могут располагаться как на борту автоматизированной мобильной лаборатории на автомобильном шасси повышенной проходимости, так и на борту БПЛА повышенной грузоподъемности. Это позволит существенно повысить оперативность применения метода и сократить стоимость его применения.

Литература

1. Бобров Д. С. Разработка методов и средств создания навигационных гравитационных карт // Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. / Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений. Менделеево, 2020.

2. Инструкция по гравиразведке. М.: Недра., 1980.

3. ПП РФ от 7 ноября 2020 года N 1798 «Об утверждении перечня видов подготовительных работ, не причиняющих существенного вреда окружающей среде и ее компонентам, которые могут выполняться до выдачи разрешения на строительство объекта федерального значения, объекта регионального значения, объекта местного значения, порядке их выполнения, а также экологических требованиях к их выполнению».

Влияние GPS-спуфинга на навигационные приемники сигналов ГНСС

А. П. Фокин, Н. Н. Фокина

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Рассмотрены примеры влияния GPS-спуфинга на работу навигационных приемников сигналов ГНСС.

В настоящее время ГНСС получили широкое распространение и применяются в различных сферах. При этом многие системы, в том числе критические, имеют сильную зависимость от ГНСС.

Но ГНСС имеют уязвимые места, такие как: низкий, на уровне шумов, уровень сигнала, невозможность оперативно изменить кодовую последовательность сигнала КА. Следовательно, сигналы ГНСС можно заглушить или подделать. Данное явление получило широкое распространение в последнее время и называется GPS-спуфинг (GPS Spoofing) [1].

Низкий уровень сигналов ГНСС (10^{-16} Вт или –160 дБВт) делает возможным подавление даже маломощными помеховыми излучателями в большом радиусе. Устройства подавления ГНСС находятся в свободной продаже и имеют низкую стоимость. Схемы подобных устройств подавления находятся в открытом доступе сети «Интернет».

GPS-спуффинг используется для того, чтобы преднамеренно вести объект по ложным координатам или же просто исключить возможность определить свои реальные координаты. Так, 29 июля 2013 г. студентам из Университета Остина (шт. Техас) удалось отклонить от курса 213-футовую яхту (стоимостью $80 млн) с помощью метода GPS-спуффинга [2]. Используя этот метод, можно легко управлять (угонять) беспилотные летательные объекты, а также воздушные и морские суда, автотранспорт. В настоящее время решения проблемы GPS-спуффинга нет.

Согласно принятой в научных публикациях классификации [3], выделяют следующие типы GPS спуффинга:

– асинхронный;
– синхронный;
– синхронный с множеством передатчиков;
– синхронный с множеством передатчиков на дронах;

Принципиальная разница в синхронной и асинхронной атаке (см. рис. 1) заключается в попадании генерируемого сигнала в окно корреляционного анализа приемника сигналов ГНСС. Если сигнал спуфинга не попадает в окно корреляционного анализа по фазе кода или доплеровскому смещению частоты, то он воспринимается навигационным приемником как помеха и не включается в обработку.

Для проведения успешной асинхронной атаки необходимо сорвать слежение приемника за реальными сигналами ГНСС. Как правило, это делается с помощью увеличения мощности спуфингового сигнала таким образом, чтобы мощность генерируемых сигналов в фазовом центре антенны приемника была на 30–50 дБ

выше мощности реальных сигналов ГНСС. После срыва слежения большинство навигационных приемников снова переходят в режим поиска сигналов спутников ГНСС и начинают работать по спуфинговым (ложным) сигналам [4].

При синхронной атаке сигналы спуфера полностью идентичны сигналам спутников по фазе и доплеровскому смещению частоты, поэтому навигационный приемник переходит на ложные сигналы без срыва слежения. При синхронной атаке мощность спуферных сигналов в фазовом центре антенны приемника должна быть на 4 дБ выше мощности сигналов спутников ГНСС [4].

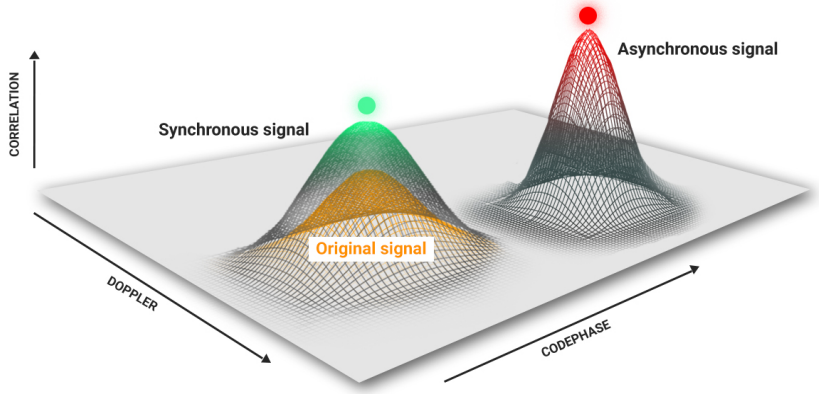


Рис. 1 Принципиальное различие при синхронной и асинхронной атаке

Асинхронная атака самая простая в реализации. Достаточно иметь любую плату SDR (soft – define radio), широко представленную на рынке и имеющую низкую стоимость, а также специализированное программное обеспечение, широко представленное в сети «Интернет». Для выполнения асинхронной атаки достаточно генерировать сигналы спутников с правильной модуляцией сигнала и структурой кода. Можно имитировать любую дату (время) и координаты.

Самая простая и наиболее распространенная асинхронная атака — постановка мощной помехи на частотах работы ГНСС. Устройства (помеховые излучатели), позволяющие совершить данную атаку, популярны, имеются в свободном доступе и очень широко представлены на рынке.

Причины возрастания случаев GPS-спуфинга:

– ведение боевых действий;
– обман систем взимания платы (ПЛАТОН, каршеринговые системы);
– противодействие дронам, защита VIP-персон, важных объектов;
– совершение незаконных, в том числе международных, сделок (покупка Китаем Иранской нефти).

Подавление помеховыми излучателями сигналов ГНСС оказывает воздействие на все навигационные приемники, находящиеся в радиусе действия.

GPS-спуфинг становится серьезной проблемой в различных сферах народного хозяйства.

Литература

1. Kaspersky daily. Можно ли защититься от атак на GPS? [Электронный ресурс]. URL: https://www.kaspersky.ru/blog/gps-spoofing-protection/22674/ (дата обращения 20.01.2022).

2. Хабр. Neuron Hackspace. GPS: глушилки, спуфинг и уязвимости [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/company/neuronspace/blog/254877/ (дата обращения 20.01.2022).

3. Van der Merwe, Johannes & Zubizarreta, Xabier & Lukcin, Ivana & Rügamer, Alexander & Felber, Wolfgang. (2018)/ Classification of Spoofing Attack Types. 10.1109/EURONAV.2018.8433227.

4. GPSPATRON. Tupes of GNSS Spofing [Электронный ресурс]: https://gpspatron.com/types-of-gnss-spoofing (дата обращения 06.10.2022).

Совершенствование методов расчета характеристик базовой навигационной услуги системы ГЛОНАСС

А. А. Фролов, Е. А. Карауш, В. О. Жилинский

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) в современном мире образуют основу системы координатно-временного и навигационного обеспечения, позволяя решать множество фундаментальных и прикладных задач. Эксплуатация и развитие нескольких одновременно функционирующих ГНСС порождают вопросы о сотрудничестве между странами-владельцами таких систем, о функциональной совместимости ГНСС, а также вопросы оценки и подтверждения показателей точности и эффективности функционирования ГНСС.

Утвержденный в 2019 г. в РФ «Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС)» системы ГЛОНАСС [1] устанавливает значения эксплуатационных характеристик базовой навигационной услуги системы ГЛОНАСС. Расчет значений данных характеристик (в части точности формирования координат и передачи времени) проводится в соответствии с представленными в Стандарте методиками [2], которые основаны на обработке эфемеридной информации навигационных КА. Расчет значений погрешностей проводится вне зоны действия системы ГЛОНАСС, т. е. за пределами околоземного пространства: от поверхности Земли до фиксированного значения высоты 2000 км.

Для обеспечения расчета погрешностей формирования координат и передачи времени в зоне действия ГНСС была разработана методика расчета координат местоположения и интервала времени между национальной шкалой координированного времени UTC(SU) и национальной шкалой координированного времени UTC(SU), передаваемой системой ГЛОНАСС, по результатам измерений L1OF ГЛОНАСС [3]. Данная методика основана на измерении псевдодальностей абсолютно калиброванным навигационным приемником, на котором проводятся измерения текущих навигационных параметров в шкале времени Государственного (вторичного) эталона единиц времени и частоты, также приемник позволяет проводить оценку базовой навигационной услуги, предоставляемой системой ГЛОНАСС, в зоне действия ГНСС около поверхности Земли.

Литература

1. ГЛОНАСС. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Редакция 2.2. 2019.
2. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Приложение А. Методики расчета эксплуатационных характеристик. Редакция 2.2. 2019.
3. Методика измерений координат местоположения и интервала времени между национальной шкалой координированного времени UTC(SU) и национальной шкалой координированного времени UTC(SU), передаваемой системой ГЛОНАСС, 815-RA. RU.311243-2021, ФГУП ВНИИФТРИ.

Совершенствование программно-аппаратных средств определения глобальных геодинамических параметров во ФГУП «ВНИИФТРИ»

Е. Н. Цыба[1], С. Л. Пасынок[1], С. С. Панарин[2]

[1]ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия
[2]ГК ООО «Горка», г. Москва, Россия

Геодинамика — междисциплинарная наука, изучающая, как Земля перемещается и деформируется под действием сил вне зависимости от того, происходят они извне или изнутри нашей планеты. Многолетний опыт показывает, что наиболее эффективными для исследовательской деятельности в области изучения глобальных геодинамических явлений являются методы спутниковой геодезии, включающие функционал ГНСС, спутниковую лазерную дальнометрию и дистанционное зондирование Земли из космоса. Решение задач геодинамики, таких как определение ПВЗ и характеристик гравитационного поля, изучение изменения уровня Мирового океана и положения центра масс Земли методами спутниковой геодезии сопряжено со знанием точного положения КА на орбите. Эффективное и точное моделирование / расчет траекторий КА на орбите вокруг Земли затруднено, поскольку уравнения движения нелинейные, а недостаточное количество измерительной информации может потребовать моделирования / расчета траекторий спутников в течение длительных периодов времени.

С целью повышения точности определения глобальных геодинамических параметров в реальном или квазиреальном времени во ФГУП «ВНИИФТРИ» разработана программа точного определения орбит ИСЗ (низко- и среднеорбитальных), в основу которой лег интегратор RADAU [1, 2, 3]. Разработанная программа в настоящий момент в экспериментальном режиме используется в ГМЦ ГСВЧ ФГУП «ВНИИФТРИ» для определения ПВЗ и координат геоцентра (методом спутниковой лазерной дальнометрии), изучения гравитационного поля Земли [4] и изменения уровня Мирового океана (методом спутниковой альтиметрии).

Литература

1. Butcher J. C., Wanner G. Runge-Kutta methods: some historical notes // Applied Numerical Mathematics. 1996. Т. 22. №. 1–3. С. 113–151.
2. Hairer E., Wanner G. Stiff differential equations solved by Radau methods // Journal of Computational and Applied Mathematics. 1999. Т. 111. №. 1–2. С. 93–111.
3. Hairer E., Wanner G. Radau Methods In: Encyclopedia of applied and computational mathematics / ed. by B. Engquist. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
4. Цыба Е. Н., Волкова О. А., Пасынок С. Л., Серавина Т. В. Предварительные результаты построения модели геоида в пределах акватории Мирового океана по данным спутниковой альтиметрии во ФГУП «ВНИИФТРИ» // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. С. 54–59.

Исследование частотных свойств оптического стандарта на одиночном ионе иттербия

С. В. Чепуров, М. И. Нестеренко, Д. М. Грязнов, Д. Ю. Примаков, С. Н. Багаев, А. С. Дычков

Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В Институте лазерной физики СО РАН разработан и создан оптический стандарт частоты на основе охлажденного одиночного иона иттербия-171 [1].

В качестве оптического репера используется квадрупольный переход $^2S_{1/2}$ (F = 0) → $^2D_{3/2}$ (F = 2). Детектированный спектр возбуждения перехода состоит из нескольких резонансов, которые содержат информацию о состоянии иона, его движении в ловушке и взаимодействии с окружающей средой. Для стабилизации частоты зондирующего лазера используется центральный резонанс со спектральной шириной 30 Гц.

В докладе представлены текущие результаты исследований частотных свойств оптического стандарта частоты на основе квадрупольного перехода одиночного иона иттербия-171.

Приведены результаты исследований узкополосной зондирующей лазерной системы для возбуждения запрещенного октупольного перехода $^2S_{1/2}$ (F = 0) → $^2F_{7/2}$ (F = 3) иона иттербия-171 с целью создания оптического стандарта с нестабильностью частоты порядка 10^{-18}.

Литература

1. Chepurov S. V., Pavlov N. A., Lugovoy A. A. et al. // Quantum Electronics. 2021. Vol. 51 (6). P. 473.

Особенности динамики орбит активных астероидов

Ю. А. Чернетенко, С. Р. Павлов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В последние десятилетия были обнаружены необычные малые тела — астероиды главного пояса с физическими проявлениями кометной активности, которые получили название активные астероиды (АА). Эта группа пока невелика и насчитывает несколько десятков тел. Часть этих тел имеет двойное обозначение, как астероид и как комета. Эти тела, подобно кометам, обнаруживают комы, хвосты или другие визуальные доказательства потери массы, а их орбиты таковы, что критерий Тиссерана, T_j, относительно Юпитера > 3.0, как для обычных астероидов. Если кометная активность (кома, хвост) наблюдается периодически и проявляется вблизи перигелия, то речь может идти о негравитационном кометном ускорении. Его причиной может быть наличие некоторого количества льдов в составе АА на его поверхности или на некоторой глубине от поверхности. Возможны также непериодические проявления кометной активности. Возможными причинами активности могут быть также столкновения и вращательная неустойчивость. Присутствие пылевых хвостов является наиболее частым проявлением активности среди АА.

При определении параметров орбит протяженных объектов может оказаться значимой такая редукция наблюдений, как смещение фотоцентра (СФ), т. е. несовпадение центра тяжести тела и центра яркости изображения. Для комет, как правило, пыль выносится потоком газа в сторону Солнца и на некотором расстоянии от ядра может тормозиться давлением солнечной радиации и формировать некоторое сгущение пыли, которое и проявляется для наблюдателя как центр яркости. Если количество газа мало или его нет совсем, выброшенная в результате столкновения или вращательной неустойчивости пыль направляется в сторону от Солнца и может образовать временное сгущение, которое также проявляется как центр яркости. Несовпадение центра яркости и центра тяжести проявляется в наличии систематических уклонений в О-С на некоторых интервалах времени, как правило, близких к наблюдаемым проявлениям активности.

Целью настоящей работы является оценка параметров орбит ряда АА с учетом данных о проявлениях активности и получение, по возможности, выводов о характере активности и природе рассматриваемых тел.

Уравнения движения в форме Энке интегрировались методом Эверхарта. Координаты возмущающих планет вычислялись в соответствии с эфемеридой DE440, учитывались также возмущения от Плутона, Цереры, Паллады и Весты. Использовались только позиционные наблюдения (каталог Центра малых планет на 1 февраля 2023 г.). Фотографическим наблюдениям присваивался вес равный 0.1, остальным наблюдениям — равный 1. Негравитационное ускорение учитывалось по модели Марсдена. СФ определялось тремя составляющими по направлениям — радиальное (R), трансверсальное (T), нормальное (N). Величины

и ошибки этих составляющих определялись из наблюдений совместно с другими параметрами.

Рассмотрены следующие АА: (6478), (7968)/133P/Elst–Pizarro, (60558)/174P, (62412), (248370)/433P. Все эти малые тела находятся на астероидных орбитах ($T_j > 3.0$) и для всех в разное время наблюдались проявления активности: хвосты, комы, вспышки яркости.

На первом этапе уточняются орбитальные параметры и проверяется наличие систематических уклонений в О-С. Для части из этих АА определяются только некоторые параметры негравитационного ускорения, относительно небольшие по величине, для части — составляющие СФ. Эти последние имеют наибольшее значение для радиальной составляющей, от 1000 км до 6000 км, и направлены в сторону от Солнца. Трансверсальная составляющая отрицательна, т. е. направлена против направления движения. Направление от Солнца радиальной составляющей говорит о том, что газовая сублимация либо мала, либо отсутствует, и состав таких тел ближе к составу астероидов.

Для АА (60558)/174P получены параметры движения возможного фрагмента в 2017 г.

Учет СФ позволяет уменьшить ошибку представления наблюдений и уменьшить систематические уклонения в О-С. Поэтому для более полного представления о природе АА и динамике их орбит можно рекомендовать анализ остаточных разностей и включение, при наличии особенностей в их представлении, составляющих СФ в число определяемых параметров.

Методы геодезического контроля зеркальных систем радиотелескопов РТ-32, РТ-13

А. О. Шамов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Зеркальные системы радиотелескопов РТ-32 и РТ-13 состоят из двух основных элементов: главного зеркала (рефлектора) и вторичного (контррефлектора). Данные радиотелескопы (РТ) входят в состав радиоастрономических обсерваторий комплекса «Квазар-КВО». В период 2020 г.–2022 г. были выполнены геодезические измерения по определению геометрических параметров зеркальных систем РТ-32 и РТ-13.

В процессе проведения данных мероприятий применялись два метода геодезического контроля. В рамках работ по модернизации отражающей поверхности контррефлекторов РТ-32 применялся метод поэтапного сканирования поверхности. Далее для оценки точности отражающей поверхности контррефлектора РТ-32, а в дальнейшем всей зеркальной системы РТ-13 применялся фотограмметрический метод исследования.

Литература

1. Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Кайдановский М. Н. и др. Радиоинтерферометрическая сеть «Квазар-КВО» — базовая система фундаментального координатно-временного обеспечения // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 13. С. 104–138.
2. Finkelstein A., Ipatov A., Smolentsev S. The Network «Quasar»: 2008–2011 // The 5th IVS General Meeting Proc., 2008. P. 39–46.
3. Gayazov I., Skurikhina E. Local Ties between co-located space geodetic instruments at QUASAR network observatories // The 5th IVS General Meeting Proc. 2008. P. 82–86.
4. Финкельштейн А. М., Гаязов И. С., Скурихина Е. А. Определение ПВЗ из наблюдений на РСДБ-сети «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2009. Вып. 20. С. 119–125.
5. Христиансен У. Н., Хегбом И. Л. Радиотелескопы. М.: изд. «Мир» 1972.

Радиолазерный комплекс «Точка». Опыт эксплуатации и достигнутые результаты. Перспективы применения, расширяющие возможности фундаментального КВНО

В. Д. Шаргородский, И. Ю. Игнатенко, А. А. Федотов

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

В докладе рассмотрены состав, особенности функционирования и основные характеристики радиолазерного комплекса «Точка», расположенного во ФГУП «ВНИИФТРИ» и сопряженного с первичным эталоном времени (ГЭТ1) в пос. Менделеево и вторичным эталоном времени (ВЭТ1-5) в г. Иркутске.

Представлены полученные в процессе эксплуатации точностные и эксплуатационные характеристики, а также предложения по их улучшению и возможностям доработки с учетом необходимости импортозамещения. Рассмотрены перспективы их применения в фундаментальном КВНО и в отработке новых технологий использования ГЛОНАСС.

Релятивистские эффекты при синхронизации шкал времени для различных типов орбит космических аппаратов

К. Г. Шупен

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Формирование и высокоточная синхронизация шкал времени (ШВ) космических аппаратов (КА) на околоземных орбитах, в том числе на орбитах ГНСС, предполагают обязательный учет релятивистских принципов, установленных общей и специальной теорией относительности.

В общем случае полнота и достаточность компенсации влияния релятивистских и гравитационных эффектов (РГЭ) определяются требованиями к точностным характеристикам ГНСС. Если РГЭ корректируются не полностью, то эти неучтенные составляющие:

– имеют характер неисключенных периодических и квазипериодических систематических погрешностей и в процессе летной эксплуатации бортовых часов КА трудноразличимы с погрешностями эфемерид в силу их витковой повторяемости;

– могут быть соизмеримы или превышать непрогнозируемый уход бортовых часов, обусловленный нестабильностью частоты часов, что снижает точность прогноза частотно-временных поправок на среднесрочных интервалах.

Очевидной особенностью РГЭ является то, что они не наблюдаются при наземной отработке любых образцов космических часов, поэтому должна предусматриваться их компенсация при эксплуатации космических часов на орбите.

К числу основных релятивистских и гравитационных эффектов, влияние которых на частоту космических часов уже достаточно хорошо изучено и подтверждено, относятся [1, 2]:

– относительный гравитационный сдвиг частоты, обусловленный влиянием массы Земли с учетом второй зональной гармоники потенциала;

– относительный доплеровский сдвиг частоты второго порядка, обусловленный движением КА на круговой орбите в гравитационном поле сферической Земли.

Влияние этих эффектов проявляется в смещении номинала частоты и периодическом его изменении, связанном с неравномерным движением КА в неоднородном гравитационном поле Земли, а также под влиянием гравитационных полей Луны и Солнца. Релятивистское изменение частоты космических часов приводит к соответствующим изменениям в бортовой шкале времени (БШВ), передаваемой КА ГНСС. Эти эффекты должны быть скомпенсированы с целью приближения БШВ КА к координатному времени или ко времени часов, находящихся на поверхности Земли, что является основным условием синхронизации времени в ГНСС.

В докладе на основе данных открытых источников выполнен обзор результатов космических экспериментов по обнаружению и оценке вклада РГЭ, которые могут быть использованы в интересах высокоточной синхронизации ШВ в ГНСС.

Представлены предварительные аналитические расчеты вклада РГЭ в значения БШВ КА, обусловленные влиянием второй зональной гармоники нормального потенциала Земли при движении КА на околоземной эллиптической орбите, и получены оценки для полного вклада РГЭ для различного типа орбит. Подробно рассмотрен пример влияния РГЭ на формирование БШВ при движении КА на геосинхронной эллиптической орбите типа QZSS, получены оценки для полного вклада РГЭ, и выполнено сравнение с аналогичными вкладами для орбит ГНСС близких к круговым.

Литература

1. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Reviews in Relativity. 2003. No 6.URL: https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2003-1.

2. Пучков В. Ю., Шебшаевич В. С. Учет релятивистских и гравитационных эффектов при обработке результатов измерений в системе Navstar. Зарубежная радиоэлектроника, 1989. № 1. С. 54–60.

О комплексном подходе к оценке характеристик бортовых стандартов частоты и частотно-временного обеспечения ГНСС

К. Г. Шупен, А. В. Сальцберг, О. Е. Нечаева

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Оценки характеристик бортовых стандартов частоты (СЧ) и точности частотно-временного обеспечения различных ГНСС являются взаимосвязанными показателями, т. к. в основе реально достижимой точности расчета частотно-временных поправок (ЧВП) к бортовой шкале времени (БШВ) лежат характеристики нестабильности бортовых СЧ. Комплексный подход к оцениванию точностных характеристик (ТХ) СЧ позволяет выполнять качественный анализ их состояния при эксплуатации, совершенствовать методы прогнозирования ЧВП КА, сравнивать ТХ СЧ различных ГНСС, что в итоге может улучшить эксплуатационные характеристики ГНСС ГЛОНАСС.

В настоящее время основополагающим документом уровня ИКД ГЛОНАСС [1] является «Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС)» [2], предназначенный для описания эксплуатационных характеристик открытого сервиса ГНСС ГЛОНАСС. Оценка и подтверждение достигнутого уровня основных характеристик (доступность, непрерывность, пригодность, точность и пр.) выполняется ИАЦ КВНО ФГУП «ЦНИИмаш» на основе значительного объема статистических данных на длительных интервалах времени (до 1 года). СТЭХОС ориентирован на оценку предельных значений интерфейсных [1] и эксплуатационных [2] характеристик ГНСС ГЛОНАСС, которые гарантируются с высокой степенью доверия. Заявленные в СТЭХОС показатели и методики их оценивания в основном находятся в согласии с зарубежными стандартами, например с GPS SPS Performance Standard [3].

При анализе функционирования ГНСС ГЛОНАСС требуется постоянное сопровождение и оперативное подтверждение основных характеристик ГНСС ГЛОНАСС, в частности, характеристик точности частотно-временного обеспечения, основной из которых является точность определения частотно-временных поправок (ЧВП) на расхождение бортовой шкалы времени (БШВ) КА относительно шкалы времени системы ГЛОНАСС.

В качестве показателей нестабильности частоты СЧ в ГНСС ГЛОНАСС до настоящего времени применялись различные показатели, что затрудняло сравнительный анализ характеристик различных СЧ. СТЭХОС устанавливает в качестве единого показателя девиацию Аллана, что является исключительно положительным фактом, т. к. не только приводит к унификации ТХ, но и позволяет проводить качественный анализ состава шумов конкретного СЧ.

В качестве эталонных данных при реализации методик оценивания СТЭХОС используется высокоточная эфемеридно-временная информация, апостериорно рассчитываемая ИАЦ КВНО.

Как показывает сравнение различных источников высокоточной эфемеридно-временной информации, для оценки нестабильности бортовых СЧ ГНСС без потери точности могут быть использованы не только финальные данные, получаемые с задержкой до 7 сут., но и эфемеридно-временная информация, получаемая с задержкой от 6 ч до 1 сут.

В докладе показано, что могут быть использованы не только данные ИАЦ КВНО, но и данные других функциональных дополнений, например СВОЭВП или данные центров Международной службы ГНСС (IGS). Сопоставление данных нескольких центров позволяет обеспечить достоверность и надежность полученных на их основе статистических оценок.

Продемонстрировано, как оценивание характеристик бортовых квантовых стандартов частоты позволяет определить потенциально достижимый порог погрешности прогнозирования ЧВП к БШВ КА и обеспечить необходимую гармонизацию требований к частотно-временному обеспечению ГНСС ГЛОНАСС и бортовым СЧ.

В докладе представлен сравнительный анализ точности поправок к БШВ, доступных через навигационный сигнал КА, как для различных ГНСС, так и по отношению к потенциально достижимой точности, определяемой нестабильностью частоты бортовых СЧ.

Литература

1. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.1). М.: РНИИ КП, 2008. 74 с.

2. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Редакция 2.2 (6.2019). Королев, 2019. 59 с.

3. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, 5th edition. 2020. 196 p.

Геодинамические исследования Восточно-Европейской платформы по ГНСС-данным

Н. В. Щербакова[1], В. Л. Горшков[1], С. Д. Петров[2], П. В. Мовсесян[2], С. С. Смирнов[1,2], Д. А. Трофимов[2]

[1]ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Геодинамика Восточно-европейской платформы (ВЕП) проявляется в виде изостатического послеледникового поднятия Фенноскандии и сейсмической региональной активности на северо-западе ВЕП, и почти полным отсутствием вертикальной динамики и сейсмичности на осадочных просторах Русской равнины. Эти процессы вызывают постоянную деформацию земной коры на несколько миллиметров в год, как по вертикали, так и по горизонтали. Поле скоростей ГНСС-станций является исходным материалом для изучения и мониторинга этих процессов. Однако для региональных исследований такого рода требуется достаточно плотная сеть станций с продолжительной историей мониторинга. Такое однородно обработанное в системе ITRF2014 с помощью пакета GIPSY 6.4 (JPL) поле скоростей нескольких сотен ГНСС-станций на территории ВЕП и её окрестностей поддерживается нами на протяжении более десятка лет.

Евразийская тектоническая плита состоит из многочисленных разнородных и разновозрастных геологических структур. Одной из них является ВЕП, которая, в свою очередь, также имеет достаточно сложную геологическую структуру. Наиболее крупными их них являются Фенноскандия, почти полностью состоящая из докембрийских кристаллических образований Балтийского щита, и вторая по величине в мире —Русская (Восточно-Европейская) равнина (РР), представленная осадочными породами разных эпох. Для изучения геодинамики региона важно, что основанием РР служат Русская плита (РП) с докембрийским кристаллическим фундаментом и, частично на юге, Скифская плита с палеозойским складчатым фундаментом. В геологической истории различных структур ВЕП были этапы их поднятий, опусканий и других взаимных дислокаций, в том числе обусловленных неоднократными мощными ледниковыми покровами в четвертичном периоде. Проявления последнего оледенения до сих пор наблюдаются как послеледниковое поднятие Фенноскандии.

Благодаря всё возрастающей плотности и в меньшей степени точности определений геодезических координат постоянных ГНСС-станций появляется возможность мониторинга этих медленных геодинамических процессов. В глобальных масштабах эти наблюдения давно используются для изучения движения геотектонических плит. Именно благодаря многочисленности и, местами, высокой плотности ГНСС-станций стало возможным выделить уже несколько десятков таких плит и реализовать с привлечением других средств проект глобального мониторинга возникающих напряжений на границах этих плит. Для изучения

геодинамики регионов, не расположенных вблизи зон сопряжения тектонических плит, особенно важны плотность сети перманентных ГНСС-станций, однородность их обработки, отсутствие локальных систематических ошибок наблюдений, маскирующих очень слабые искомые геодинамические эффекты медленных геологических процессов.

На территории ВЕП наиболее естественно ожидать проявление этих процессов в зоне сопряжения РП и Фенноскандии ввиду послеледникового поднятия последней. Эти процессы давно и со всей возможной тщательностью изучаются на протяжении последних лет, особенно в рамках проекта BIFROST. К сожалению, в имеющихся глобальных базах скоростей ГНСС-станций NGL и JPL именно территория РР представлена удручающе слабо — менее 20 станций, что серьёзно ограничивает достоверность имеющихся геодинамических оценок. В действительности на ней расположены более тысячи ГНСС-станций, принадлежащих разным, в основном, коммерческим геодезическим организациям России.

Этот недостаток компенсирует поддерживаемая нами в свободном доступе база данных скоростей ГНСС-станций (БДС), позволяющая сохранить для изучения материал недоступный и, главное, постепенно утрачиваемый ввиду ограниченного срока его хранения в коммерческих геодезических предприятиях.

В работе приведены состав и основные характеристики базы данных скоростей ГНСС-станций, приведено её сравнение с другими глобальными аналогичными базами данных, проведён анализ исходного материала и его возможности, вычислены кинематические параметры отдельных регионов ВЕП и получены оценки поля напряжений региона (сопряжения Фенноскандии и РП).

Методика определения астрономического азимута с использованием высокоточного электронного тахеометра Leica TC 2003

А. И. Яковлев, Р. И. Алтунин, К. К. Жбанов, А. В. Прокофьев

ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

Для определения астрономического азимута с СКО 0.5–3″ могут использоваться различные методы, основными из которых являются [1]:

– астрономический метод, позволяющий определять астрономические азимуты с точностью до 0.5–1″ за три сеанса наблюдений (не менее 3 сут.), в условиях благоприятной метеорологической обстановки (наблюдения производят в ночное время при отсутствии облачности и наличии видимости на ориентируемых направлениях) [2];

– гироскопический метод, позволяющий получить астрономический азимут с СКО порядка 2″ за несколько часов наблюдений при условии удаленности от места эталонирования не более чем на 200–300 км и слабо зависящий от метеорологических условий (необходима прямая видимость на ориентируемых направлениях);

– метод спутниковой геодезии, позволяющий получить азимут с СКО порядка 15″ за 2 ч наблюдений, при наличии исходной геодезической основы (2–3 пунктов ГГС I или II классов). На сегодняшний день отсутствуют методики, технические указания, руководства, описывающие получение и оценку данным методом астрономического (геодезического) азимута с СКО 0.5–3″.

Данные астрономические методы являются исторически первыми и на сегодняшний день наиболее точными и трудоемкими. Для достижения требуемой точности при их использовании требуется несколько суток измерений и состав расчета до трех человек. А если взять во внимание то, что все данные способы были предназначены и описаны для работы с определенной (уже устаревшей) оптико-механической аппаратурой, то становится актуальной задача получения высокоточного астрономического азимута с помощью перспективных современных образцов техники.

Для получения астрономического азимута с точностью 0.5–1″ был проведен эксперимент с использованием высокоточного электронного тахеометра Leica TC 2003.

Обработка измерений показала, что для получения высокоточного астрономического азимута достаточно использования одного комплекта электронного тахеометра и меньших затрат времени.

Литература

1. Павловский В. С., Кудряшов Ю. П., Домасев В. А. Астрономия. Учебник. М.: Военное издательство, 1992. С. 125–130.
2. Уралов С. С. Курс геодезической астрономии. М., 1980..

Метод определения астрономического азимута с использованием спутниковой навигационной аппаратуры и вычисления уклонения отвесных линий по разности высот квазигеоида

А. И. Яковлев, Р. И. Алтунин, А. С. Зуев

ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

Астрономический азимут с СКО не более 0.5″ возможно получить с использованием аппаратуры потребителей, работающей по сигналам космических навигационных систем (КНС). Для этого необходимо определить сначала геодезический азимут, а от него перейти к астрономическому азимуту [1, 2].

Ожидаемое СКО определения геодезических азимутов ориентирных направлений Аг аппаратурой потребителей КНС, при точности определения приращений координат 5±1 мм на 1 км расстояния, составляет 0.5″ для расстояния 4 км.

Для перехода к астрономическому азимуту используем формулу:

$$A_a = A_\Gamma + \eta \operatorname{tg} B + (\xi \sin A_\Gamma - \eta \cos A_\Gamma) \operatorname{ctg} z, \qquad (1)$$

где z — зенитное расстояние,

ξ — составляющая уклонения отвесной линии в меридиане,

η — составляющая уклонения отвесной линии в первом вертикале.

Представляется, что для определения ξ и η наиболее выгодным является метод определения составляющих уклонения отвесной линии по аномалиям высоты.

Литература

1. Алексеев В. Ф., Марковкин Н. Д., Яковлев А. И. Методика определения геодезических азимутов с использованием аппаратуры потребителей космических навигационных систем // Записки горного института. 2001. Т. 146. С. 185–187.

2. Яковлев А. И., Бойцов А. А., Прокофьев А. В. Определение эталонных направлений с использованием аппаратуры потребителей космических навигационных систем // Вопросы оборонной техники. Серия 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. М., 2012. № 4 (256). С. 73–79.

Новые параметры эфемериды Луны EPM 2022

Э. И. Ягудина, М. А. Лебедева

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Лазерная локация Луны (Lunar Laser Raging, LLR) (ЛЛЛ) является в настоящее время (с 1969 г.) высокоточным и надежным средством для получения точных параметров орбиты Луны и физической либрации. В работе получены новые параметры эфемериды Луны EPM2022, которая является частью разработанных в ИПА РАН эфемерид EPM (Ephemerides planets and Moon). При получении этой новой версии эфемериды было использовано 31589 высокоточных лазерных наблюдений Луны (LLR_nor-mal points), которые являются основой для построения лунных эфемерид.

Модель орбитально-вращательного движения Луны, как часть модели движения тел Солнечной системы эфемериды EPM, реализована в программном комплексе ERA8 [1]. Модель строится путем совместного численного интегрирования орбитального движения Солнца и планет расширенным методом Адамса в инерциальной системе отчета BCRS с пользованием динамической шкалы времени TDB, с дополнительными возмущениями от крупнейших астероидов (301), пояса астероидов (THO-30), кольца THO, Троянцев Юпитера, сжатия Солнца. Количество определяемых параметров эфемериды Луны EPM2022 — около 100. В результате проведенной обработки и анализа новых наблюдений:

– получены новые параметры эфемериды Луны EPM2022 и приведены их ошибки;

– проанализированы и сравнены с параметрами, полученными по эфемеридам Луны INPOP2021a, (France) [2] и эфемеридам DE430, DE440, (USA) [3] на интервале 40 лет;

– в результате показано, что точности всех трех эфемерид практически одинаковы.

Литература

1. Pavlov D., Skripnichenko V. Rework of the ERA software system: ERA8 // Proccedings of the Journees. 2014. P. 243–246.

2. Fienga A., Deram P., Viswanathan V., et al. INPOP21a planetary ephemerides. CNRS UMR8028. 2021, Observatoire de Paris.

3. Ryan S. P., Williams M. F., James G. W., Dale H. B. The JPL planetary and Lunar ephemerides DE440 and 441 // JPL, California Inst. of Techn., 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109-099, USA.

Научно-технические предложения по калибровке высокоточного радиовысотомера (альтиметра) отечественной космической геодезической системы в акватории Черного моря

Н. Н. Яковлев, А. В. Круглов, В. Н. Филатов,
О. Ю. Федоров, И. П. Лангеман, Е. В. Даргель

АО «РКС», г. Москва, Россия

Целевые задачи космической геодезии по определению и уточнению фундаментальных параметров и гравитационного поля Земли продолжают оставаться актуальными. Одним из направлений по решению данных задач является применение космических геодезических систем с высокоточным радиовысотомером (альтиметром) на борту КА.

В докладе представлены научно-технические предложения по калибровке высокоточного радиовысотомера (альтиметра) отечественной космической геодезической системы. Авторами учтен опыт выполненных работ по калибровке высокоточного радиовысотомера (альтиметра) в акватории Черного моря в октябре 2021 г. Основным предложением является создание измерительного поля из волномерных буев, что позволит отказаться от использования модели геоида в районе проведения калибровки (исключить влияние погрешностей модели геоида) и повысить точность определения значения динамической топографии.