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

Девятая всероссийская конференция Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2021)

13–17 сентября 2021 г. Санкт-Петербург

Тезисы докладов

Санкт-Петербург 2021 Сборник содержит расширенные тезисы докладов, представленных на 9-й всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2021), Санкт-Петербург, 13–17 сентября 2021 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.

Содержание

| Каталог малых тел на сайте ИПА РАН Д. А. Аксим, И. А. Безруков, Ю. С. Бондаренко, А. Г. Водолагина, Н. Б. Железнов, О. М. Кочетова, В. Б. Кузнецов | 12 |
|---|----|
| Передача сигналов опорной частоты и шкалы времени по атмосферным оптическим линиям связи, комплексирование волоконных и оптических каналов передачи И. М. Аничев, А. А. Барский, А. С. Батура, А. В. Забегайло, С. В. Подрезов | 13 |
| Состояние и перспективы развития комплексов хранения национальной шкалы времени С. Ю. Антропов, Е. Ю. Глазов, А. В. Наумов, О. А. Картавенко, Ю. Ф. Смирнов | 14 |
| Вычисление аппаратных дифференциальных задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС А. А. Аржанников, В. Д. Глотов, В. В. Митрикас | 17 |
| Определение элементов орбиты искусственного спутника Земли по РСДБ-наблюдениям на коротких интервалах наблюдений И. А. Арнаут, В. Ф. Зимовский, И. Ф. Суркис | 19 |
| Определение формы и ориентации оси вращения астероида по его световым кривым А. А. Арсентьева, Д. Е. Вавилов, Ю. Д. Медведев | 20 |
| О расширении функциональных возможностей навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем при работе по двум спутниковым системам В. И. Бабуров, Н. В. Васильева, Н. В. Иванцевич | 21 |
| Новые методы достижения перспективного уровня точности координатно-временных измерений И. В. Безменов, И. Ю. Игнатенко, С. Л. Пасынок | 23 |
| Возможности реализации высокоточных сличений пространственно удаленных наземных ШВ, наземной и бортовой ШВ высокостабильных эталонов двухпутевым методом в дуплексном режиме на основе измерений запросных средств наземного комплекса управления ГЛОНАСС | 24 |

| Исследование источников оптической накачки для квантовых стандартов частоты на рубидиевой газовой ячейке | 25 |
|--|-----|
| О. В. Березовская, С. А. Ермаков, Г. М. Смирнова, М. В. Хуторщиков | 23 |
| О. Б. Березовская, С. А. Ермаков, Г. М. Смирнова, М. Б. Ауторщиков | |
| Радиотелескоп РТ-1.8 для наблюдений за солнечной активностью | 27 |
| Д. С. Бетеня, В. Ю. Быков, Ю. В. Векшин, Д. В. Ерофеев, М. Б. Зотов, А. С. Лавров, В. Г. Стэмпковский, Е. Ю. Хвостов, В. К. Чернов, А. М. Шишикин | |
| Использование данных информационных центров ГНСС | |
| для оценивания характеристик бортовых часов космического аппарата | 28 |
| П. П. Богданов, С. А. Михайличенко, А. Ю. Феоктистов | |
| Радиолокационные наблюдения Луны на базе радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое» и антенны DSA 3 в Маларгуэ | 29 |
| Ю. С. Бондаренко, Д. А. Маршалов, С. Макарчук, А. де Неврез, Д. Пасос | |
| Модернизация спутникового лазерного дальномера «Сажень-ТМ» в обсерватории «Светлое» | 30 |
| В. Б. Бурмистров, Е. В. Бурмистров, И. С. Гаязов, Д. В. Иванов, Г. Н. Ильин, А. В. Ипатов, Ю. В. Кацев, В. В. Коваль, А. Ф. Корнев, В. А. Митряев, И. А. Рахимов, С. Г. Смоленцев | |
| Метод натурных измерений профиля интенсивности излучения в зоне космического аппарата для спутникового лазерного дальномера наземного базирования | 32 |
| Е. В. Бурмистров, И. А. Елантьев, С. А. Кононаева, А. О. Муркин | |
| Корреляционная обработка РСДБ-наблюдений космических аппаратов на радиотелескопах комплекса «КВАЗАР-КВО» | 33 |
| М. В. Васильев, В. Ф. Зимовский, А. Е. Мельников, И. Ф. Суркис | |
| Влияние нестабильности задержки сигналов в аппаратуре радиотелескопов на оптимальное время накопления корреляционного отклика радиоинтерферометра Ю. В. Векшин, В. О. Кен | 34 |
| | 2.5 |
| Распределение орбит транснептуновых объектов Т. А. Виноградова | 35 |

| гравиметрический пункт в оосерватории «Светлое» радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» | 36 |
|---|----|
| Л. Ф.Витушкин, И.С. Гаязов, Д.В. Иванов, А.В. Ипатов, Е.П. Кривцов, П.П. Кролицкий, В.В. Наливаев, О.А. Орлов, И.А. Рахимов, С.Г. Смоленцев | |
| Прогнозирование расхождения шкал времени в ГНСС: результаты и перспективы | 38 |
| И. Д. Витчак, А. В. Сальцберг, К. Г. Шупен Высокостабильная атмосферная линия | |
| для передачи сигнала оптической частоты | 39 |
| Г. А. Вишнякова, К. С. Кудеяров, Э. О. Чиглинцев, Д. С. Крючков, Н. О. Жаднов, К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский | |
| Возможность выполнения перспективных требований «Радионавигационного плана Российской Федерации» на трассах Северного морского пути | 40 |
| М. А. Воронов, С. М. Воронов | |
| Анализ влияния температуры на разность фаз сигнала опорной частоты А. В. Вытнов, В. В. Лысакова | 41 |
| Когерентное суммирование сигналов водородных стандартов частоты для повышения точности РСДБ-измерений | 42 |
| А. В. Вытнов, К. Г. Мишагин, В. А. Поляков | |
| Автономная навигация летательных аппаратов на основе дипольной анизотропии реликтового излучения | 43 |
| В. О. Гладышев, В. Л. Кауц, А. В. Каютенко, П. П. Николаев, Е. А. Шарандин | |
| Проблема точности сигналов времени в РФ | 44 |
| А. С. Глазунов | |
| Оптические часы на нейтральных атомах тулия | 45 |
| А. А. Головизин, Д. О. Трегубов, Д. А. Мишин, Д. И. Проворченко, В. Н. Сорокин, К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский | |
| Экспериментальные исследования сверхширокополосного | |
| аналого-цифрового преобразователя для радиоастрономической аппаратуры | 46 |
| С. А. Гренков. А. В. Крохалев. Л. В. Федотов | 10 |

| Прогноз параметров вращения Земли с использованием методов локальной аппроксимации | 47 |
|--|----|
| М. С. Грибанова, Е. А. Скурихина | |
| Результаты калибровки альтиметрических измерений космической геодезической системы «ГЕО-ИК-2» на акватории Рыбинского водохранилища И. В. Гусев, Е. В. Даргель, И. П. Лангеман, С. А. Лебедев | 48 |
| Система автономной навигации для малых космических аппаратов в составе кластера Т. В. Данилова, М. А. Архипова, М. А. Маслова | 49 |
| Текущее состояние и перспективы развития средств измерений в области времени, частоты и гравиметрии С. И. Донченко, О. В. Денисенко, В. Н. Федотов, А. М. Каверин, В. Ф. Фатеев, М. Н. Хромов | 50 |
| Развитие Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени и формирование национальной шкалы времени Российской Федерации С. И. Донченко, О. В. Денисенко, В. Н. Федотов, Ю. Ф. Смирнов, И. Б. Норец | 52 |
| Высокоточная система передачи и сравнений шкал времени по волоконно-оптическим линиям связи СОДС ШВ-М С. С. Донченко, О. В. Колмогоров, Д. В. Прохоров | 54 |
| Состояние макетирования ключевых узлов космической гравитационно-волновой антенны SOIGA С. С. Донченко, В. Ф. Фатеев, Р. А. Давлатов, Д. А. Соколов, Е. А. Лавров, И. О. Скакун | 55 |
| Возможности сравнения шкал времени и частот в радиоинтерферометре нового поколения с волоконно-оптической линией передачи времени Е. Т. Жуков, А. В. Вытнов | 56 |
| Программное обеспечение для визуализации результатов корреляционной обработки РСДБ-данных М. С. Зорин, А. С. Кумейко, В. О. Кен | 57 |

| Оперативные определения всемирного времени по наблюдениям РСДБ-сети «Квазар-КВО» | 58 |
|---|----|
| Д. В. Иванов, А. В. Ипатов, А. В. Вытнов, И. А. Безруков, А. А. Дьяков, В. О. Кен, Р. А. Купцов, С. Л. Курдубов, Д. А. Маршалов, А. Е. Мельников, А. Г. Михайлов, Е. В. Носов, И. А. Рахимов, А. И. Сальников, Е. А. Скурихина, В. Г. Стэмпковский, И. Ф. Суркис, Е. Ю. Хвостов | |
| Спектры сильнейших стандартных источников на эпоху 2016.0 | 60 |
| В. П. Иванов, А. В. Ипатов, И. А. Рахимов, Т. С. Андреева | |
| Оценка влажностной компоненты задержки оптического сигнала в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» по данным радиометрии Γ . H . U льин | 61 |
| Результаты мониторинга мазерного излучения ОН с частотой 1665 МГц в источниках W3, W49, W51 и W75 на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Светлое» А. В. Ипатов, И. А. Рахимов, С. А. Гренков, Н. Е. Кольцов | 62 |
| Система сбора данных электропривода РТ-32 на основе программируемых логических контроллеров А. В. Исаенко, А. М. Шишикин, И. А. Рахимов | 63 |
| Методы оценки погрешности навигационной аппаратуры потребителей ГНСС в условиях воздействия помеховых радиосигналов А. М. Каверин, В. Б. Пудловский | 64 |
| Стабильность задержек сигналов ГНСС в приемной аппаратуре A. A. Карауш | 65 |
| Экспериментальное исследование результатов калибровки НАП, размещенных на территории Московской области, по сигналам ГЛОНАСС Е. А. Карауш | 66 |
| Синергетический подход к созданию саморегулирующегося стандарта частоты и времени | 67 |
| В. А. Карелин | |
| О проблемах создания ядерно-оптического стандарта частоты на основе ²²⁹ Th | 69 |
| Ф. Ф. Карпешин, М. Б. Тржасковская, Л. Ф. Витушкин | |

| Совместная передача сигналов опорной частоты и шкалы времени по одному оптическому волокну | 70 |
|--|------|
| А. С. Карпичев, П. В. Зиновьев, А. В. Вытнов | 70 |
| • | |
| Уточнение размера астероида по его радиолокационному изображению | 71 |
| К. В. Киселев, Ю. Д. Медведев | |
| Некоторые методы повышения точности компенсации | |
| фазовой нестабильности при передаче сигналов частоты и времени | 72 |
| Р. С. Кобяков, Р. Н. Новожилов, И. А. Писарев, А. В. Жеглов, С. Ю. Медве | гдев |
| Развитие оптических стандартов частоты: | |
| компактность, стабильность, уменьшение систематики | 73 |
| Н. Н. Колачевский | |
| Пикосекундные Nd:YAG лазеры для лунной лазерной дальнометрии | |
| с субджоулевым уровнем выходной энергии | 74 |
| А. Ф. Корнев, Р. В. Балмашнов, В. В. Коваль | |
| Пикосекундный Nd:YAG лазер с широким рабочим температурным диапазоном (-40 +40°C) | 75 |
| А. Ф. Корнев, Ю. В. Кацев, Д. О. Оборотов, И. Г. Кучма, В. В. Коваль | |
| Определение предварительной орбиты в некомпланарном случае | 76 |
| В. Б. Кузнецов | |
| О негравитационном эффекте в движении астероидов, | |
| сближающихся с Землей | 77 |
| В. Б. Кузнецов, Ю. А. Чернетенко | |
| Алгоритм определения азимута наземного ориентира | |
| автоматизированным астрономическим универсалом | 78 |
| Н. В. Кузьмина, С. М. Тарасов, В. В. Цодокова | |
| Синхронизация часов станций с помощью наблюдения пульсара | |
| в Крабовидной туманности | 79 |
| С. Л. Курдубов, Д. А. Маршалов | |
| Развитие системы государственного геодезического обеспечения | _ |
| территории России | 80 |
| Е. М. Мазурова | |

| Российско-кубинская ГНСС-служба для мониторинга и анализа геофизических параметров | 81 |
|---|----|
| Д. А. Маршалов, Ю. С. Бондаренко, В. В. Суворкин, И. А. Безруков, С. В. Сержанов, О. Понс | |
| Многофункциональная система преобразования сигналов для радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое» | 82 |
| Д. А. Маршалов, Е. В. Носов, Л. В. Федотов, Ю. С. Шейнман | |
| Динамические и физические особенности кометы 323P Ю. Д. Медведев, С. Р. Павлов | 83 |
| Динамические особенности околосолнечных комет Ю. Д. Медведев, С. Р. Павлов | 84 |
| Вклад ИПА РАН в подготовку ITRF2020 С. М. Миронова, С. Л. Курдубов, Е. А. Скурихина | 85 |
| Использование астроизмерителя для изучения тонкой структуры локального аномального гравитационного поля М. М. Мурзабеков | 86 |
| Оценка состояния частотно-временного обеспечения ГНСС по данным Международной службы ГНСС и других источников О. Е. Нечаева, А. В. Сальцберг, А. Ю. Феоктистов, К. Г. Шупен | 87 |
| Обработка и анализ РСДБ-наблюдений космических аппаратов системы ГЛОНАСС комплексом «Квазар-КВО» В. В. Пасынков, И. Ф. Суркис, Е. В. Титов, Д. А. Гулидов, С. М. Широкий | 88 |
| Текущие работы ГМЦ ГСВЧ в части определения ПВЗ <i>С. Л. Пасынок, И. В. Безменов, И. Ю. Игнатенко, В. С. Иванов, Е. Н. Цыба, В. Е. Жаров</i> | 90 |
| Феномен различных систематических погрешностей измерений псевдодальности по сигналам НКА с общей рабочей частотой Д. С. Печерица, В. Н. Федотов | 91 |
| Солнечное затмение 10.06.2021 г. по наблюдениям на радиотелескопах РТ-32 и РТ-13 в обсерваториях «Светлое» и «Бадары» (первые результаты) И. А. Рахимов, Т. С. Андреева, Н. А. Топчило, Н. Г. Петерова, П. В. Иванов, А. В. Ипатов, Г. Н. Ильин, В. Г. Олифиров, Е. Ю. Хвостов | 92 |

| Адаптивное формирование выборки измерений аппаратуры спутниковой навигации | |
|---|-----|
| высокоорбитального космического аппарата | 93 |
| Г. В. Скорынина | |
| Адаптивный подход к коррекции оценки влажностной тропосферной задержки | 94 |
| В. Г. Стэмпковский, Г. Н. Ильин, А. М. Шишикин | |
| Синтезирование круговой поляризации при корреляционной обработке РСДБ-наблюдений, выполненных на радиотелескопах РТ-13 с линейными поляризациями И. Ф. Суркис | 95 |
| и. Ф. Суркис | |
| Система контроля навигационного поля КНС ГЛОНАСС / GPS на территории Восточного полушария Земли беззапросными измерительными системами | 96 |
| Н. А. Тестоедов, В. М. Владимиров, Д. Н. Рыжков, А. В. Кузовников, Р. Д. Маликов | 90 |
| Определение азимута по радионаблюдениям геостационарных ИСЗ Д. А. Трофимов, С. Д. Петров, И. В. Чекунов | 97 |
| Определение видимых собственных движений объектов на небесной сфере | 98 |
| В. Н. Тряпицын | |
| Технологические основы навигационно-баллистического обеспечения управления КА и примеры применения перспективных космических технологий А. Е. Тюлин, В. В. Бетанов | 99 |
| | 102 |
| Развитие геоцентрической системы координат Республики Узбекистан Д. Ш. Фазилова, М. Н. Рахимбердиева, Б. Т. Халимов | 102 |
| Квантовый нивелир и сеть «Квантовый футшток». Возможности и проблемы реализации В. Ф. Фатеев | 103 |
| Метод повышения детальности гравиметрических карт В. Ф. Фатеев. Л. С. Бобров | 105 |

| Гравитационная система навигации на поверхности Земли и Луны | 106 |
|--|-----|
| В. Ф. Фатеев, Д. С. Бобров, Р. А. Давлатов, В. П. Лопатин, М. М. Мурзабеков, Ю. В. Гостев, П. Г. Харламов, Ю. В. Москвитин, Д. С. Олейников | |
| Применение эволюционной оптимизации в работе алгоритмов предупреждения столкновения воздушных судов в воздухе В. В. Худошин, Н. В. Иванцевич | 107 |
| Метод повышения точности определения орбит спутников глобальных навигационных систем в базисе нейросетевого моделирования Е. Н. Цыба, О. А. Волкова, С. С. Панарин, С. Л. Пасынок | 108 |
| Оптический стандарт частоты на одиночном ионе иттербия С. В. Чепуров, Н. А. Павлов, А. А. Луговой, С. Н. Багаев, А. В. Тайченачев | 109 |
| Охлаждаемый сверхширокополосный квадратурный направленный ответвитель В. С. Черников, Е. Ю. Хвостов, В. К. Чернов | 110 |
| Оценка влияния светового давления на определение орбиты навигационных спутников ГЛОНАСС И. Н. Чувашов | 111 |
| Методы синтеза полосы частот при постпроцессорной обработке на корреляторе RASFX РСДБ-наблюдений, проведенных на РТ-32 В. А. Шантырь, А. С. Кумейко, И. Ф. Суркис, А. Е. Мельников | 112 |
| Параметры эфемериды Луны EPM2021 Э. И. Ягудина, М. О. Кан | 113 |
| Методика расчета допустимого шага дискретизации цифровой модели рельефа в зависимости от степени пересечённости местности $A.~U.~Яковлев,~B.~\Phi.~Алексеев,~Д.~O.~Медянников,~K.~K.~Жбанов$ | 114 |
| Опыт эксплуатации распределенного кластерного хранилища vSAN в ИПА РАН В 4 Якорлер И 4 Берруков 4 И Сальников | 115 |

Каталог малых тел на сайте ИПА РАН

Д. А. Аксим, И. А. Безруков, Ю. С. Бондаренко, А. Г. Водолагина, Н. Б. Железнов, О. М. Кочетова, В. Б. Кузнецов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена включению в Каталог нумерованных малых планет сведений о динамике комет, которые были получены в результате оригинальных исследований и применения программного обеспечения, разработанного в ИПА РАН. Ненумерованные планеты, имеющие несколько наблюденных оппозиций (т. е. планеты с достаточно надежными орбитами), также были включены в Каталог, который со временем был переименован в Каталог малых тел [1–3]. В настоящее время число нумерованных малых планет в Каталоге составляет более 567000, ненумерованных планет с несколькими наблюденными оппозициями — около 284000. Общее число комет превышает 3600.

Выполнено сравнение кометных данных Каталога с данными Лаборатории реактивного движения США [4] на примере кометы 101P/Chernykh и ее фрагмента 101P/Chernykh-B, а также межзвездных объектов 1I/ Оитиатиа и 2I/Borisov. В качестве примера получения орбиты кометы с использованием радиолокационных наблюдений представлена орбита кометы 209P/LINEAR, относящаяся к объектам, попеременно сближающимся с Землей и Юпитером. Показано, что орбитальные данные этих тел и сведения об обстоятельствах их сближений с большими планетами, размещенные на сайтах ИПА РАН и Лаборатории реактивного движения, очень близки.

- 1. Аксим Д. А., Безруков И. А., Бондаренко Ю. С., Водолагина А. Г., Железнов Н. Б, Кочетова О. М., Кузнецов В. Б.. Каталог нумерованных малых планет на сайте ИПА РАН // Труды ИПА РАН. СПб: ИПА РАН, 2019. Вып. 51. С. 3–12.
- 2. Аксим Д. А., Безруков И. А., Бондаренко Ю. С. и др. Каталог малых планет на сайте ИПА РАН // Научные труды Института астрономии РАН. 2020. Том 5. Вып. 1. С. 32–35.
- 3. Институт прикладной астрономии Российской академии наук. Каталог малых тел [Электронный ресурс]. URL: http://iaaras.ru/dept/lsbss/mpc/ (дата обращения: 1.08.2021)
- 4. Jet Propulsion Laboratory, US. JPL Small-Body Database Browser [Электронный ресурс]. URL: https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi (дата обращения: 1.08.2021).

Передача сигналов опорной частоты и шкалы времени по атмосферным оптическим линиям связи, комплексирование волоконных и оптических каналов передачи

И. М. Аничев, А. А. Барский, А. С. Батура, А. В. Забегайло, С. В. Подрезов

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Актуальность прецизионной синхронизации потребителей в локальном позиционном районе определяется активизацией применения технологии высокоскоростной телекоммуникации типа 5G, 6G и систем локальной навигации аэропортов, а также совершенствованием технологии измерений текущих навигационных параметров НКУ ГЛОНАСС. При этом, несмотря на то что оптоволоконные линии доказали свою пригодность для прецизионной частотно-временной передачи, они ограничены возможностями передачи только между фиксированными узлами, соединенными оптоволоконной линией. Большинство приложений требует более гибких соединений, восстановления разрывов волоконно-оптических линий передачи (ВОЛС), преодоления горных, водных и других препятствий. Решением проблемы является использование атмосферной оптической линии связи (АОЛС) для прецизионной частотно-временной передачи двухсторонним (двухпутевым) методом — Optical Two-Way Time-Frequency Transfer (OTWTFT).

В работе предложена технология прецизионной передачи сигналов ШВ и опорной частоты в ограниченном районе по каналам типовых АОЛС. Показано, что потенциальные потери точности при передаче аналоговых сигналов по цифровым каналам связи ВОЛС и АОЛС не являются существенными при реализации прикладных задач прецизионной передачи сигналов частоты и времени. Рассмотрены способы компенсации возмущений, обусловленных средой распространения — атмосферной турбулентностью в каналах АОЛС, а также совместного влияния медленных температурных возмущений фазы волокна и атмосферной турбулентности в гибридных каналах ВОЛС — АОЛС.

Результаты моделирования и экспериментальные исследования подтвердили возможности практической реализации необходимой точности передачи эталонных сигналов частоты и времени при использовании отечественных коммерческих АОЛС.

Состояние и перспективы развития комплексов хранения национальной шкалы времени

С. Ю. Антропов, Е. Ю. Глазов, А. В. Наумов, О. А. Картавенко, Ю. Ф. Смирнов

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

Для обеспечения достижения заданных характеристик системы ГЛОНАСС по согласованию национальной шкалы времени со шкалой всемирного координированного времени UTC в рамках выполнения ОКР «Шкалы» ФЦП ГЛОНАСС 2012—2020 гг. были модернизированы комплексы хранения национальной шкалы времени (КХШВ) первичного эталона единиц времени и частоты ГЭТ 1 (п. Менделеево) и комплексы хранения ШВ государственных эталонов единиц времени и частоты ВЭТ 1-7 (г. Хабаровск), ВЭТ 1-19 (г. Новосибирск), ВЭТ 1-5 (г. Иркутск), РЭТ 1-1 (г. Петропавловск-Камчатский).

Основу всех КХШВ составляет эталонный комплекс времени и частоты (ЭКВЧ) [1], включающий базовый комплекс времени и частоты (БКВЧ) с водородными стандартами частоты и времени нового поколения [2] и аппаратно-программным комплексом внутренних сличений, комплекс формирования ШВ, комплекс сравнений ШВ, комплекс управления и комплекс информационного обмена.

ЭКВЧ формирует высокостабильные синусоидальные сигналы частотой 5 МГц и импульсные сигналы ШВ и обеспечивает взаимные сравнения частот и ШВ водородных стандартов частоты и времени.

Комплекс средств технического обеспечения из состава КХШВ предназначен для организации гарантированного и бесперебойного электропитания и обеспечения температурно-влажностного режима составных частей ЭКВЧ.

По своим техническим и эксплуатационным характеристикам модернизированные комплексы соответствуют современному уровню развития измерительной техники, а по отдельным показателям превышают их [3]. В соответствии с официальными публикациями Международного бюро мер и весов смещение национальной ШВ UTC(SU) относительно UTC в 2020-2021 гг. не превышает ± 3 нс против ± 10 нс в 2012 г. [4].

На следующем этапе развития системы ГЛОНАСС в 2021–2030 гг. планируется совершенствование технических средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС, обеспечивающих достижение тактикотехнических характеристик системы ГЛОНАСС по согласованию нацио-

нальной ШВ со шкалой всемирного координированного времени UTC на $2025~\rm r.$ с погрешностью не более $\pm 2~\rm hc$ и на $2030~\rm r.$ — с погрешностью не более $\pm 1~\rm hc.$ На основе модернизированных комплексов хранения национальной ШВ будет создан комплекс воспроизведения, хранения единиц времени и частоты и передачи национальной ШВ UTC(SU) с улучшенными метрологическими характеристиками (КВХ НШВ). Для этого необходимо решение следующих основных задач:

- разработка оптического стандарта частоты на охлажденных атомах с улучшенными метрологическими характеристиками (УМХ);
- разработка метрологического цезиевого репера частоты фонтанного типа с УМХ;
- разработка репера частоты фонтанного типа на холодных атомах рубидия с УМХ;
- разработка хранителей единиц времени и частоты фонтанного типа на холодных атомах рубидия с УМХ и показателями надежности;
- разработка водородных стандартов времени и частоты с улучшенными характеристиками долговременной нестабильности;
- разработка средств внутренних сличений, усиления и размножения эталонных сигналов времени и частоты сигналов с УМХ;
 - разработка средств формирования ШВ с УМХ;
- совершенствование математического, алгоритмического и информационного обеспечения расчета и формирования ШВ;
- совершенствование технической инфраструктуры комплексов хранения ШВ;
 - разработка нового эталонного комплекса времени и частоты;
- оснащение комплексов хранения ШВ средствами измерений времени и частоты нового поколения;
- разработка оптического стандарта частоты на ультрахолодных атомах с УМХ.
- Комплекс воспроизведения, хранения единиц времени и частоты и передачи национальной ШВ UTC(SU) с УМХ должен обеспечивать:
- воспроизведение, хранение единиц времени и частоты, воспроизведение и хранение национальной ШВ РФ, обеспечение системы ГЛО-НАСС эталонными значениями времени и частоты, национальной шкалой времени с целью достижения заданных тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС по формированию и поддержанию ШВ системы ГЛОНАСС;
- передачу эталонных сигналов времени и частоты, национальной ШВ техническим средствам, эксплуатируемым на объектах размещения составных частей КВХ НШВ (государственных эталонах единиц времени

и частоты), с целью обеспечения решения задач мониторинга параметров и характеристик навигационного поля, создаваемого системой ГЛОНАСС, а также задач метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС.

- 1. Донченко С. И., Блинов И. Ю., Гончаров А. С. и др. Эталонный комплекс времени и частоты // Материалы VIII Международного симпозиума Метрология времени и пространства, Санкт-Петербург, 14–16 сентября, 2016 г. пос. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2017.
- 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, Санкт-Петербург, 14–16 сентября, 2016 г. пос. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2017.
- 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. Circular T [Электронный ресурс]. URL: https://www.bipm.org/en/time-ftp/circular-t (дата обращения 10.08.2021).

Вычисление аппаратных дифференциальных задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС

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

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

Доклад посвящен проблеме моделирования полного электронного содержания в ионосфере и калибровке навигационной аппаратуры с помощью измерений ГНСС на этапе эксплуатации. Актуальность задачи обусловлена повышением требований к точности навигационных определений ГЛОНАСС в целях сохранения достигнутого потенциала системы. Кратко представлены некоторые методы уточнения дифференциальных кодовых задержек (ДКЗ) КА и беззапросных измерительных станций (БИС) для существующих ГНСС, а также рассмотрена технология построения локальных и глобальных карт полного электронного содержания в ионосфере. Приведена оценка точности межчастотных задержек из навигационных кадров всех ГНСС.

В качестве ионосферной модели используется однослойная модель, в которой предполагается, что все электроны сосредоточены в тонком слое, расположенном на некоторой высоте над поверхностью Земли. Рассмотрены три способа определения дифференциальных кодовых задержек на суточном интервале: с помощью существующих карт ионосферы, с помощью уточнения параметров локальной ионосферы по измерениям одной БИС, а также с помощью уточнения параметров глобальной ионосферной карты и ДКЗ по измерениям сети БИС. В ИАЦ КВНО ежедневно осуществляется расчет задержек безионосферных комбинаций измерений с 2007 г. и ДКЗ — с 2017 г.

Отдельно рассмотрен вопрос разделения суммарной дифференциальной кодовой задержки на сумму ДКЗ БИС и КА. Для калибровки КА с учетом литерной зависимости необходимо использовать эталонное средство. В качестве эталона может выступать «средний приемник» по сети, либо несколько отдельно выбранных калиброванных приемников [1].

Представлена оценка точности межчастотных задержек в навигационных кадрах всех ГНСС по данным ИАЦ КВНО. Погрешность межчастотной задержки в навигационном кадре ГЛОНАСС значительно выше в сравнении с другими ГНСС (СКО — более $0.5\,\mathrm{m}$ для ГЛОНАСС и менее $0.1\,\mathrm{m}$ для остальных ГНСС). Проведено сравнение четырех вариантов расчета ДКЗ ГЛОНАСС, все четыре набора ДКЗ имеют взаимные СКП между собой менее $0.1\,\mathrm{m}$.

Также приведена оценка относительной точности расчета ионосферных карт ИАЦ КВНО: СКО составляет ~ 1 ТЕС для локальных карт, ~ 1.5 ТЕС — для глобальных карт ионосферы и ~ 1.1 ТЕС — над материками (1 ед. ТЕС = 10^{16} электронов / кв. м, что соответствует задержке в ~ 16 см для L1).

Литература

1. 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.

Определение элементов орбиты искусственного спутника Земли по РСДБ-наблюдениям на коротких интервалах наблюдений

И. А. Арнаут, В. Ф. Зимовский, И. Ф. Суркис

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Проведение РСДБ-наблюдений КА, в том числе ИСЗ, — один из современных методов уточнения параметров орбиты КА. Высокоточное определение параметров орбиты ИСЗ осуществляется в течение длительного времени (не менее витка ИСЗ). Ограниченный интерес представляет уточнение элементов орбиты ИСЗ на коротких интервалах наблюдений — как для коррекции предвычисленных задержек перед второй итерацией корреляционной обработки, так и для оперативного уточнения траектории ИСЗ.

Тестовые наблюдения высокоорбитального ИСЗ (с большой полуосью орбиты около 25 тыс. км) были проведены на РСДБ-комплексе «Квазар-КВО» [1] в 2020 г. Скан длительностью 900 сек был обработан на корреляторе RASFX [2]. Разности между предвычисленными и наблюдаемыми геометрическими задержками («невязки») составили от 1.5 до 3.5 мкс (километровая ошибка в априори известных параметрах орбиты ИСЗ).

Методом наименьших квадратов были уточнены параметры орбиты ИСЗ и повторена корреляционная обработка. При этом хорошо была определена плоскость орбиты ИСЗ, но (что естественно для короткого интервала наблюдений) выявлена высокая корреляция между большой полуосью и эксцентриситетом орбиты.

Невязки после второй итерации обработки не превышали 3 нс (метровая точность определения элементов орбиты).

- 1. Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., I. Russian VLBI network "Quasar": Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2019. Vol. 10, Issue 2. P. 150–156.
- 2. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента, 2018. № 6. С. 1–9.

Определение формы и ориентации оси вращения астероида по его световым кривым

А. А. Арсентьева, Д. Е. Вавилов, Ю. Д. Медведев

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Кривая блеска вращающегося астероида определяется формой астероида, его поверхностными характеристиками рассеяния света и положением оси вращения астероида относительно Солнца и наблюдателя. Вращение большинства астероидов совершается вокруг единственной оси, сохраняющей свое направление в пространстве. Это подтверждается наблюдениями: световые кривые чаще всего являются строго периодическими с единственным периодом. Серия фотометрических наблюдений длительностью в несколько часов, как правило, достаточна для определения периода вращения. Кроме этого, по одной кривой, охватывающей по длительности больше периода, можно определить профиль поверхности тела. Наличие нескольких десятков световых кривых, полученных в различных оппозициях, позволяет определить 3D фигуру и положение оси вращения астероида.

В данной работе авторы использовали следующую методику. Фигура астероида аппроксимировалась выпуклым многогранником с n гранями. Ориентация граней относительно тела астероида определялась нормалями к граням, заданными равномерно на сфере. Считалось, что астероид вращается так, что ось вращения неподвижна в пространстве и относительно тела астероида. Неизвестными в методике являлись площади граней Si (i = 1, n) и два угла α и δ , фиксирующие положение оси вращения астероида в экваториальной системе координат. Для конкретных значений а и δ величина O-C, определяющая отличие модельных кривых блеска от наблюденных, является положительно определенной квадратичной функцией величин Si. Минимум этой функции дает набор значений площадей граней Si. Перебирая значения а и б, можно определить набор Si, дающий наименьшее значение О - С. Полученные значения, обеспечивающие минимальное значение О - С, можно считать искомыми величинами. Затем по полученным значениям площадей граней и нормалям определялась 3D форма астероида в виде многогранника.

Описанная методика применена к световым кривым двух астероидов 15 Eunomia и 93 Minerva. Полученные значения ориентации оси вращения и изображения 3D фигуры астероидов не противоречат данным, полученным другими исследователями.

О расширении функциональных возможностей навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем при работе по двум спутниковым системам

В. И. Бабуров¹, Н. В. Васильева¹, Н. В. Иванцевич^{1,2}

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

В настоящее время спутниковые радионавигационные системы (СРНС) используются в различных областях человеческой деятельности, особенно в области движения транспортных средств. Обеспечивая непрерывность навигационных полей, спутниковые системы второго поколения, работающие на средневысоких орбитах, открывают перспективы для навигации летательных аппаратов различного назначения: от воздушного средства до космических аппаратов и малых беспилотных летальных аппаратов. Реализуются как штатные, так и нештатные варианты использования навигационных полей СРНС.

К штатному использованию навигационного поля относится функционирование навигационной аппаратуры потребителей СРНС при условиях, определенных интерфейсными документами на эти системы [1, 2]. В таких ситуациях должна обеспечиваться точность навигационного определения, указанная в документах.

Однако при эксплуатации воздушного судна, космического аппарата, беспилотного летального аппарата и других объектов возникают следующие нештатные ситуации:

- затенения отдельных областей окружающего потребителя пространства, например, горами, постройкам или искусственными препятствиями;
- работа в условиях крена, тангажа воздушного судна или качки морского судна;
- наличие отражений от подстилающей и других отражающих поверхностей;
 - наличие организованных помех, помех по диапазону;
 - другие нештатные ситуации.

Некоторые из перечисленных трудностей могут быть преодолены, если использовать информационную избыточность навигационного поля, создаваемого одной СРНС, например, ГЛОНАСС или GPS [3], но методы более эффективны при использовании двух глобальных навигационных

систем, например ГЛОНАСС + GPS, ГЛОНАСС + BeiDou и других сочетаниях СРНС [4].

В докладе рассмотрен первый вариант формирования навигационного поля двух систем. Проанализирован состав рабочих созвездий навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ), оценена информационная избыточность рабочих созвездий НИСЗ при штатном и различных вариантах нештатного использования навигационного поля; проведено сравнение с аналогичными характеристиками систем ГЛОНАСС и GPS. Рассмотрены также возможности использования информационной избыточности для упрощенных алгоритмов обработки информации при дифференциальных (относительных) местоопределениях.

Результаты получены методом имитационного математического моделирования и представлены в виде таблиц, содержащих параметры распределений числа НИСЗ в рабочих созвездиях и геометрических факторов при различных ограничениях, соответствующих нештатным ситуациям. В процессе моделирования потребитель располагался случайным образом на поверхности Земли, момент времени проведения навигационных определений выбирался случайным образом из интервала повторяемости конфигурации спутников в рабочих созвездиях. При относительных определениях первый потребитель располагался в фиксированной точке на поверхности Земли, а второй — на фиксированном расстоянии от первого, в случайном направлении.

Полученные результаты могут быть полезны при оценке точности и надёжности навигационно-временных определений бортовыми навигационно-посадочными комплексами летательных аппаратов различного назначения в сложных условиях выполнения полётов.

- 1. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС // Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.1. М., 2008.
- 2. ICD-GPS-200, Revision C. Interface control document GPS (200). US Air Force, 2000. 160 p.
- 3. Бабуров В. И., Иванцевич Н. В., Васильева Н. В., Панов Э. А. Исследование характеристик точности навигационных определений по ГЛОНАСС и GPS в условиях кренов потребителей. Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. 2008. Вып. 2. С. 192–201.
- 4. Бабуров В. И., Васильева Н. В., Иванцевич Н. В. Совместное использование навигационных полей ГЛОНАСС и GPS в сложных условиях пилотирования воздушных судов в Арктике // Региональная информатика (РИ-2020). XVII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2020)», 28–30 октября, 2020. Материалы конференции. Часть 1. СПб.: СПОИСУ, 2020. С. 332.

Новые методы достижения перспективного уровня точности координатно-временных измерений

И. В. Безменов, И. Ю. Игнатенко, С. Л. Пасынок

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

Постоянно повышающиеся требования к точности и полноте измерительной информации [1] вызывают необходимость учитывать условия наблюдения, оказывающие негативное влияние на результаты измерений.

На примере лазерной дальнометрии [2] в докладе представлены способы учета негативных факторов и новые методы автоматизированной обработки измерений, которые в совокупности с постоянным метрологическим контролем [3] позволяют перейти на качественно новый уровень.

- 1. 1Пасынок С. Л. Современные тенденции развития средств определения и прогнозирования ПВЗ // Альманах современной метрологии. 2020. № 1 (21). С. 101–115.
- 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 T. M. Nguyen. London: IntechOpen, 2021. P. 177–209.
- 3. Donchenko S., Blinov I., Ignatenko I., Tsyba E. Laser ranging in Main metrological center of the Russian State service of time, frequency and the Earth rotation parameters determination. 18th International Workshop on Laser Ranging. Pursuing Ultimate Accuracy & Creating New Synergies, November 11–15, 2013. Fujiyoshida, 2013.

Возможности реализации высокоточных сличений пространственно удаленных наземных ШВ, наземной и бортовой ШВ высокостабильных эталонов двухпутевым методом в дуплексном режиме на основе измерений запросных средств наземного комплекса управления ГЛОНАСС

П. В. Белянкин, Ю. А. Винник, А. Б. Михайлов, А. С. Михеев, С. В. Подрезов

АО «РИРВ», 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 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 сличения ШВ с использованием спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите, являющегося наиболее точным методом, не всегда возможно на практике.

В работе рассматривается подход, основанный на использовании запросных измерительных систем НКУ ГЛОНАСС для реализации дуплексного режима двухпутевого метода высокоточных сличений ШВ на основе использования многоканальности приемных трактов. Отказ от принципа одноканальности приемных трактов запросных измерительных систем и переход к многоканальным (4–6-канальным) позволяет реализовать технологию запросно-беззапросных измерений текущих навигационных параметров НКА несколькими запросными системами — технологию совместных многопозиционных измерений текущих навигационных параметров 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.

Исследование источников оптической накачки для квантовых стандартов частоты на рубидиевой газовой ячейке

О. В. Березовская, С. А. Ермаков, 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, традиционные квантовые стандарты частоты на рубидиевой газовой ячейке (КСЧ РГЯ), благодаря своим высоким точностным характеристикам, дешевизне и малым габаритам, 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, в свою очередь, требует повышения характеристик входящих в них узлов. Одним из основных узлов КСЧ РГЯ является источник оптической накачки, который обеспечивает создание инверсной населенности сверхтонкого перехода основного состояния в атомах рубидия, находящихся в газовой ячейке, по частоте которого происходит подстройка частоты кварцевого генератора в КСЧ РГЯ. Источник оптической накачки состоит из высокочастотного генератора, возбуждающего разряд в безэлектродной спектральной лампе (БЭСЛ), и ячейки-фильтра, осуществляющей изотопную фильтрацию излучения БЭСЛ.

Данная работа посвящена исследованиям изменения интегральной интенсивности излучения источника оптической накачки и параметров входящих в него спектральных приборов в процессе эксплуатации.

Представлены результаты изменения давления буферного газа Kr и количества рабочего вещества ⁸⁷Rb в БЭСЛ в процессе эксплуатации. БЭСЛ были подвергнуты ускоренным испытаниям при повышенной температуре [1]. Измерения производились радиоспектроскопическим и оптико-термическим методами [2]. Из анализа полученных данных, с учетом коэффициента ускорения, показано, что долговечность ламп составляет более 150000 ч.

Приведены результаты исследования ячеек-фильтров, характеризующихся коэффициентом оптической накачки ($K_{_{\mathrm{oH}}}$), также проведенных методом ускоренных испытаний, которые показали отсутствие изменения $K_{_{\mathrm{oH}}}$ в пределах погрешности измерений ~ 2 %.

Приведены результаты долговременных испытаний источников оптической накачки, в течение которых непрерывно велась регистрация интегральной интенсивности излучения. Определен дрейф интенсивности излучения, составивший $0.1\,\%$ за $1\,$ месяц, показано сохранение работоспособности источников в течение $15\,$ лет.

Таким образом, показано, что спектральные приборы не ограничивают срок службы КСЧ РГЯ, в том числе перспективных, а источник оптической накачки вносит вклад в дрейф частоты КСЧ РГЯ не более 1×10^{-12} за 1 месяц.

- 1. Bassevich A. B., Beresovskaya O. V., Smirnova G. M. Investigation of spectral devices source for miniaturized rubidium gas cell atomic frequency standards // 19th European frequency and time forum, March 21–24, 2005. Actes proceedings. Be-sançon: S.F.M.C., 2005. P. 291–294. URL: https://www.eftf.org/fileadmin/conferences/eftf/documents/Proceedings/proceedingsEFTF2005.pdf (accessed: 25.12.2020).
- 2. Березовская О. В., Орлов Ф. Л., Смирнова Г. М. Современная реализация оптикотермического метода для бесконтактного определения количества рабочего вещества в замкнутых объемах // Вторая международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Сборник трудов. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006. Т. 5. С. 206–207.

Радиотелескоп РТ-1.8 для наблюдений за солнечной активностью

Д. С. Бетеня¹, В. Ю. Быков², Ю. В. Векшин², Д. В. Ерофеев², М. Б. Зотов², А. С. Лавров², В. Г. Стэмпковский², Е. Ю. Хвостов², В. К. Чернов², А. М. Шишикин²

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия ²ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Наблюдения за солнечной активностью не теряют своей актуальности, что требует разработки и создания новой аппаратуры. В ИПА РАН ведется разработка нового радиотелескопа на базе антенны диаметром 1.8 м для измерений солнечного излучения в радиодиапазоне на длине волны 10.7 см для замены существующего радиотелескопа [1], аппаратура которого произведена более 30 лет назад и устарела.

Основное назначение РТ-1.8 — определение индекса солнечной активности ${\rm F}_{10.7}$ и параметров радиовсплесков, которыми пополняются ряды и базы данных о солнечной активности.

В докладе представлены основные результаты разработки нового радиотелескопа: антенной системы, приемной системы, системы регистрации, системы управления радиотелескопом. Приемная система позволяет принимать правую и левую круговую поляризацию радиоизлучения. Для идентичности трактов сигналов левой и правой круговой поляризации используются переключатель и один усилительный канал. Система регистрации выполнена на программно-определяемом радиоустройстве (SDR). Управление и передача данных осуществляются по стандарту Ethernet.

Литература

1. Кузьменко И. В., Михалина Ф. А., Капустин Б. А. Радиотелескоп РТ-2 Уссурийской астрофизической обсерватории: современное состояние и данные наблюдений // Известия вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 12. С. 1005–1010.

Использование данных информационных центров ГНСС для оценивания характеристик бортовых часов космического аппарата

П. П. Богданов¹, С. А. Михайличенко², А. Ю. Феоктистов¹

¹АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия ²АО «ИСС», г. Железногорск, Россия

Одной из задач разработчиков бортовых часов (бортовых синхронизирующих устройств) КА ГЛОНАСС является оперативный контроль их функционирования и оценка точностных характеристик в процессе эксплуатации.

Наиболее простой вариант повышения оперативности получения необходимой информации — использование измерений временных приемников на пунктах ГСВЧ, включающих непосредственно значения расхождения бортовой шкалы времени (БШВ) КА относительно наземных эталонов. Однако в этом случае измерения доступны не на всем периоде обращения КА. Кроме того, использование при обработке измерений в приемниках оперативной эфемеридной информации не обеспечивает высокой точности определения расхождения БШВ и, как следствие, оценивания характеристик бортовых часов.

Следующий вариант — использование измерений приемников на пунктах международной службы ГНСС в формате Rinex, которые позволяют определять значения расхождения БШВ с использованием как оперативной эфемеридной информации, так и апостериорной, за счет чего возможно повышение точности определения расхождения БШВ. Однако при этом сохраняется недостаток первого варианта, поскольку измерения одного пункта не охватывают весь период обращения. А для использования измерений нескольких пунктов необходимо «склеивание» данных, что существенно усложняет применение этого варианта.

В связи с этим несомненный интерес представляет использование апостериорных данных информационных центров ГНСС, включающих поправки к бортовым часам, косвенно свидетельствующие о расхождении БШВ КА. Эти данные предоставляются на весь период обращения КА с разной степенью оперативности и точности, что обеспечивает необходимую оперативность анализа функционирования бортовых часов.

Полученные результаты показывают, что использование апостериорных данных информационных центров ГНСС позволяет оценивать функционирование бортовых часов КА с задержкой не более 1 сут., а характеристики стабильности — на уровне единиц на частоте 10^{-14} .

Радиолокационные наблюдения Луны на базе радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое» и антенны DSA 3 в Маларгуэ

Ю. С. Бондаренко¹, Д. А. Маршалов¹, С. Макарчук², А. де Неврез³, Д. Пасос³

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия ²CONAE, Buenos Aires, Argentina ³Telespazio, Mendoza, Argentina

Радиолокация, являясь одним из наиболее эффективных методов наземного дистанционного исследования Луны, позволяет проводить картографирование поверхности с высоким пространственным разрешением, а также исследовать физические свойства поверхности и подповерхностного слоя. Эти данные могут быть полезны для выбора мест посадок КА, разведки и добычи полезных ископаемых, особенно в связи с возросшим на сегодняшний день интересом многих стран к освоению Луны.

В докладе представлены первые результаты бистатических радиолокационных наблюдений Луны, проводимых учеными ИПА РАН в сотрудничестве с коллективом Национальной комиссии по космической деятельности Аргентины (CONAE) в 2021 г. В наблюдениях задействованы 13.2-метровый радиотелескоп (РТ-13) обсерватории «Светлое», входящей в состав российской РСДБ-сети Квазар-КВО, и 35-метровая антенна (DSA 3) Европейской сети слежения за космическим пространством (ESTRACK), расположенная на станции Маларгуэ в Аргентине. При проведении наблюдений антенна DSA 3 облучала восточную часть Моря Дождей в районе кратера Архимед непрерывными и модулированными сигналами с круговой поляризацией на частоте 7190 МГц (4.2 см). В это же время антенна РТ-13 регистрировала отраженные от Луны эхо-сигналы в левой и правой круговых поляризациях. В результате обработки наблюдений были оценены степень шероховатости и свойства радиолокационного рассеяния поверхности Луны на сантиметровых длинах волн, а также впервые в России получены радиолокационные изображения поверхности Луны с пространственным разрешением порядка 200 м.

Модернизация спутникового лазерного дальномера «Сажень-ТМ» в обсерватории «Светлое»

В. Б. Бурмистров¹, Е. В. Бурмистров¹, И. С. Гаязов², Д. В. Иванов², Г. Н. Ильин², А. В. Ипатов², Ю. В. Кацев³, В. В. Коваль^{3,4}, А. Ф. Корнев³, В. А. Митряев², И. А. Рахимов², С. Г. Смоленцев²

¹АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия ²ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия ³ООО «Лазеры и оптические системы», г. Санкт-Петербург, Россия ⁴Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

В соответствии с планами совершенствования и развития приборной базы радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» в 2020 г. в обсерватории «Светлое» на основе установки и ввода в эксплуатацию новейшего лазерного излучателя, разработанного ООО «Лазеры и оптические системы», были выполнены работы по первому этапу модернизации квантово-оптической системы (КОС) «Сажень-ТМ».

В качестве источника излучения использован пикосекундный Nd:YAG лазер, построенный по схеме: задающий генератор — регенеративный усилитель — генератор второй гармоники. Задающий генератор представляет собой DFB-лазерный диод, работающий в режиме модуляции усиления и генерирующий лазерные импульсы длительностью 35 пс на длине волны 1064 нм [1–3].

Главная особенность лазерного излучателя — расширенный рабочий температурный диапазон (от -40 до +40°C), который обеспечивается главным образом за счет поддержания температуры корпуса излучателя лазера не ниже +20°C. Проведена доработка и наладка системы измерения дальности КОС «Сажень-ТМ» путем установки новых блоков высокоточной временной привязки.

С февраля 2021 г. выполнены лазерные наблюдения спутников различного класса на более чем 950 прохождениях. Оценки СКО измерений, полученные при формировании нормальных точек, находятся в пределах 8–30 мм в зависимости от высоты спутника: 8–13 мм — для низких спутников и 10–30 мм — для высоких, включая навигационные. Для среднеорбитальных спутников Lageos 1 и 2, используемых для внешней оценки точности наблюдений, а также для определения ПВЗ и других геодинамических параметров, среднее значение СКО измерений по 117 прохождениям составляет 15 мм. Таким образом, выполненная модернизация привела

к улучшению точности измерений лазерного дальномера «Сажень-ТМ» более чем в 2 раза.

- 1. Корнев А. Ф., Давтян А. С., Балмашнов Р. В и др. Лазерный источник пикосекундных импульсов для прецизионной дальнометрии, локации и геопозиционирования // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 44. С. 83–89.
- 2. Davtian A. S., Koval V. V., Viktorov E. A., et al. 5 mJ-level Nd:YAG regenerative amplifier. International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE, 2020. doi: 10.1109/ICLO48556.2020.9285399.
- 3. Kornev A. F., Balmashnov R. V., Kuchma I. G., et al. 0.43 J/100 ps Nd: YAG laser with adaptive compensation of thermally induced lens // Optics letters. 2018. Vol. 43, Issue 18. P. 4394-4397.

Метод натурных измерений профиля интенсивности излучения в зоне космического аппарата для спутникового лазерного дальномера наземного базирования

Е. В. Бурмистров, И. А. Елантьев, С. А. Кононаева, А. О. Муркин

АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия

Поводом для настоящей работы послужила идея д. т. н. В. П. Васильева о проведении эксперимента по локации КА в пролетном режиме: опорно-поворотное устройство неподвижно, выставлено в упреждающую точку траектории, КА «пролетает» диаграмму направленности излучения в процессе сеанса лазерной дальнометрии. Система наведения, лишенная углового шума, должна обеспечить соответствие плотности ответов в центре диаграммы излучения энергетическому расчету.

Реализация этой идеи привела к созданию инструмента — метода натурных измерений распределения интенсивности излучения по сечению лазерного пучка в зоне орбиты КА (см. рисунок) пропорционально среднему темпу отраженных сигналов, регистрируемых в одноэлектронном режиме [1] в серии пролетов.

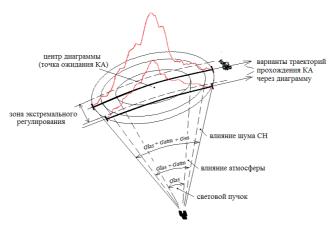


Рисунок. Варианты прохождений КА через диаграмму

Литература

1. Васильев В. П., Шаргородский В. Д. Прецизионная спутниковая ла-зерная дальнометрия на основе лазеров с высокой частотой повторения импульсов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 7. С. 6–10.

Корреляционная обработка РСДБ-наблюдений космических аппаратов на радиотелескопах комплекса «КВАЗАР-КВО»

М. В. Васильев, В. Ф. Зимовский, А. Е. Мельников, И. Ф. Суркис

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Применение метода РСДБ, который является базовым инструментом для создания фундаментальных небесной и земной систем координат, позволяет также проводить высокоточные наблюдения КА в ближнем и дальнем космосе. КА при этом могут излучать различные сигналы: маяки, телеметрию и т. д.

На РСДБ-комплексе «Квазар-КВО» [1] были проведены наблюдения нескольких КА с различными типами излучаемых сигналов. Корреляционная обработка наблюдений проводилась на программных корреляторах DiFX [2] и RASFX [3] в два этапа: на первом уточнялись спектральные характеристики зарегистрированных сигналов КА, на втором — уточнялась модель задержки для коррелятора. Уточнение осуществлялось итерационным методом: на первой итерации весь интервал наблюдений разбивался на ряд отрезков, для каждого из которых в соответствии с характеристиками сигнала подбиралась модель задержки, обеспечивающая оптимальные параметры корреляционного отклика, далее с помощью программ постпроцессорной обработки вычислялись значения задержки и скорости изменения задержки для каждого интервала. По этим значениям вычислялись коэффициенты корректирующего полинома и поправки вводились в задание коррелятора, и процесс повторялся.

По результатам проведенной обработки точность измерения СКО по задержке составила 20–60 пс и 0.2–0.6 пс/с по скорости ее изменения. В докладе представлены методика обработки наблюдений КА с различными типами излучаемых радиосигналов и результаты обработки, а также оценены точности РСДБ-измерений.

- 1. Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., I., et al. Russian VLBI network "Quasar": current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2019. Vol. 10, Issue 2. P. 150–156.
- 2. Deller A. T., Brisken W. F., Phillips C. J., et al. DiFX-2: a more flexible, efficient, robust, and powerful software correlator // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2011. Vol. 123. no. 901. P. 275–287. doi: 10.1086/658907.
- 3. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 6. С. 1–9.

Влияние нестабильности задержки сигналов в аппаратуре радиотелескопов на оптимальное время накопления корреляционного отклика радиоинтерферометра

Ю. В. Векшин, В. О. Кен

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Точность определения групповой задержки сигнала радиоисточника зависит от нестабильности задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопов, входящих в состав радиоинтерферометра. Результаты оценки нестабильности задержки можно использовать при планировании времени наблюдения источников в РСДБ-сеансах.

В докладе представлены результаты измерений стабильности задержки корреляционного отклика радиоинтерферометра на базе радиотелескопов РТ-13 [1] при непрерывном часовом сопровождении источника 3С454.3 по методике, разработанной авторами [2]. С помощью расчета отклонения Аллана получен минимум СКО задержки в S-, X-, Ка-диапазонах, соответствующий нестабильности задержки сигнала в аппаратуре. Оптимальное время накопления сигнала источника определяется таким образом, чтобы расчетное СКО задержки было не меньше найденной величины нестабильности. Приведены результаты сравнения оценок СКО определения Всемирного времени при существующем в настоящее время планировании и с учетом предложенного времени наблюдения источников.

- 1. Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., et al. Russian VLBI network "Quasar": Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2018. Vol. 10. no. 2. P. 150–156.
- 2. Векшин Ю. В., Кен В. О. Анализ стабильности задержки сигналов в приемнорегистрирующей аппаратуре радиотелескопов РТ-13 по результатам корреляционной обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 51. С.42–48.

Распределение орбит транснептуновых объектов

Т. А. Виноградова

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Транснептуновые объекты движутся в самой удалённой части Солнечной системы за орбитой Нептуна. Большая полуось их орбит превышает 30 а. е. В работе исследованы распределения элементов орбит астероидов в этой области. Показано, что на пространственном распределении астероидов в указанной области сказывается наблюдательная селекция. Рассмотрены отдельные популяции астероидов, такие как троянцы Нептуна, плутино и объекты с большой полуосью более 40 а. е. В настоящее время известно 23 троянца Нептуна. Плутино представляют собой популяцию астероидов, движущихся в устойчивом резонансе средних движений 2:3 с Нептуном. Из-за наблюдательной селекции эти астероиды представлены в пространстве двумя отдельными группами, одной из которых принадлежит Плутон. С использованием всех последних данных были рассмотрены распределения элементов орбит удалённых объектов с большими полуосями орбит более 150 а. е. Обнаруженная ранее [1] особенность распределения перигелиев орбит этих тел, на основании которой было сделано предположение о существовании далёкой большой планеты [2], в настоящее время не подтверждается.

- 1. Trujillo C., Sheppard S. A Sedna-like body with a perihelion of 80 astronomical units // Nature. 2014. Vol. 507. P. 471–474.
- 2. Batygin K. Brown M. E. Evidence for a distant giant planet in the Solar System # AJ. 2016. Vol. 151. P. 22

Гравиметрический пункт в обсерватории «Светлое» радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО»

Л. Ф. Витушкин², И. С. Гаязов¹, Д. В. Иванов¹, А. В. Ипатов¹, Е. П. Кривцов², П. П. Кролицкий², В. В. Наливаев², О. А. Орлов², И. А. Рахимов¹, С. Г. Смоленцев¹

 1 ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия 2 ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, Россия

В рамках Федерального проекта «Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в Российской Федерации» национального проекта «Наука» и в соответствии с планами развития приборной базы радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» в 2020 г. было принято решение о создании высокоточного гравиметрического пункта (ГП) для проведения постоянного гравиметрического мониторинга в обсерватории «Светлое». Это решение также направлено на реализацию инициативы IAG (Резолюция № 2) по созданию глобально распределенной опорной гравиметрической системы и гравиметрической опорной основы, построенных на абсолютных измерениях ускорения свободного падения (УСП) и его вариаций во времени современными высокоточными средствами измерений: абсолютными баллистическими и относительными криогенными гравиметрами [1, 2]. Необходимая связь такой системы с международной земной системой отсчета ITRF обеспечивается базовыми пунктами (core stations), оснащенными по принципу колокации всеми современными средствами наблюдений методами космической геодезии, к которым и относятся обсерватории комплекса «Квазар-КВО».

Для выбора месторасположения нового ГП в обсерватории «Светлое» были проведены предварительные сейсмические исследования, необходимость которых связана с большим техногенным сейсмическим шумом, вызываемым работой 32-метрового радиотелескопа (РТ-32). В последнее время значительно возросла интенсивность радиоинтерферометрических наблюдений и сложно найти 5-часовое окно для проведения точных измерений абсолютного значения УСП. Кроме того, в 2019 г. в обсерватории был введён в строй второй радиотелескоп РТ-13.

По результатам сейсмических исследований, выполненных специалистами ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» с помощью высокочувствительного широкополосного велосиметра, было выбрано оптимальное место для создания ГП. Был смонтирован специальный павильон для ГП, внутри которого расположен развязанный фундамент высотой 1.5 м

и площадью $1.2 \times 4.0 \text{ м}^2$. На этом фундаменте возможна одновременная установка нескольких абсолютных гравиметров. Павильон спроектирован таким образом, что в нём предусмотрена также возможность установки криогенного сверхпроводящего (относительного) гравиметра типа iGrav фирмы GWR для постоянного мониторинга временных вариаций УСП.

Последние измерения УСП в обсерватории «Светлое» другими абсолютными гравиметрами выполнялись в 2013 г. Эти измерения, представленные в [3], проводились в лабораторном корпусе гравиметром FG5-X Финского геодезического института, который постоянно участвует в международных ключевых сличениях. После создания нового ГП была установлена гравиметрическая связь с помощью относительного гравиметра Scintrex CG6 Autograv между новым и прежним пунктами.

На новом ГП установлен отечественный лазерно-интерференционный абсолютный гравиметр с улучшенной активной системой виброизоляции опорного отражателя лазерного интерферометра. По результатам анализа серии измерений показана возможность определения значений УСП с СКО 4 мкГал даже при работающих антеннах радиотелескопов.

- 1. Wziontek H., Bonvalot S., Falk R., et al. Status of the International gravity reference system and frame // J. of Geodesy. 2021. Vol. 95, no. 1. 9 p.
- 2. Витушкин Л. Ф., Иванов Д. В., Кривцов Е. П., Непоклонов В. Б. Метрология в гравиметрии и международная гравиметрическая система // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 3. С. 8–13.
- 3. Mäkinen J., Sermyagin R. A., Oshchepkov I. A., et al. RFCAG2013: Russian-Finnish comparison of absolute gravimeters in 2013 // Journal of Geodetic Science. Vol. 1, no. 6. P 106–110.

Прогнозирование расхождения шкал времени в ГНСС: результаты и перспективы

И. Д. Витчак, А. В. Сальцберг, К. Г. Шупен

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Прогнозирование расхождения шкал времени ГНСС является основным этапом при расчете частотно-временных поправок (ЧВП) к бортовой шкале времени (БШВ) КА ГНСС. БШВ КА формируется по сигналам высокостабильной частоты, источником которой служит квантовый стандарт частоты и времени (КСЧ). Именно его характеристики в совокупности с реализуемым методом прогнозирования определяют достижимую точность ЧВП к БШВ КА и обеспечивают снижение эквивалентной погрешности дальности потребителя за счет космического сегмента ГНСС.

В докладе обобщены результаты работ по следующим направлениям:

- связь нестабильности частоты КСЧ и точности формирования БШВ КА;
- оценка потенциально достижимого порога точности прогнозирования на основе анализа характеристик КСЧ и стохастической природы шумовых процессов в КСЧ по данным центров обработки и анализа наблюдений ГНСС;
- определение основных положений методики прогнозирования временных рядов расхождений БШВ КА;
- практическая реализация и сравнение методов прогнозирования временных рядов, оценка полученных результатов;
- обзор перспективных направлений исследований, в частности, по идентификации и прогнозированию периодических компонент в сигнале БШВ КА.

В докладе выполнен анализ основных факторов, ограничивающих точность прогноза ЧВП к БШВ КА на среднесрочных интервалах, оценен потенциально достижимый порог точности прогнозирования исходя из реальных наблюдений БШВ КА, доступных через навигационный сигнал КА.

На основе сопоставления полученных результатов экспериментальной отработки различных методов прогнозирования и потенциально достижимого порога точности прогнозирования для КА ГНСС ГЛОНАСС показаны преимущества предложенного методического подхода.

Высокостабильная атмосферная линия для передачи сигнала оптической частоты

Г. А. Вишнякова¹, К. С. Кудеяров¹, Э. О. Чиглинцев², Д. С. Крючков¹, Н. О. Жаднов¹, К. Ю. Хабарова^{1,2}, Н. Н. Колачевский^{1,2}

¹ФИАН, г. Москва, Россия ²Российский квантовый центр, Москва, Россия

Глобальная сеть оптических часов, соединённых ультрастабильными линиями [1], открывает новые возможности в таких областях науки и техники, как формирование национальных и международных шкал времени, релятивистская геодезия, спутниковая навигация, интерферометрия со сверхдлинной базой, тесты фундаментальных теорий, поиск тёмной материи и др. Для передачи сигналов частоты от оптических стандартов без ухудшения их характеристик необходимо использовать фазу оптической несущей. Быстрое развитие стационарных и транспортируемых [2] стандартов ведёт к необходимости разработки как волоконных [3], так и воздушных [4] линий передачи.

Создана атмосферная 17-метровая линия, включающая в себя систему активной подстройки положения пучка. Схема подавления фазовых шумов позволила подавить вклад линии в относительную нестабильность передаваемого сигнала с 2.6×10^{-16} до 1.7×10^{-19} после времени усреднения $\tau=1000$ с. Вклад линии в неточность уменьшен с 1.9×10^{-17} до 5×10^{-20} . Планируется увеличение длины линии до 500 м и использование беспилотного летательного аппарата с закреплённым на нём уголковым отражателем в качестве модели движущегося получателя сигнала.

Работа поддержана Российским Научным Фондом (грант № 19-72-10166).

- 1. Riehle F. Optical clock networks // Nature Photonics. 2017. no. 11. P. 25–31.
- 2. Koller S. B., Grotti J., Vogt St., et al. Transportable optical lattice clock with 7×10^{-17} uncertainty // Phys. Rev. Lett. 2017. Vol. 118. P. 073601.
- 3. Droste S., Udem T., Holzwarth R., et al. Optical frequency dissemination for metrology applications // Comptes Rendus Physique. 2015. Vol.16, Issue 5. P. 524–530.
- 4. Gozzard D. R., Howard L. A., Dix-Matthews B. P., et al. Ultra-stable free-space laser links for a global network of optical atomic clocks // arXiv:2103.12909. 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2103.12909 (дата обращения 08.08.2021).

Возможность выполнения перспективных требований «Радионавигационного плана Российской Федерации» на трассах Северного морского пути

М. А. Воронов, С. М. Воронов

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

Одним из результатов выполнения «Плана развития инфраструктуры Северного морского пути», утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 г. N 3120-р, должно стать развитие инфраструктуры контрольно-корректирующих станций ГЛОНАСС/ GPS в акватории Северного морского пути.

Интерес представляет определение направлений развития инфраструктуры контрольно-корректирующих станций, позволяющих обеспечить возможность выполнения требований Радионавигационного плана Российской Федерации [1] к точности и доступности навигационных определений на трассах Северного морского пути, особенно в условиях преднамеренного воздействия на ГНСС.

Литература

1. Радионавигационный план Российской Федерации. Утвержден приказом Минпромторга России от 4 сентября 2019 г. №3296. М.: Минпромторг, 2019.

Анализ влияния температуры на разность фаз сигнала опорной частоты

А. В. Вытнов, В. В. Лысакова

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время на РСДБ-телескопы РТ-13 на быстроповоротных антеннах малого диаметра, установленные в обсерваториях ИПА РАН, передача опорной частоты осуществляется с помощью волоконно-оптической линии передачи [1]. При передаче опорных сигналов на аппаратуру, находящуюся в поворотной кабине радиотелескопа, линии передачи подвергаются температурным и барометрическим воздействиям, что отражается на стабильности сигнала [2]. Реализация мониторинга позволяет провести анализ зависимости разности фаз сигнала опорной частоты, передаваемого на телескоп, от температурных изменений и изменений атмосферного давления в поворотной кабине. В данной работе произведена оценка уровня влияния температуры и атмосферного давления на параметры опорного сигнала корреляционным методом [3].

- 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. 143-150.
- 2. Ипатов А. В. Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 5. С. 769–777.
- 3. Бююль А., Цеффель П. SPSS: искусство обработки информации. М.: Торгово-издательский дом Diasoft, 2005. С. 256–267.

Когерентное суммирование сигналов водородных стандартов частоты для повышения точности РСДБ-измерений

А. В. Вытнов¹, К. Г. Мишагин², В. А. Поляков²

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия ²ЗАО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

В РСДБ погрешность измерений существенно зависит от кратковременной нестабильности частоты опорных генераторов радиотелескопов [1]. В работе [2] показана возможность уменьшения кратковременной нестабильности частоты путем частотной автоподстройки вспомогательного кварцевого генератора относительно сигналов нескольких водородных стандартов. В такой схеме уменьшение нестабильности возможно только для интервалов времени измерения больше постоянной времени петли автоподстройки. Кроме этого, система автоподстройки неминуемо вносит дополнительную нестабильность в частоту выходного сигнала вспомогательного генератора.

В данной работе рассматривается более простая схема, лишенная указанных выше недостатков. С помощью измерений на частотном компараторе и автоматической коррекции кодов частоты стандартов обеспечивается их частотная синхронизация. Постоянная времени автоподстройки выбирается достаточно большой, чтобы обеспечить некоррелированность шумов стандартов в требуемом диапазоне интервалов времени измерения. Сведение фаз осуществляется при начальной настройке. Выходной сигнал получается путем сложения синфазных синусоидальных сигналов на пассивном сумматоре. В работе представлены предварительные результаты экспериментов, проведенных в ЗАО «Время-Ч» и радиоастрономических обсерваториях ИПА РАН. Кроме экспериментальных данных в работе обсуждаются различные варианты решения задачи синхронизации в группе стандартов частоты.

- 1. Rioja M., Dodson N., Asaki Y., et al. The impact of frequency standards on coherence in VLBI at the highest frequencies // The Astronomical Journal. 2012. Vol. 144, no. 4. P. 121.
- 2. Мишагин К. Г., Чернышев И. Н., Сахаровдр Б. А. Использование синхронизации для уменьшения фазового шума в группе прецизионных генераторов // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 36. С. 9–14.

Автономная навигация летательных аппаратов на основе дипольной анизотропии реликтового излучения

В. О. Гладышев, В. Л. Кауц, А. В. Каютенко, П. П. Николаев, Е. А. Шарандин

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

В настоящее время существует множество способов ориентации и навигации летательных аппаратов, в основе которых лежат различные физические принципы. Среди них можно выделить инерциальную навигацию, навигацию с использованием волоконно-оптических гироскопов или оптических квантовых гироскопов, навигацию с использованием датчиков звездной ориентации и др. Но каждый из существующих методов имеет собственные недостатки, поэтому зачастую необходимо использовать интегрированные системы ориентации и навигации, основанные на использовании нескольких физических принципов.

Одним из перспективных направлений в области ориентации и навигации является использование анизотропии космического реликтового электромагнитного излучения в качестве навигационного поля. Для определения параметров движения в пространстве можно использовать естественную анизотропию частоты фонового электромагнитного излучения Вселенной (реликтового теплового излучения с $T=2.7~\rm K$). Локальная дипольная анизотропия реликтового излучения возникает за счет эффекта Доплера, возникающего при движении Солнечной системы относительно реликтового фона со скоростью примерно 370 км/с в сторону созвездия Льва.

Так как распределение температуры на небесной сфере постоянно во времени и представляет собой стабильное навигационное поле, то его можно использовать при решении задач управления движением летательных аппаратов. Подобно существующим звездным датчикам, использующим в качестве эталона карту звездного неба, карта реликтового излучения могла бы стать эталоном на устройствах ориентации и навигации нового поколения.

Проблема точности сигналов времени в РФ

А. С. Глазунов

ТИ(ф) СВФУ, г. Нерюнгри, респ. Саха (Якутия), Россия

Эталонные сигналы частоты и времени (ЭСВЧ) необходимы для многих отраслей науки и техники, например для астрономических определений координат и азимутов. В настоящее время в России ЭСВЧ передаются радиостанциями Государственной службы частоты и времени (ГСВЧ), телевидением, также источником ЭСВЧ могут служить спутниковые навигационные системы и сеть Интернет.

Сигналы радиостанций ГСВЧ использовались при выполнении высокоточных астрономических определений 1-го класса. Для широкого круга потребителей сигналы поверки времени (СПВ) передавались радиостанциями звукового вещания в диапазонах радиоволн КВ – ДВ (шесть точек). Начало переднего фронта сигналов проверки времени согласовывались с отметками шкалы UTC (SU) с погрешностью, не превышающей 100 мс. Сигналы передавались один раз в час в виде пакета из шести прямоугольных импульсов с периодом следования 1 с. Начало шестого импульса соответствовало началу часа 00 мин 00 сек [1]. В СССР СПВ широко использовались при определении азимутов с точностью (5–7)", хотя их можно было использовать и при определении азимута с точностью 2" Для приёма СПВ можно было использовать самые простые и дешевые радиоприёмники. Радиостанции этих диапазонов покрывали всю территорию страны. В настоящее время СПВ (6 точек) передают радиостанции «Россия», «Маяк» и некоторые коммерческие. Однако существует ряд проблем.

Во-первых, похоже, что в РФ исчезли радиостанции, работающие в диапазоне радиоволн $KB-\mathcal{L}B$. Все радиопередачи ведутся в диапазоне УКВ. Такие радиостанции покрывают небольшую территорию.

Во-вторых, ошибки передачи сигналов могут достигать совершенно недопустимых значений. Так, проверив точность передачи СПВ с помощью приемника GPS и Интернета, мы получили, что значения погрешностей могут достигать 7–10 сек и даже больше. Поэтому в интересах народного хозяйства и обороны необходимо возобновить вещание на радиоволнах диапазона КВ – ДВ при строгом соблюдении требований точности передачи СПВ. Исследования были выполнены в городах Новосибирск и Нерюнгри.

Литература

1. Эталонные сигналы частоты и времени // ФГУП «ВНИИФТРИ» / бюллетень В. 2004. № 11. 32 с.

Оптические часы на нейтральных атомах тулия

А. А. Головизин¹, Д. О. Трегубов¹, Д. А. Мишин¹, Д. И. Проворченко¹, В. Н. Сорокин¹, К. Ю. Хабарова^{1,2}, Н. Н. Колачевский^{1,2}

¹ФИАН, г. Москва, Россия ²Российский квантовый центр, г. Москва, Россия

Оптические часы демонстрируют полную систематическую погрешность и стабильность частоты, на два порядка превосходящую микроволновые стандарты. Наряду с совершенствованием оптических часов на основе нейтральных атомов стронция, атомов и ионов иттербия и др. ведется активный поиск новых атомных систем и протоколов измерения, позволяющих уменьшить чувствительность частоты часового перехода к внешним факторам.

В лаборатории Оптики сложных квантовых систем ФИАН мы занимаемся созданием оптических часов на нейтральных атомах тулия. Часовой переход в тулии на длине волны 1.14 мкм происходит внутри 6f электронной оболочки, поэтому он хорошо экранирован от внешних электрических полей. Вследствие этого сдвиг частоты тепловым излучением окружения составляет $2.3(1.1)\times10^{-18}$ [1], что значительно меньше чем у других нейтральных атомов и ряда ионов. Помимо этого, продемонстрированный нами подход использования синтетической частоты (на основе опроса двух компонент часового перехода) позволяет полностью устранить квадратичный Зеемановский сдвиг [2]. В результате, полный систематический сдвиг частоты часового перехода в атомах тулия ожидается на уровне ниже 10^{-17} , что делает его особенно перспективным для создания транспортируемых оптических часов.

Работа была выполнена при поддержке гранта РНФ №19-12-00137.

- 1. Golovizin A., Fedorova E., Tregubov D., et al. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift $/\!/$ Nature communication. 2019. Vol. 10. no. 1. P. 1–8.
- 2. Golovizin A., Tregubov D., Fedodrova E., et al. Extraordinary low systematic frequency shifts in bi-colour thulium optical clock // Preprint arXiv:2102.07468. 2021. 25 p.

Экспериментальные исследования сверхширокополосного аналого-цифрового преобразователя для радиоастрономической аппаратуры

С. А. Гренков, А. В. Крохалев, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Современные системы приема и преобразования радиоастрономических сигналов на радиотелескопах развиваются в сторону расширения рабочей полосы частот и максимального использования цифровых методов обработки сигналов. Использование в таких системах сверхширокополосных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) позволяет отказаться от большей части аналоговых устройств в сигнальном тракте радиотелескопа, исключив их известные недостатки. В соответствии с концепцией VGOS в большинстве из используемых радиоастрономических диапазонов, а также в сверхширокополосных радиоастрономических приемных системах прямое цифровое преобразование сигналов требует работы с АЦП на рабочей частоте дискретизации сигналов порядка 20 ГГц и выше. Одним из коммерчески доступных АЦП, который может работать с приблизительно такой тактовой частотой, является микросхема HMCAD5831 фирмы Hittite Microwave [1]. Возможность использования таких АЦП для создания цифровых радиоастрономических систем требует экспериментального исследования характеристик указанной микросхемы с учетом специфики преобразования широкополосных радиоастрономических сигналов.

В работе представлены методика и некоторые результаты вышеописанных исследований, показаны структура и параметры АЦП НМСАD5831, проведен анализ проблем, связанных с реализацией устройств на этой микросхеме, и перспектив ее применения в радиоастрономии.

Литература

1. Analog Devices. HMCAD5831 Datasheet and Product Info. [Электронный ресурс]. URL: https://www.analog.com/en/products/hmcad5831.html (accessed: 21.08.2021).

Прогноз параметров вращения Земли с использованием методов локальной аппроксимации

М. С. Грибанова, Е. А. Скурихина

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Прогнозирование параметров вращения Земли — координат полюса, и поправок к координированному атомному времени UT1-UTC — является неотъемлемой частью фундаментального координатно-временного обеспечения. С распространением в мире ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, Galileo), РСДБ и лазерной локации спутников возросла потребность в предоставлении информации о ПВЗ не только в реальном времени, но и в их как можно более точных предвычисленных значениях.

В докладе представлено исследование применимости метода локальной аппроксимации для прогноза ПВЗ. Даны краткое описание метода, методика тестирования и результаты сравнения с данными, полученными в IERS, ИПА РАН и компаний по сравнению прогнозов ЕОР РСС 2005—2009 гг. и ЕОРСРРР 2011–2015 гг.

Полученная точность краткосрочного прогноза (до 10 дней) оказалась близкой к точности прогноза по данным годовых отчетов IERS 2016-2018 гг. и лучших методов кампаний ЕОР РСС и ЕОРСРРР (менее 3 мс дуги для координат полюса и 2 мс для всемирного времени). Точность прогноза до 40 дней для координат полюса сопоставима по точности с результатами IERS (лучше 8 мс дуги), в то время как точность прогноза до 90 дней несколько хуже. Среднесрочные и долгосрочные прогнозы всемирного времени уступают прогнозам IERS, но все же дают хорошие результаты.

- 1. Грибанова М. С., Скурихина Е. А. Прогноз параметров вращения Земли с использованием методов локальной аппроксимации // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 54. С. 11–20.
- 2. Farmer J. D, Sidorowich J. J. Predicting chaotic time series // Phys. Rev. Let. 1987. Vol. 59, no. 8. P. 845–848.
- 3. Лоскутов А. Ю, Котляров О. Л., Журавлев Д. И. Временные ряды: анализ и прогноз. М.: Физический факультет МГУ, 2004

Результаты калибровки альтиметрических измерений космической геодезической системы «ГЕО-ИК-2» на акватории Рыбинского водохранилища

И. В. Гусев¹, Е. В. Даргель², И. П. Лангеман³, С. А. Лебедев⁴

 1 АО «ЦНИИмаш», г. Королёв, Московская обл., Россия 2 ВТУ ГШ, г. Москва, Россия 3 АО «Российские космические системы», г. Москва, Россия 4 ГЦ РАН, г. Москва, Россия

В докладе приводятся результаты калибровки альтиметрических измерений космической геодезической системы (КГС) «ГЕО-ИК-2» на акватории Рыбинского водохранилища, полученные двумя независимыми способами.

В первом случае калибровка альтиметрических измерений выполнялась путём сравнения высот морской поверхности относительно отсчётного эллипсоида, рассчитанных по альтиметрическим измерениям, с результатами обработки наземных ГНСС-измерений, выполненных в подспутниковой точке в момент пролёта космических аппаратов «ГЕО-ИК-2» №12Л и №13Л. Для этого летом и осенью 2020 г. на акватории Рыбинского водохранилища были проведены специальные геодезические измерения. ГНСС-приёмник устанавливался на морской буй, который буксировался на катере в заданные подспутниковые точки с координатами, определенными из прогноза орбит спутников заранее. Одновременно на берегу были установлены базовые станции ГНСС-наблюдений. Наибольшая разность в высоте морской поверхности составила 13.9 см.

Второй способ заключался в сравнении высот морской поверхности в точке пересечения треков первого и второго спутника в пределах сравнительно короткого промежутка времени. 11 сентября 2020 г. трек спутника Jason-3 пересек трек КА «ГЕО-ИК-2» №13Л на акватории Рыбинского водохранилища с временной разницей 1 ч 12 мин. Разность высот морской поверхности составила 9.6 см.

Впервые получены оценки альтиметрических измерений КГС «ГЕО-ИК-2», которые свидетельствуют о готовности КГС к работе, цель которой — решение определенных задач по уточнению характеристик гравитационного поля Земли в Мировом океане. Дальнейшее совершенствование технологии калибровки данных спутниковой альтиметрии в нашей стране связано с развёртыванием стационарного полигона калибровки.

Система автономной навигации для малых космических аппаратов в составе кластера

Т. В. Данилова, М. А. Архипова, М. А. Маслова

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

В настоящее время системы и комплексы малых космических аппаратов, называемые кластерами или роями, находятся в стадии активного развития [1, 2]. Для выполнения целей и задач полета необходимо навигационно-баллистическое обеспечение, организация которого наземными средствами затруднительна. Следовательно, необходимо создание системы автономной навигации (САН).

Предложена САН, основанная на межспутниковых измерениях относительно КА-лидера, входящего в кластер, оценки орбиты которого полагаются известными с высокой точностью. Минимальный состав измерителей — один оптико-электронный прибор (ОЭП), помещенный в карданов подвес и осуществляющий визирование КА-лидера и распознавание наблюдаемого звездного поля. В роли навигационных параметров выступают углы «КА — звезда», рассчитываемые в приборной системе координат, — углы первого рода [3]. При наличии дополнительного ОЭП, жестко закрепленного на корпусе КА, в вектор навигационных параметров включаются углы второго рода «КА — звезда», при этом за направление на КА-лидер принимается вектор ориентации оптической оси визирующего ОЭП. При наличии дальномера также измеряется дальность до КА-лидера. Показано, что при некоторых условиях точностные характеристики предлагаемой САН достигают уровня точности оценок КА-лидера.

- 1. Фатеев В. Ф., Галькевич А. И. Новая парадигма развития космических информационных систем // Цифровая экономика. 2018. № 2 (2). С. 5–22.
- 2. Малые космические аппараты информационного обеспечения / Под ред. проф. В. Ф. Фатеева. М.: Радиотехника, 2010. 320 С.
- 3. Данилова Т. В., Архипова М. А., Маслова М. А. Астрономический автономный метод слежения за космическими аппаратами // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 17–22.

Текущее состояние и перспективы развития средств измерений в области времени, частоты и гравиметрии

С. И. Донченко, О. В. Денисенко, В. Н. Федотов, А. М. Каверин, В. Ф. Фатеев, М. Н. Хромов

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

Средства измерения времени, частоты и гравиметрии играют важнейшую роль в работе различных систем и комплексов, таких как:

- космические навигационные и геодезические системы (ГЛО-НАСС, Гео-ИК-2 и др.);
 - космические связные системы;
 - беспилотные транспортные средства;
 - высокоскоростной железнодорожный транспорт;
 - специализированные комплексы в сфере обороны и безопасности;
- высокоскоростные наземные системы связи и передачи информации и др.

Непрерывное повышение требований к точностным и эксплуатационным характеристикам этих систем и комплексов обуславливает необходимость создания новых средств измерений времени, частоты и гравиметрии с более высокими характеристиками (стандарты частоты в оптическом диапазоне, фонтанного типа на холодных атомах, водородные стандарты частоты нового поколения, малогабаритные стандарты частоты, высокоточные гравиметры и градиентометры). В последние годы научным коллективом ФГУП «ВНИИФТРИ» были созданы новые образцы средств измерений времени, частоты, гравиметрии с метрологическими характеристиками на уровне и лучше зарубежных аналогов.

Разработаны оптические стандарты частоты, обеспечивающие независимое воспроизведение единицы частоты со значением неисключённой систематической относительной погрешности воспроизведения единицы частоты не более 1×10^{-17} . Созданы стандарты частоты фонтанного типа на холодных атомах с нестабильностью частоты на уровне 1×10^{-16} . Разработаны комплексы хранения национальной шкалы координированного времени с улучшенными характеристиками долговременной нестабильности частоты [1]. Проведенные разработки позволили формировать национальную шкалу времени Российской Федерации на уровне лучших мировых лабораторий, смещение шкалы времени UTC(SU) относительно международной шкалы времени UTC находится в пределах ± 3 нс.

Создан потенциально имеющий широкую область применения сверхминиатюрный квантовый рубидиевый стандарт частоты на эффекте когерентного пленения населенностей, габаритные размеры которого не превышают 60 см³, энергопотребление менее 1 Вт, при этом кратковременная нестабильность частоты не более 3×10^{-11} , а долговременная — не более 5×10^{-12} .

Кроме того, одним из наиболее актуальных направлений современной науки и техники является гравиметрия, перспективы развития которой в последнее время связаны с внедрением квантовых технологий. Это позволяет в обозримом будущем (5-10 лет) приступить к созданию перспективных систем навигации по гравитационному полю Земли.

Литература

1. 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. 38.

Развитие Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени и формирование национальной шкалы времени Российской Федерации

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

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Россия

Развитие технических средств Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени проводилось в рамках Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на 2012–2020 гг. Проведенные разработки позволили улучшить характеристики эталона в части воспроизведения единиц времени и частоты, хранения национальной шкалы времени, а также сравнения различных шкал времени. За последние годы были разработаны Комплекс хранения национальной шкалы времени Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1 на основе водородных стандартов частоты нового поколения [1], оптические реперы частоты второго поколения, репер частоты фонтанного типа на основе холодных атомов рубидия.

Использование разработанных технических средств позволило достигнуть относительной неисключенной систематической погрешности воспроизведения единиц в оптическом диапазоне не более 1×10^{-17} , нестабильности частоты комплекса хранения национальной шкалы времени ГЭТ 1 — не более 3.0×10^{-16} , при интервалах времени измерения 1-10 сут, удалось улучшить пределы допускаемых смещений национальной шкалы времени UTC(SU) относительно шкалы Всемирного координированного времени UTC с ± 7 нс до ± 3 нс.

В настоящее время шкала времени UTC(SU) входит в число лучших национальных реализаций UTC.

В целях улучшения частотно-временного обеспечения при формировании шкалы времени космического комплекса (КК) системы ГЛОНАСС во ФГУП «ВНИФТРИ» проведены разработки по созданию Группового эталона частоты КК системы ГЛОНАСС и Центральных синхронизаторов с улучшенными метрологическими характеристиками и повышенной автономностью работы.

В 2012–2020 гг. коллектив ФГУП «ВНИИФТРИ» принимал участие в работах по модернизации комплекса средств определения и про-

гнозирования ПВЗ фундаментального сегмента ГЛОНАСС. Были созданы Программный коррелятор Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты (ГМЦ ГСВЧ) и лазерные дальномеры нового поколения (лазерные станции комплекса средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС в пос. Менделеево и Иркутске), позволяющие достигнуть миллиметровых точностей в определении наклонных дальностей. Был модернизирован центр обработки и анализа данных ГМЦ ГСВЧ, разработаны комплекс метрологического обеспечения создаваемого отечественного лунного лазерного дальномера и прикладное ПО для определения всемирного времени по лазерным наблюдениям Луны. Данные радиоинтерферометра на узлах колокации, созданного ИПА РАН, позволили существенно увеличить точность определения сводных значений Всемирного времени ГСВЧ и их прогнозирования [2].

- 1. 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. 38.
- 2. Pasynok S., Bezmenov I., Ignatenko I., et al. Operative EOP activities at VNIIFTRI // Proceedings of the Journèes Systèmes de Référence Spatio-temporels 2019 "Astrometry, Earth Rotation and Reference System in the Gaia era". Paris: Observatorie de Paris, 2020. P. 135–140.

Высокоточная система передачи и сравнений шкал времени по волоконно-оптическим линиям связи СОДС ШВ-М

С. С. Донченко, О. В. Колмогоров, Д. В. Прохоров

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

Для работы средств из состава наземного комплекса ГНСС требуются эталонные сигналы частоты и времени. Такие средства, как беззапросные и запросные радиотехнические средства, квантово-оптические станции, комплексы метрологического обеспечения (например, комплекс оценки энергетических характеристик сигналов) располагаются в полевых условиях на удалении от нескольких десятков метров до нескольких километров от источников эталонных сигналов частоты и времени. Современные требования к системам передачи ШВ предусматривают инструментальную погрешность не более 100–200 пс.

Обеспечить точность передачи эталонных сигналов можно только при использовании волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Для решения задачи передачи эталонных сигналов к объектам наземного комплекса ГНСС по ВОЛС на расстояние до 5 км с инструментальной погрешностью синхронизации не более сотни пикосекунд предложена модернизированная система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени системы оперативно-диспетчерской связи (СОДС) ШВ-М.

Принцип действия СОДС ШВ-М состоит в следующем. С источника эталонных сигналов частоты и времени сигнал опорной частоты поступает на передающий электронно-оптический модуль, который модулирует оптическую несущую сигналом 10 МГц. Излучение распространяется по ВОЛС до объекта, на который надо передать сигнал, там преобразуется с помощью приемного оптико-электронного модуля обратно в сигнал опорной частоты. Переданный по ВОЛС сигнал опорной частоты подается на промежуточный генератор, который формирует метки времени и управляет их фазой, а также может задавать отстройку выходной частоты. Контроль положения секундной метки, формируемой промежуточным генератором относительно эталонной, осуществляет система сравнений ШВ по ВОЛС.

Приведены результаты определения аппаратурных поправок комплекта СОДС ШВ-М в температурном диапазоне от 15 до 30°С. Также в работе проведены исследования погрешности передачи ШВ аппаратуры СОДС ШВ-М. Суммарная инструментальная погрешность синхронизации шкалы времени СОДС ШВ-М при доверительной вероятности 95 % составила ±60 пс.

Состояние макетирования ключевых узлов космической гравитационно-волновой антенны SOIGA

С. С. Донченко¹, В. Ф. Фатеев¹, Р. А. Давлатов^{1,2}, Д. А. Соколов¹, Е. А. Лавров¹, И. О. Скакун¹

¹ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия ²МИИГАиК, г. Москва, Россия

В настоящее время детектирование гравитационных волн является одним из самых перспективных и быстро развивающихся направлений астрофизики. Наибольшей чувствительности достигли наземные гравитационно-волновые антенны (ГВА): LIGO, VIRGO, KARGO. Однако наземные детекторы имеют ограничения по максимальной чувствительности из-за ограниченности максимальной длины плеч на Земле, а также сейсмических возмущений. Перспективный путь решения недостатков наземных ГВА — размещение детектора в космосе.

В РФ предлагается проект космической ГВА на геоцентрической орбите ГЛОНАСС под названием «SOIGA» (Space Optical Interferometric Gravitation Antenna) [1]. Основные измерительные системы антенны — межспутниковый лазерный высокоточный интерферометрический дальномер и система «спутника, свободного от сноса». Межспутниковый дальномер используется для регистрации изменения расстояния между пробными массами на удаленных спутниках при прохождении гравитационной волны. Для компенсации возмущающих активных ускорений используется система «спутника, свободного от сноса», в виде бортовой системы определения местоположения пробной массы и высокоточных бортовых двигателей.

В работе представлены первые результаты по разработке макета межспутникового дальномера и системы «спутника, свободного от сноса», а также приведены результаты экспериментальных исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11022.

Литература

1. Пустовойт В. И., Донченко С. И., Денисенко О. В., Фатеев В. Ф. Концепция создания космической лазерной гравитационной антенны на геоцентрической орбите ГЛО-НАСС «SOIGA» // Альманах современной метрологии. 2020. № 1 (21). С. 27–49.

Возможности сравнения шкал времени и частот в радиоинтерферометре нового поколения с волоконно-оптической линией передачи времени

Е. Т. Жуков, А. В. Вытнов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

РСДБ является перспективным методом сравнения шкал времени (ШВ) и частот на больших расстояниях. Исследование возможностей в этом отношении радиоинтерферометров нового поколения с радиотелескопами РТ-13 и новыми техническими решениями является актуальной научной задачей.

Рассмотрен РСДБ-метод сравнения ШВ и частот, а также его развитие в части сравнения ШВ путём применения волоконно-оптической линии (ВОЛ), которая используется для передачи и калибровочных измерений задержки секундного импульса от хранителя времени до системы преобразования сигналов на антенне. ВОЛ построена на основе оптоволокна, лазерных и фотодиодных модулей СВЧ-диапазона, а также мультиплексоров оптических сигналов с циркулятором для разделения их в прямом и обратном направлениях. Испытания ВОЛ показали погрешность калибровки задержки сигнала на уровне десятков пикосекунд [1].

Для оценки погрешностей и достоверности сравнения IIIВ и частот использованы данные наблюдений 2017–2019 гг. на РТ-13 и ГНССприёмниках в обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская» на базе ~4400 км. Результаты их обработки показывают совпадение разностей IIIВ по РСДБ и ГНСС-наблюдениям и характеризуют погрешности РСДБ-сравнений IIIВ и частот значениями девиации Аллана около 50 пс и 5 ед. 16-го знака на суточном и недельном интервалах времени усреднения соответственно.

Таким образом, показаны и экспериментально подтверждены рекордные возможности сравнения ШВ и частот с помощью разработанных в ИПА РАН радиоинтерферометров нового поколения, что открывает перспективы их применения для высокоточной передачи времени и частоты, в частности при развитии наземного комплекса управления системы ГЛОНАСС.

Литература

1. Царук А. А., Жуков Е. Т., Вытнов А. В., Зиновьев П. В. Волоконно-оптическая линия передачи и измерения задержки секундного импульса в РСДБ-радиотелескопе РТ-13 // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 50. С. 73–78.

Программное обеспечение для визуализации результатов корреляционной обработки РСДБ-данных

М. С. Зорин, А. С. Кумейко, В. О. Кен

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

После проведения процессорной корреляционной обработки РСДБданных возникает необходимость анализа полученных результатов. При этом форму корреляционного отклика и его основные параметры, такие как отношение сигнал-шум (ОСШ), фаза, спектральные характеристики сигнального тракта, удобно представлять в понятном для пользователя графическом виде.

Авторы разработали многофункциональную систему Vision, создающую отчеты по результатам обработки РСДБ-наблюдений на корреляторе RASFX [1]. Данная система осуществляет чтение выходных данных коррелятора RASFX, вычисление параметров корреляционного отклика (задержка, частота интерференции, ОСШ), синтез частотных каналов и оценивание флуктуаций параметров внутри каждого скана. Итог работы Vision — построение изображений и графиков измеренных характеристик и дальнейшее представление их в виде единого PDF-отчета по сеансу наблюдения. Помимо созданного отчета пользователь получает доступ ко всем внутренним файлам программы — отдельным построенным графикам и текстовым файлам, содержащим значения рассчитанных параметров отклика. Эти данные могут использоваться при написании научных работ или для представления отдельных интересующих результатов.

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.

Оперативные определения всемирного времени по наблюдениям РСДБ-сети «Квазар-КВО»

Д. В. Иванов, А. В. Ипатов, А. В. Вытнов, И. А. Безруков, А. А. Дьяков, В. О. Кен, Р. А. Купцов, С. Л. Курдубов, Д. А. Маршалов, А. Е. Мельников, А. Г. Михайлов, Е. В. Носов, И. А. Рахимов, А. И. Сальников, Е. А. Скурихина, В. Г. Стэмпковский, И. Ф. Суркис, Е. Ю. Хвостов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Обсерватории РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» (ИПА РАН) обладают набором колоцированных средств наблюдений, предназначенных для решения задач фундаментального координатно-временного обеспечения. Три из четырех обсерваторий оснащены идентичным набором средств РСДБ-наблюдений: 32-м метровым радиотелескопом (РТ-32) и быстроповоротным радиотелескопом нового поколения VGOS диаметром антенны 13.2 м (РТ-13). Одной из важнейших задач комплекса является определение всемирного времени в оперативном режиме для эфемеридной поддержки ГЛОНАСС. РСДБ-наблюдения с целью определения всемирного времени начали проводиться на радиотелескопах РТ-32 в 2006 г. [1]. С середины 2012 г. эти наблюдения проводятся на ежедневной основе (программа RI) с передачей данных на коррелятор ИПА РАН в режиме e-vlві и автоматической вторичной обработкой наблюдений. Точность ряда, получаемого по наблюдениям на радиотелескопах РТ-32 в оперативном режиме, составляет около 70 мкс, а в апостериорном режиме — менее 60 мкс. С вводом в эксплуатацию первых двух радиотелескопов РТ-13 в конце 2015 г. начались наблюдения для определения всемирного времени 3-4 раза в сутки (программа наблюдений R) [2, 3]. Точность ряда всемирного времени, получаемого по этой программе на базе «Бадары» — «Зеленчукская», находится в пределах 30 мкс. С декабря 2019 г. начались наблюдения на сети из трех радиотелескопов нового поколения РТ-13. Сеансы наблюдений на трех радиотелескопах для определения всемирного времени проводятся 4-5 раз в сутки. Точность определения всемирного времени по этим сеансам составляет около 20 мкс, а время выдачи результата не превышает 5 ч.

Дальнейший прогресс в улучшении точности определения всемирного времени связан с улучшением геометрии отечественной РСДБ-сети в результате запланированного строительства двойного VGOS-телескопа в обсерватории «Уссурийск».

- 1. Финкельштейн А. М., Гаязов И. С., Скурихина Е. А. и др. Определение ПВЗ из наблюдений на РСДБ-мети «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2009. Вып. 20. С. 119–125.
- 2. Ipatov A., Ivanov D., Ilin \overline{G} ., et al. New generation VLBI: intraday UT1 estimations // IVS 2016 General Meeting Proceedings "New Horizons with VGOS". NASA/CP-2016-219016. 2016. P. 106–110.
- 3. N. Shuygina, D. Ivanov, A. Ipatov, et al. Russian VLBI network "Quasar": Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2019. Vol. 10, Issue 2. C. 150–156.

Спектры сильнейших стандартных источников на эпоху 2016.0

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

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В течение 2014—2018 гг. многократно измерены спектры сильнейших стандартных источников шкалы потоков «искусственная луна»: 3С144 (TauA), 3С274 (VirgoA), 3С405 (CygA) и 3С461 (CasA). Измерения выполнены на радиотелескопе РТ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН относительно первичного стандарта шкалы потоков «искусственная луна» 3С295 на частотах (1550, 2370, 4840, 8450) МГц. Показано [1, 2], что только шкала потоков «искусственная луна», основанная на абсолютных измерениях по методу «искусственной луны» и независимом определении формы спектров по относительным измерениям, адекватно представляет спектры объектов. Получены данные о плотностях потоков сильных источников на интервал 2014—2018 гг. Спектры стандартных источников измеряются на радиотелескопе РТ-32 обсерватории «Светлое» многократно с целью сохранения точности шкалы потоков в условиях переменности стандартных источников.

- 1. Иванов В. П., Станкевич К. С. Радиоастрономическая абсолютная шкала потоков (Обзор) // Известия Вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 1. С. 3–27.
- 2. Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А. и др. Спектры стандартных радиоисточников на современную эпоху // Астрономический журнал. 2018. Т. 95, № 9. С. 609–618.

Оценка влажностной компоненты задержки оптического сигнала в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» по данным радиометрии

Г. Н. Ильин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Полная зенитная задержка распространения сигнала в оптическом диапазоне частот рассчитывается с использованием приземных метеопараметров в соответствии с моделью [1]. При этом точность расчёта гидростатической компоненты задержки определяется качеством датчика давления и находится на уровне ~1 мм. Оценка точности расчёта влажностной компоненты задержки в зените (ВКЗ) также возможна по результатам измерений интегрального содержания водяного пара (ИВС) на основе обработки сигналов ГНСС или в реальном времени — по данным радиометра водяного пара (РВП) [2]. Поскольку обсерватории РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» оснащены РВП и обеспечивают непрерывные круглосуточные измерения ИВС, представляется целесообразным сравнить значения ВКЗ, измеренные РВП и ГНСС, с задержками, рассчитанными на основе метеоданных.

Результаты расчётов ВКЗ в обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» на моменты проведения наблюдений с применением квантово-оптической системы «Сажень-ТМ» показали, что абсолютные значения ВКЗ в обсерваториях на годовом интервале времени изменяются в пределах 0.3-3 мм, что составляет менее 0.15 % от гидростатической компоненты. Разность значений ВКЗ, рассчитанных по метеоданным и измеренных РВП или ГНСС, не превосходит в зимний период ~ 0.3 мм, а в летний $-\sim 1$ мм.

- 1. Mendes V. B., Pavli E. C. High-accuracy zenith delay prediction at optical wavelengths // Geophys. Res. Let. 2004. T. 31, L14602. P. 1–5. doi: 10.1029/2004GL020308.
- 2. Wijaya D., Brunner F. Accurate atmospheric correction of two-frequency SLR observations // Proc. 16th Int. Workshop on Laser Ranging. Poznan, 2008. P. 130–136.

Результаты мониторинга мазерного излучения ОН с частотой 1665 МГц в источниках W3, W49, W51 и W75 на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Светлое»

А. В. Ипатов, И. А. Рахимов, С. А. Гренков, Н. Е. Кольцов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

На радиотелескопе РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» [1] в обсерватории «Светлое» в 2006 г. были начаты наблюдения мазерного излучения гидроксила на волне 18 см космических источников W3, W49, W51 и W75 с целью отслеживания их переменности. Первые результаты этих наблюдений опубликованы в [2]. С 2009 г., после ввода в эксплуатацию цифрового спектрометра [3], позволяющего получить требуемое отношение сигнал/шум за минимальное время и обеспечивающего этим более эффективное использование времени радиотелескопа, наблюдения мазерного излучения гидроксила в указанных выше источниках на частоте 1665 МГц проводятся регулярно.

В докладе представлены результаты поиска и обнаружения существенной долговременной переменности излучения некоторых компонентов мазеров ОН в указанных источниках за период 2009–2020 гг.

- 1. Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Смоленцев С. Г. Радиоинтерферометрическая сеть «Квазар» научные задачи, техника и будущее // Земля и вселенная. М.: Наука, 2004. № 4. С. 12–25.
- 2. Рахимов И. А., Гренков С. А. Результаты наблюдений мазерных источников гидроксила на волне 18 см в W3(OH), W49, W75N, W75S, W51 и NML Cyg за 2006-2009 // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 113-120.
- 3. Гренков С. А., Кольцов Н. Е. Двухканальный спектрометр для регистрации узкополосного космического радиоизлучения // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 3. С. 160–161.

Система сбора данных электропривода РТ-32 на основе программируемых логических контроллеров

А. В. Исаенко, А. М. Шишикин, И. А. Рахимов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Радиотелескопы комплекса «Квазар-КВО» оснащены электромеханическими реверсивными приводами постоянного тока, которые обеспечивают движение антенны по азимуту и углу места. В 2008 г. была проведена модернизация системы наведения, результатом которой стало создание рабочей станции контроля и управления на базе промышленного компьютера и модернизированного блока управления и контроля (БУК-М) [1]. Однако дальнейшая эксплуатация РТ-32 выявила ряд недостатков существующей системы: отсутствие контроля состояния электропривода, отсутствие режима информирования аварийных ситуаций и мониторинга электрических параметров электропривода.

На базе обсерватории «Светлое» разработана и внедрена Система сбора данных (ССД) электропривода РТ-32. ССД разработана на элементной базе отечественного производства компании «ОВЕН», как и в ранее разработанном Автоматизированном комплексе контроля и управления объектов и систем жизнеобеспечения обсерватории [2]. ССД состоит из аппаратно-программных средств контроля, отображения и архивирования данных привода. Главная задача системы сбора данных состоит в непрерывном контроле состояния электропривода и своевременном оповещении дежурного оператора о возникших внештатных ситуациях.

Внедрение ССД в обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» повысит надежность и стабильность работы электропривода, а также снизит риск возникновения нештатных ситуаций. Расширится диапазон контролируемых параметров, организуется визуальное отображение всех параметров, как непосредственно в помещении электропривода, так и в помещении пульта управления РТ-32.

- 4. Исаенко А. В. Рахимов И. А., Тарасов В. А. Автоматизированный комплекс контроля и управления объектов и систем жизнеобеспечения обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 37. С. 76–85.
- 5. Быков В. Ю. Ильин Г. Н., Кайдановский М. Н., Модернизация аппаратуры электропривода антенной системы радиотелескопа РТ-32 // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 270–281.

Методы оценки погрешности навигационной аппаратуры потребителей ГНСС в условиях воздействия помеховых радиосигналов

А. М. Каверин, В. Б. Пудловский

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

Одним из недостатков ГНСС является низкая помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей (НАП) по отношению к воздействию заградительных (например, шумовых или сигналоподобных), а также имитационных помех. Однако уже сейчас и на перспективу ситуация, характеризуемая низкой помехоустойчивостью НАП ГНСС, радикально меняется. Это изменение связано с внедрением в технику НАП средств помехозащиты, основанных на применении различных методов. Соответственно, развиваются и методы оценки помехоустойчивости НАП.

В качестве оценок в большинстве методик приняты граничные значения показателей помехоустойчивости, отвечающие критериям работоспособности НАП в условиях воздействия помех. При этом отдельной задачей является оценка погрешности измерений НАП: определение координат местоположения, составляющих вектора скорости, шкалы времени и углов пространственной ориентации. Особенностью применяемых методов является не только обеспечение опорных значений оцениваемых параметров с достаточной точностью, но и нормирование сигнально-помеховой обстановки при проведении измерений.

Стабильность задержек сигналов ГНСС в приемной аппаратуре

А. А. Карауш

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

Знание величины задержек сигналов в приёмном тракте ГНССаппаратуры и стабильность этих задержек являются важными условиями для решения задач сравнения ШВ по сигналам ГНСС. Значение задержек определяется в ходе периодической калибровки и считается, что после проведения калибровки задержки сохраняют постоянное значение в пределах 2 нс или менее [1].

Перспективные требования к погрешности сравнения ШВ эталонов находятся на уровне менее 1 нс, а значит, требует более глубокого исследования вопрос стабильности задержек [2] и перспектив их калибровки. Было проведено исследование, целью которого является количественная оценка нестабильности внутренних задержек в приёмниках [3], специально разработанных для сравнения времени и частоты.

- 1. BIPM Guidelines for GNSS equipment calibration /ed. by G. Petit, W. Lewandowski, Z. Jiang, F. Arias, L. Tisserand, S. Römisch / BIPM Time Department, 2019. 30 p.
- 2. Hauschild A., Montenbruck O. The Effect of correlator and front-end design on GNSS pseudorange biases for geodetic receivers: GNSS pseudorange biases for geodetic receivers // Navigation. 2016. Vol. 63, Issue 4. P. 443–453. doi: 10.1002/navi.165.
- 3. Hauschild A., Montenbruck O. Study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing // GPS Solutions. Vol. 20, no. 2. 2016. P. 159–171.

Экспериментальное исследование результатов калибровки НАП, размещенных на территории Московской области, по сигналам ГЛОНАСС

Е. А. Карауш

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

Определение значений задержек кодовых сигналов ГНСС в навигационной аппаратуре потребителя (НАП) необходимо в ряде актуальных задач: определение смещения шкалы времени, мониторинг ионосферы, позиционирование одночастотного потребителя и др. Такие задержки сигналов трактуются как смещение, возникающее между двумя наблюдениями в поддиапазонах L1, L2 и приводящее к систематической погрешности в псевдодальномерных измерениях. Исследователями [1] выявлена зависимость таких задержек от частоты сигнала, типа НАП, а также его программного обеспечения.

Главная сложность в определении этих задержек сигналов — отделение значений задержек на борту космического навигационного спутника, в НАП и в ионосфере от результатов псевдодальномерных измерений [2]. Поэтому для оценивания задержек в НАП ключевую роль играет выбор модели ионосферы. Целью данной работы является исследование результатов оценки задержек сигналов в НАП с использованием различных способов исключения ионосферы из псевдодальномерных измерений.

Проведен эксперимент с НАП, размещенной на территории Московской области. Обрабатывались псевдодальномерные измерения с калиброванной (опорной) НАП в п. Менделеево и приемников, размещенных на расстоянии менее 50 км от опорного.

- 1. Springer handbook of global navigation satellite systems / Ed. by P. Teunissen, O. Montenbruck. Springer, 2017. P. 1327.
- 2. Sardón E., Zarraoa N. Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases // Radio Science. Vol. 32, Issue 5. 1997. P. 1899–1910.

Синергетический подход к созданию саморегулирующегося стандарта частоты и времени

В. А. Карелин

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Параметры большинства технических систем подвержены случайным изменениям во времени, например, флуктуации частоты сигналов задающих генераторов радиотехнических систем различного назначения. Эти флуктуации приводят к снижению точности работы системы и к уменьшению временного интервала автономной работы с заданными техническими характеристиками. С другой стороны, случайный характер отклонений частоты открывает возможность с помощью дополнительных средств преобразовать систему – источник высокостабильных колебаний в синергетическую систему, обладающую свойством самоорганизации. перечислим необходимые Для этой задачи решения самоорганизующихся систем. Общие черты явления самоорганизации [1]:

- во-первых, должны быть обеспечены коллективность и согласованность (или кооперативность);
- во-вторых, эти системы могут быть только открытыми, то есть обмениваться с окружающей средой энергией, веществом или информацией;
 - в-третьих, система должна содержать неравновесные структуры.

Система — источник сигнала стабильной частоты, является открытой и взаимодействует с внешней средой, так как техническая ширина его спектральной линии обязана действию различного рода случайных нестабильностей. Кроме того, система далека от точки максимальной энтропии, так как фазовый портрет сигнала стабильного по частоте представляет эллипс, «размытый» вдоль оси производной (скорости). То есть существует предельный цикл, аттрактор. Таким образом, для придания свойств самоорганизации систему следует дополнить i ($i \ge 2$) каналами преобразования сигнала стандарта u(t) с помощью операторов L_i (*), то есть:

$$\mathcal{G}_{i}(t) = L_{i}(u(t)) \tag{1}$$

Вид $L_i(u(t))$ ограничен множеством нелинейных операторов для того, чтобы элементы $\mathcal{G}_i(t)$ могли образовать неравновесную структуру [1], способную компенсировать увеличение энтропии системы за счет генерирования негэнтропии [1]. Для формирования самоорганизующей об-

ратной связи $\delta(t)$ элементы $\mathcal{G}_{i}(t)$ должны быть объедены по средствам оператора $H(\mathcal{G}_{i}(t)...\mathcal{G}_{i}(t))$, то есть:

$$\delta(t) = H(\mathcal{S}_{1}(t)...\mathcal{S}_{i}(t))$$
 (2)

В отличие от $L_i(*)$, оператор H(*) может быть как линейным, так и нелинейным. Выражения (1) и (2) позволяют синтезировать обобщенную структурную схему саморегулирующегося стандарта частоты.

Данная структура носит обобщенный характер. Конкретный вид операторов $L_i(*)$ и H(*) определяется фантазией и опытом инженера. В качестве примера реализации рассмотренной методики приведен анализ системы, представленной в [2].

- 1. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминистическом подходе к турбулентности. М.: Мир, 1991.
- 2. Способ хранения частоты электрических колебаний: пат. 2730875 Российская Федерация, 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 ²²⁹Th

Ф. Ф. Карпешин¹, М. Б. Тржасковская², Л. Ф. Витушкин¹

¹ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, Россия ²НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, 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. Использование резонансных свойств электронной оболочки как оптического резонатора позволит создать новые лазерные технологии для оптической накачки ядерных изомеров и других манипуляций над атомными ядрами.

В работе проведен анализ экспериментальных результатов. Рассмотрен вклад Е2-компоненты в электромагнитный распад ядерного изомера, и проведено первое наблюдение зависимости времени жизни изомера от внешних условий [1, 2], которое наряду с выравнивающей ролью фрагментации одноэлектронных уровней указывает на возможное разрешение ториевой загадки.

Последовательный теоретический анализ должен позволить оптимизировать электронно-ядерную конфигурацию ²²⁹Th, наиболее подходящую для возбуждения ядерно-оптического резонанса. Практически удобным является метод, известный в метрологии как комб-генератор [3]. Посредством этого метода, используя единственный лазер, можно возбудить ядерный изомер путем кратного умножения гармоник.

- 1. Витушкин Л. Ф., Карпешин Ф. Ф., Тржасковская М. Б. Актуальные проблемы создания ядерно-оптических стандартов частоты на основе 229Th // Ядерная физика. 2020. Т. 83, № 32. С. 463–469.
- 2. Karpeshin F. F., Trzhaskovskaya M. B. A proposed solution for the lifetime puzzle of the 229mTh+ isomer // Nucl. Phys. A. 2021. V. 1010, № 1. P. 122173–122184.
- 3. Карпешин Ф. Ф., Тржасковская М. Б. Ядерно-оптические стандарты частоты: новое поколение // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 36. С. 15–20.

Совместная передача сигналов опорной частоты и шкалы времени по одному оптическому волокну

А. С. Карпичев, П. В. Зиновьев, А. В. Вытнов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В последние годы волоконно-оптические линии передачи занимают все более прочные позиции в вопросах передачи как цифровых, так и аналоговых сигналов различного назначения. В обсерваториях, входящих в состав комплекса «Квазар-КВО», по волоконно-оптическим линиям передач осуществляется передача гармонического сигнала опорной частоты [1], а также импульсных сигналов шкалы времени, использующихся для синхронизации удаленного оборудования [2]. В настоящее время эти сигналы передаются по независимым линям связи, в то время как объединение этих систем в одну открывает новые возможности для повышения точности калибровки линии передачи [3] и сравнении различных шкал времени и частот [4].

В данной работе представлены экспериментальные результаты по совместной передаче сигналов и получены параметры вносимой нестабильности линии передачи.

- 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. Царук А. А., Карпичев А. С., Вытнов А. В. и др. Калибровка тракта передачи шкал времени радиотелескопа для реализации РСДБ-сличений // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 48. С. 92–99.
- 4. Царук А. А., Иванов Д. В., Жуков Е. Т., Карпичев А. С. Сравнение шкал времени и частот с помощью радиоинтерферометра нового поколения // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 50. С. 79–86.

Уточнение размера астероида по его радиолокационному изображению

К. В. Киселев, Ю. Д. Медведев

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

На сегодняшний день радиолокация является одним из наиболее эффективных способов исследования малых тел Солнечной системы. Данные радиолокации дают возможность определить параметры движения небесного тела, его физические параметры, такие как форма и параметры вращения [1]. Отраженные радиосигналы позволяют судить о степени шероховатости и величине альбедо поверхности астероидов и комет [2]. Высокоточные оценки расстояний до тела, получаемые посредством применения радиолокации, позволяют уточнить орбиты небесных тел, опасных для Земли столкновением [3].

Использование модулированного радиосигнала во время радиолокации дает возможность строить радиоизображение небесных тел. В данной работе рассматриваются методики обработки радиоизображения астероида с целью уточнения его размера. Предполагается, что астероид имеет форму трехосного эллипсоида. Задаются величины полуосей эллипсоида, параметры вращения и орбита астероида. По этим данным генерируется модельное радиоизображение, которое используется для уточнения значений полуосей фигуры астероида. Рассмотрено два способа обработки радиоизображения: попиксельный и кластерный. Показано, что предложенный в работе кластерный способ позволяет уменьшить время обработки радиоизображения и повысить скорость сходимости процесса уточнения размера астероида.

- 1. Ostro S. J. Radar observations of asteroids // Asteroids II / ed. by R. P. Binzel, T. Gehrels, M. S. Matthews. Univ. of Arizona Press, 1989. P. 192–212.
- 2. Ипатов А.В., Бондаренко Ю.С., Медведев Ю.Д. и др. Радиолокационные наблюдения астероида 2011 UW158 // Письма в АЖ. 2016. Т. 42, № 12. С. 935–940.
- 3. Yeoman D. K., Chodas P. W., Keesey M. S. Asteroid and comet orbits using radar data // Astronomical Journal. 1992. Vol. 103. P. 303-317.

Некоторые методы повышения точности компенсации фазовой нестабильности при передаче сигналов частоты и времени

Р. С. Кобяков^{1,2}, Р. Н. Новожилов¹, И. А. Писарев¹, А. В. Жеглов¹, С. Ю. Медведев¹

¹ЗАО «Время-Ч» г. Нижний Новгород, Россия ²ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

При изменениях температуры фаза передаваемого сигнала возмущается не только волоконной линией, но и различными электронными устройствами, используемыми для передачи, приёма, преобразования, которые встречаются на пути прохождения сигнала. Величина этих возмущений оценивается по температурному коэффициенту фазы сигналов в этих устройствах. В совокупности вклад этих устройств в фазовую нестабильность передачи сигналов (порядка 50 пс/°С) сравним или превышает вклад оптоволокна длиной 1 км.

В данной работе рассмотрены некоторые частные методы решения данной задачи:

- использование термоконтроллеров в измерительных каналах компенсатора;
- включение в схему компенсации устройств, расположенных на приёмном конце линии (Рисунок).

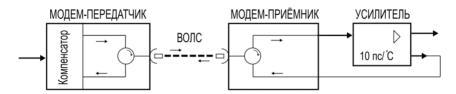


Рисунок. Схема компенсации с высокочастотным и импульсным усилителем на приёмном конце линии.

В докладе приведены результаты измерения нестабильности частоты сигнала, переданного через оптоволокно, при использовании этих методов.

Развитие оптических стандартов частоты: компактность, стабильность, уменьшение систематики

Н. Н. Колачевский

ФИАН, г. Москва, Россия

Сегодня оптические стандарты частоты на нейтральных атомах в оптических решетках и одиночных ионах в ловушках достигли относительной погрешности воспроизведения частоты на уровне 18-го знака после запятой. Как и в случае микроволновых стандартов (фонтанов), достижение столь высоких показателей обеспечивается детальным анализом систематических сдвигов частоты и сложными техническими решениями, позволяющими улучшить показатели стабильности и воспроизводимости. Основное просматриваемое направление применения стандартов с относительной погрешностью на уровне 10^{-18} лежит в области гравиметрии [1]. Уже сегодня погрешность определения разности высот с помощью оптических часов оказывается сопоставимой с результатами измерений методами лазерной дальнометрии и ГНСС.

Важной задачей развития данного направления является поиск фундаментальных и технических решений, позволяющих снизить вклад систематических сдвигов и влияния внешней среды. В докладе обсуждаются возможные направления развития оптических стандартов частоты: такие как поиск новых атомных систем, компактификация, создание непрерывно опрашиваемых стандартов и формирование синтетической частоты [2].

- 1. Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N., et al., Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks // Nature Photonics. 2020. Vol. 14. P. 411–415.
- 2. Golovovisin A., Tregubov D., Fedorova E., et al. Simultaneous bicolor interrogation in thulium optical clock providing very low systematic frequency shifts // Nature Communications. 2021. Vol. 12. Article number 5171. URL: https://www.nature.com/articles/s41467-021-25396-8 (accessed 25.08.2021).

Пикосекундные Nd:YAG лазеры для лунной лазерной дальнометрии с субджоулевым уровнем выходной энергии

А. Ф. Корнев¹, Р. В. Балмашнов¹, В. В. Коваль^{1,2}

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

В работе представлено сравнение двух схем мощных пикосекундных лазерных усилителей с субджоулевым уровнем выходной энергии, работающих на частоте следования импульсов $200~\Gamma$ ц, которые могут быть использованы в лунной лазерной дальнометрии (ЛЛД): (1) однокаскадная шестипроходовая на активном элементе Nd:YAG Ø15×140 и (2) двухкаскадная двухпроходовая на двух активных элементах Nd:YAG Ø15×140 мм и Ø10×140 мм. В работе приведены основные экспериментальные результаты испытаний каждой схемы и проведено сравнение схем.

Выходная энергия импульсов излучения 1064 нм в схемах (1) и (2) составила 0.53 Дж и 0.92 Дж, длительность импульсов — 81 пс и 63 пс соответственно. Выходная энергия схемы (2) была ограничена эффектом мелкомасштабной самофокусировки. Выходное излучение в каждой схеме было преобразовано во вторую гармонику с помощью кристалла LBO. Эффективность генерации второй гармоники в схемах (1) и (2) составила 54 % и 79 % соответственно. Энергия излучения на длине волны 532 нм составила 286 мДж и 730 мДж в схемах (1) и (2) соответственно. Выходная энергия схемы (2) была ограничена эффектом мелкомасштабной самофокусировки.

Обе разработанные схемы обладают высокой стабильностью формы импульса, высокой выходной энергией и высокой частотой следования импульсов. Однокаскадная схема (1) имеет меньшую себестоимость за счет использования одного каскада усиления, но является более сложной. Энергия импульса на выходе усилителя (1) достаточна для использования его в ЛЛД. Схема (2) устойчива к разъюстировкам, в ней проще компенсировать термически наведенное двулучепреломление и нестационарные искажения волнового фронта. Схема (2) позволяет получить более высокую равномерность распределения интенсивности излучения в ближнем поле и меньшую расходимость излучения. Значения выходной энергии на длинах волн 1064 нм и 532 нм, которые получены в схеме (2), являются рекордными для данного класса лазеров.

Разработанные схемы усилителей могут с успехом использоваться в ЛЛД.

Пикосекундный Nd:YAG лазер с широким рабочим температурным диапазоном (-40... +40°C)

А. Ф. Корнев¹, Ю. В. Кацев¹, Д. О. Оборотов¹, И. Г. Кучма¹, В. В. Коваль^{1,2}

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

В настоящее время пикосекундные лазеры широко применяются в прецизионной спутниковой дальнометрии. При этом в современных системах требуются лазеры с короткой длительностью импульса (<50 пс), высокой частотой следования импульсов (\sim 1 к Γ ц), а также высоким уровнем устойчивости к условиям окружающей среды [1].

В работе представлены результаты разработки компактного пикосекундного Nd:YAG лазера, обеспечивающего генерацию лазерных импульсов длительностью 35 пс, энергией 2.5 мДж на длине волны 532 нм и частоте следования импульсов 300 Γ ц. Основной особенностью разработки является возможность работы при температуре окружающей среды от -40° C до $+40^{\circ}$ C.

Лазер построен по схеме «задающий генератор» — «регенеративный усилитель» — «генератор второй гармоники». Основные особенности схемы и применяемые технические решения отображены в работе [2].

Широкий рабочий температурный диапазон обеспечивается за счет использования системы термостабилизации и многослойной термоизоляции. В основе системы термостабилизации лежит чиллер, обеспечивающий как охлаждение, так и нагрев лазера. В качестве теплоносителя выступает 42 %-й раствор пропиленгликоля. Дополнительно используется система распределенных плоских гибких нагревателей и термодатчиков, поддерживающих температуру лазера выше точки росы в режиме ожидания при отрицательных температурах окружающей среды. Габаритные размеры излучателя лазера $700 \times 245 \times 160 \text{ мм}^3$.

- 1. Wilkinson M., Schreiber U., Procházka I., et al. The next generation of satellite laser ranging systems // Journal of Geodesy. 2019. Vol. 93, no. 11. P. 2227–2247.
- 2. Davtian A. S., Kornev A. F., Koval V. V. The family of picosecond Nd:YAG lasers // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE, 2018. P. 606–606.

Определение предварительной орбиты в некомпланарном случае

В. Б. Кузнецов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Настоящая работа является обобщением ранее рассмотренного метода [1] для количества наблюдений больше или равного трём.

Предложен алгоритм поиска решения при определении предварительной орбиты в некомпланарном случае, когда плоскость определяемой орбиты не совпадает с плоскостью движения наблюдателя. Разработанный автором метод основан на решении системы трансцендентных уравнений для двух безразмерных переменных и позволяет решать задачу без наличия априорной информации о параметрах движения наблюдённого тела, а также каких-либо ограничений относительно них. Оцениваются все возможные решения системы, которые находятся посредством поиска минимумов целевой функции методом Нелдера — Мида [2] по симплексу. Настоящая методика может быть применена не только к наблюдениям астероидов и комет, но также легко адаптирована к ИСЗ.

В качестве примера приведены результаты определения орбиты первой межзвёздной кометы 2I/Борисова [3] по трём, четырём и пяти наблюдениям.

- 1. Кузнецов В. Б. К вопросу об определении предварительной орбиты небесного тела // Астрономический вестник. 2019. Т. 53, № 6. С. 456–466.
- 2. Nelder J. A., Mead R. A simplex method for function minimization // The Computer Journal. 1965. Vol. 7 (4). P. 308–313.
- 3. The International Astronomical Union. Minor Planet Center, 2020. [Электронный pecypc]. URL: https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object? <a href="https://minorplanetce

О негравитационном эффекте в движении астероидов, сближающихся с Землей

В. Б. Кузнецов, Ю. А. Чернетенкоч

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

При построении теорий движения астероидов, сближающихся с Землей (AC3), с учетом негравитационного ускорения, вызываемого эффектом Ярковского (ЭЯ), как правило, уточняется совместно с орбитальными параметрами только трансверсальная составляющая ускорения A_2 . Для оценки величины полного негравитационного ускорения необходимо знание также составляющих A_1 и A_3 . Ранее параметр A_3 не включался в число определяемых.

Полученные результаты для AC3 с достаточно продолжительной наблюдательной историей показали, что для 145 из них можно говорить об уверенном определении параметра A_2 (его ошибка $< 0.5 \times 10^{-14}$ а.е. / сут², при том, что сама величина $|A_2|$ может составлять несколько таких единиц). Из 145 рассмотренных AC3 для 109 включение в число определяемых параметров A_2 и A_3 привело к уменьшению СКО по сравнению с вариантом без такого включения.

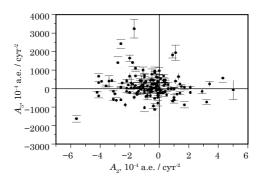


Рисунок. Сопоставление значений параметров A, и A, для 145 AC3.

Вычисления показывают, что диапазон значений A_3 примерно на 3 порядка больше, чем A_2 . Из рисунка видно, что распределение значений A_3 близко к симметричному относительно нуля. Если предположить, что угол теплового запаздывания составляет 1° , то диапазон значений A_1 может быть максимум на два порядка больше диапазона значений A_2 , а величина суммарного негравитационного ускорения A ($A^2 = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2$), действующего на рассмотренные AC3, не превышает нескольких единиц 10^{-11} a.e. / сут 2 .

Алгоритм определения азимута наземного ориентира автоматизированным астрономическим универсалом

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

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

Высокоточное определение астрономических азимутов наземных ориентиров в нашей стране до сих пор выполняется с использованием классических астрономических инструментов: ДКМ-3А (произв. «Wild», Швейцария), АУ-01 (произв. ЦНИИГАиК, Россия) [1–3]. Это приборы с визуальной регистрацией объектов, основные недостатки которых — продолжительное время сеанса наблюдений и высокие требования к квалификации исполнителей. С целью замены указанных инструментов в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разрабатывается автоматизированный астрономический универсал (ААУ), предназначенный для высокоточного и оперативного определения азимута в полевых условиях [4].

Определение азимута наземного ориентира с использованием ААУ заключается в определении азимута визирной оси по наблюдениям множества звезд, зарегистрированным с помощью КМОП-матрицы; далее производится поворот визирной оси на наземный ориентир, при этом фиксируется горизонтальный угол поворота. Все определения производятся с постоянной регистрацией положения прибора относительно плоскости горизонта. С использованием указанной информации, полученной в двух положениях ААУ с перекладкой, рассчитывается астрономический азимут наземного ориентира.

В работе подробно описан алгоритм определения астрономического азимута наземного ориентира с использованием ААУ.

- 1. Глазунов А. С. Современные тенденции в геодезической астрономии // Интерэкспо Гео-Сибирь. Новосибирск: СГГА, 2008. С. 183–188.
- 2. Чернов И. В. Методика определения приборной поправки гиротеодолита с заданной точностью // Труды военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2019. Вып. 671. С. 192–200.
- 3. Гиенко Е. Г. Астрометрия и геодезическая астрономия: учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2011. 168 с.
- 4. 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.

Синхронизация часов станций с помощью наблюдения пульсара в Крабовидной туманности

С. Л. Курдубов, Д. А. Маршалов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Для независимой синхронизации удалённых часов без использования спутниковых систем применяются методы РСДБ и «пульсарного тайминга». Ограничениями РСДБ-метода являются: необходимость предварительной синхронизации часов станций, потребность передачи больших объемов данных и наличие высокопроизводительного вычислительного центра. Синхронизация на основе пульсарной шкалы времени может быть реализована только для ограниченного числа крупных радиотелескопов, оснащенных специализированным оборудованием.

Альтернативная технология синхронизации часов, лишенная указанных недостатков, может быть реализована по наблюдениям гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности. Мощности гигантских импульсов достаточно для уверенной регистрации на небольших радиотелескопах. Моменты появления импульсов связаны с периодом пульсара, но появляются не в каждый период, а с пропуском случайного числа периодов. Таким образом, порядок появления гигантских импульсов и числа пропусков между ними представляет собой неповторяющуюся уникальную последовательность. Такая последовательность может быть использована для абсолютной синхронизации часов двух разнесённых станций. Дополнительная высокоточная синхронизация осуществляется с помощью кросскорреляции записей сигналов отдельных гигантских импульсов, при этом объем передаваемых данных не превышает сотни килобайт на импульс.

Для апробации предлагаемой технологии были проведены наблюдения пульсара в Крабовидной туманности с использованием радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 сети Квазар-КВО в L-, S- и X-диапазонах частот. Были получены задержки прихода гигантских импульсов на пары радиотелескопов: в L-диапазоне на — РТ-32 и S-диапазоне — на РТ-13. Теоретическая погрешность задержек, получаемая по наиболее мощным импульсам в S-диапазоне, составила десятки пикосекунд. Однако, в связи с тем, что задержки были получены по одному частотному диапазону, результаты содержат в себе вариации в среде распространения сигнала, поэтому погрешность измерения составила порядка единиц наносекунд.

Развитие системы государственного геодезического обеспечения территории России

Е. М. Мазурова

ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», г. Москва, Россия

Систему государственного геодезического обеспечения России можно подразделить на три составляющие:

- геодезическое обеспечение, основой которого являются государственные геодезические сети (спутниковые и классические);
- государственнаявысотная основа, представленная государственной нивелирной сетью пунктов I и II классов;
- гравиметрическое обеспечение, основой которого являются государственные гравиметрические сети.

Эволюция системы государственного геодезического обеспечения России указывает на необходимость согласованного гармоничного развития всех ее составляющих, которые связаны друг с другом и независимо друг от друга рассматриваться не могут.

В докладе представлены результаты анализа дальнейших перспектив развития системы государственного геодезического обеспечения России.

Российско-кубинская ГНСС-служба для мониторинга и анализа геофизических параметров

Д. А. Маршалов¹, Ю. С. Бондаренко¹, В. В. Суворкин¹, И. А. Безруков¹, С. В. Сержанов¹, О. Понс²

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия ²ИГА, г. Гавана, Республика Куба

Для мониторинга и анализа геофизических параметров Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) и Институт геофизики и астрономии Республики Куба (ИГА) ведут работы по созданию российско-кубинской ГНСС-службы, расположенной на территории обсерватории ИГА в г. Гавана. Служба оснащена геодезическим и метеорологическим оборудованием в комплексе со средствами сбора и передачи данных и будет обеспечивать проведение регулярных автоматизированных геодезических и метеорологических наблюдений с последующей передачей данных на сервер центра обработки ИПА РАН в г. Санкт-Петербурге.

В результате обработки данных измерений совместно с наблюдениями российской и международной сетей станций будут доступны локальные геофизические параметры, которые могут быть использованы при реализации глобальных систем отсчета и решении других задач временного и координатного обеспечения. Полученные результаты позволят анализировать изменения в моделях уровня моря и нагрузки океана, повышать точность рассчитанных апостериорных и прогнозных орбит навигационных спутников и ПВЗ.

В докладе представлены техническая реализация ГНСС-службы и текущее состояние работ.

Многофункциональная система преобразования сигналов для радиотелескопа PT-13 в обсерватории «Светлое»

Д. А. Маршалов, Е. В. Носов, Л. В. Федотов, Ю. С. Шейнман

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

К настоящему моменту для проведения радиоинтерферометрических, радиометрических и спектральных наблюдений радиотелескопы РСДБсети «Квазар-КВО» РТ-32 и РТ-13 оснащены различным комплексным оборудованием. Применяемые на данный момент системы преобразования сигналов (СПС) на РТ-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары» являются узкополосными и не в полной мере удовлетворяют современным требованиям к полосам частот регистрируемых сигналов. Широкополосные СПС, используемые на РТ-13 в обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская», не обладают достаточным функционалом, необходимым для удовлетворения современных требований VGOS [1]. Для решения этих задач в ИПА РАН разработана многофункциональная система преобразования сигналов (МСПС), способная заменить собой все разнообразие СПС и других выходных устройств, используемых на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32. Первый опытный образец МСПС был введен в эксплуатацию в 2020 г. на радиотелескопе РТ-13 в обсерватории «Светлое».

В работе представлены реализация аппаратной части МСПС и ее программное обеспечение. Система содержит до 12 каналов — модулей цифрового преобразования сигналов, обеспечивающих цифровую обработку радиоастрономических сигналов в полосе шириной до 2 ГГц. Суммарная скорость формируемого МСПС и передаваемого по оптическим линиям информационного потока может достигать 96 Гбит/с. Приведены основные параметры системы и описание ее работы в различных режимах эксплуатации радиотелескопа. Представлен анализ основных результатов экспериментальных исследований МСПС в обсерватории «Светлое», в том числе в процессе проведения РСДБ-наблюдений.

Литература

1. IVS Technology. VGOS Concept [Электронный ресурс]. URL: https://ivscc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-concept.html (accessed: 21.12.2020).

Динамические и физические особенности кометы 323Р

Ю. Д. Медведев, С. Р. Павлов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Ученые космической обсерватории SOHO обнаружили околосолнечные кометы с перигелийными расстояниями $q \approx 0.05$ а.е., которые наблюдались в течение нескольких прохождений вблизи Солнца. Интерес к этим кометам велик, поскольку их наблюдения не позволяют дать однозначного ответа об их кометной природе.

В данной работе мы исследовали динамическую и физическую эволюцию кометы 323Р. Комета наблюдалась в шести появлениях. В первых пяти появлениях комета наблюдалась с аппарата SOHO с невысокой астрометрической точностью, в 2021 г. удалось получить более точные наземные позиционные наблюдения. На изображениях SOHO этой кометы нет явной комы или хвоста, но кривая блеска свидетельствует о возможном наличии невидимой комы. Равновесные температуры во время этих наблюдений SOHO превышают 1000 К, поэтому неясно, имеет ли место сублимация летучих льдов, как у типичной кометы, или это неактивный объект, теряющий материал в результате сублимации тугоплавких материалов. В наземных наблюдениях, проведенных на расстояниях 0.3–0.6 а.е., объект выглядит точечным.

По всем имеющимся наблюдениям проведено улучшение орбитальных параметров кометы. Впервые удалось объединить наблюдения всех 6 появлений единой орбитой. Определена величина трансверсальной составляющей негравитационного ускорения, которая оказалась равной $A_2 = 0.002 \cdot 10^{-8}$ а.е. / сут, и произведена оценка изменения негравитационного ускорения со временем. Вычисления показали, что с течением времени величина A_2 увеличивается, что может быть связано с уменьшением массы ядра кометы при сохранении интенсивности выброса вещества с поверхности.

Используя эллипсоид рассеяния для номинальной орбиты, определено облако виртуальных комет с начальными параметрами, распределенными в соответствии с нормальным законом. Орбиты этих комет были проинтегрированы назад на 12 тыс. лет, в результате чего удалось исследовать динамику расхождения элементов их орбит.

Рассчитаны оценки диаметра ядра кометы и скорости его уменьшения вследствие потери вещества. Исследована динамика пылевых и ледяных частиц различного диаметра в коме кометы в окрестности ее перигелия.

Динамические особенности околосолнечных комет

Ю. Д. Медведев, С. Р. Павлов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

К околосолнечным обычно относят кометы с перигелийным расстоянием порядка 1–20 радиусов Солнца (0.004–0.08 а.е.). За последние 25 лет благодаря наблюдениям космического аппарата SOHO, расположенного в точке Лагранжа L_1 , было открыто более 4000 новых околосолнечных комет. Большая их часть имеет совсем небольшие размеры, порядка метров – десятков метров, из-за чего достаточной освещенности и яркости они достигают только на маленьком участке дуги орбиты в окрестности перигелия. Это приводит к тому, что распределение наблюдений этих комет крайне неравномерно. Кроме того, наблюдения имеют низкую точность, что сильно усложняет определение орбит данных комет. За прошедшие годы в зависимости от схожести элементов орбит было выделено 4 семейства околосолнечных комет.

В данной работе мы исследовали динамические особенности орбит 6 наиболее долгоживущих комет из семейств Марсдена и Крахта: 321P, 322P, 323P, 342P, P/1999 J6, P/2008 N4. По позиционным наблюдениям этих комет уточнены их координаты, скорости и трансверсальные составляющие негравитационных ускорений A_2 . Величины негравитационных ускорений A_2 большинства комет не превышали 0.02×10^{-8} а.е. / сут. Исключение составила комета P/1999 J6, что, вероятно, связано с неточностью модели, не учитывающей процессы фрагментации кометы после прохождения перигелия в 1999 г. Величина среднеквадратической ошибки единицы веса наблюдения в большинстве случаев достигала 25 угл. сек.

Орбиты исследуемых орбит были проинтегрированы назад на 12 тыс. лет, на основании чего были построены графики изменения параметров оскулирующих орбит. Также попарно для орбит были рассчитаны значения критериев схожести и метрики Холшевникова в пространстве элементов, проанализирована динамика изменения их значений. В результате проведенного анализа было выдвинуто предположение о возможной фрагментации пары комет 342P и P1999 J6 из общего обломка «Комплекса Макхгольца» в районе 720 г. до н. э.

MEGNO-анализ орбит рассматриваемых комет показал высокую степень хаотичности, вызванную возмущающим гравитационным воздействием Юпитера в районе афелия. Оценка времени Ляпунова в большинстве случаев не превышала 40 лет.

Вклад ИПА РАН в подготовку ITRF2020

С. М. Миронова, С. Л. Курдубов, Е. А. Скурихина

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В 2020–2021 гг. под руководством IERS проводилась работа по созданию каталога ITRF2020. 11 центров анализа РСДБ-наблюдений, включая центр ИПА РАН, предоставляли результаты обработки одинакового набора РСДБ-сессий (6519 сессий S/X и 38 сессий VGOS) в исследовательский центр данных IVS. Центры анализа обрабатывали данные сессий, используя методику, набор моделей и априорных данных, рекомендованные рабочей группой ITRF2020. По результатам обработки каждой суточной сессии определялись координаты станций и источников, все ПВЗ и скорости изменения земного полюса. Итоговые данные предоставлялись в виде системы нормальных уравнений, записанной в SINEX-формате. В свою очередь, исследовательский центр данных IVS отправлял в центр ITRS IERS уточненные координаты и значения скоростей РСДБ-станций как результат комбинирования SINEX-файлов всех центров анализа.

Центр анализа ИПА РАН также принял участие в проекте ITRF2020. Для этого в программном пакете QUASAR был произведен ряд модификаций: добавлены модели галактической аберрации, гравитационной деформации антенны и влажной тропосферной задержки, отсутствующие в рекомендациях IERS (2010) [1]. Также были обновлены модели океанических приливов, высокочастотных вариаций ПВЗ, антенных офсетов и температурного расширения антенн. В процессе обработки автоматически были исключены наблюдения источников, имеющих менее четырех неотбракованных наблюдений в течение одной сессии. Дополнительно была проведена проверка корректности обработки сессий и выполнено сравнение с предыдущим способом обработки.

- 1. IERS Technical Note 36: IERS Conventions (2010) / ed. by G. Petit, B. Luzum. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. P. 179.
- 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.

Использование астроизмерителя для изучения тонкой структуры локального аномального гравитационного поля

М. М. Мурзабеков

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

Для подготовки высокодетальных навигационно-гравиметрических карт с появлением астроизмерителя появилась возможность проводить измерения составляющих уклонения отвесной линии (УОЛ) с детальностью менее километра и погрешностью измерений десятые доли угл. сек.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан астроизмеритель, обладающий исключительной точностью измерений, характеризующийся погрешностью (0.1-0.2)" и временем измерений в единичной точке не более 50 мин [1,2]. С использованием астроизмерителя на известной Московской аттракции, при расстоянии между точками измерений равном нескольким километрам, проведены измерения составляющих УОЛ, что позволило обнаружить существенные локальные аномалии последних [3]. С целью обнаружения аномалий при еще более высокой дискретности измерений определены значения составляющих УОЛ на полигоне размером 1.5×1.5 км при расстоянии между точками равном нескольким сотням метров, что позволило «вскрыть» тонкую структуру локального аномального гравитационного поля.

Проведенные исследования показали возможность использования астроизмерителя для изучения локального гравитационного поля, например, на уже существующих пунктах колокации, а также при создании новых.

- 1. Мурзабеков М. М., Фатеев В. Ф., Пругло А. В., Равдин С. С. Результаты астроизмерений уклонений отвеса с использованием нового метода измерений // Альманах современной метрологии. 2020. № 2 (22). С. 42–56.
- 2. Способ измерения уклонений отвесной линии и устройство для его реализации: пат. 2750999 Российская Федерация, МПК G01С 9/00 / Денисенко О. В. и др.; патентообладатель ФГУП «ВНИИФТРИ». № 2020139586; заявл. 01.12.20; опубл. 07.07.21, бюл. № 19.
- 3. Мурзабеков М. М., Фатеев В. Ф., Юзефович П. А. Измерения уклонений отвеса на известной Московской аттракции с помощью цифрового астроизмерителя // Астрономический журнал. 2020. Т. 97, № 10. С. 873–880.

Оценка состояния частотно-временного обеспечения ГНСС по данным Международной службы ГНСС и других источников

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

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

При обосновании направлений развития частотно-временного обеспечения (ЧВО) системы ГЛОНАСС необходимо учитывать современное состояние и результаты сравнительного анализа достигнутого уровня ЧВО ГНСС.

ЧВО зарубежных ГНСС и отечественной системы ГЛОНАСС характеризуется следующими основными показателями:

- точность передачи системного времени ГНСС;
- точность согласования системной ШВ ГНСС с национальной реализацией UTC(k) координированной ШВ UTC;
 - точность передачи времени UTC.

Точность передачи системного времени ГНСС обеспечивается точностью поправок на расхождение бортовой шкалы времени (БШВ) КА относительно системного времени ГНСС и является одним из основных факторов, определяющих точность навигационных услуг, предоставляемых ГНСС. В настоящее время в космическом сегменте ГНСС для формирования БШВ КА применяются различные типы бортовых квантовых стандартов частоты (КСЧ): цезиевые, рубидиевые и водородные. Анализ поведения бортовых КСЧ в процессе эксплуатации и оперативный учет изменения характеристик вследствие старения или воздействия внешних факторов имеют решающее значение для обеспечения точности ЧВО ГНСС.

На основе сравнительного анализа данных различных источников получены оценки нестабильности частоты бортовых КСЧ различного типа на широком диапазоне интервалов, выполнена интерпретация результатов, определен потенциально достижимый порог точности прогнозирования БШВ КА для различных ГНСС. Показано, как анализ данных позволяет наилучшим образом отслеживать особенности отдельных бортовых КСЧ и использовать преимущества КСЧ с улучшенными характеристиками в интересах повышения точности ЧВО ГНСС.

Обработка и анализ РСДБ-наблюдений космических аппаратов системы ГЛОНАСС комплексом «Квазар-КВО»

В. В. Пасынков¹, И. Ф. Суркис², Е. В. Титов¹, Д. А. Гулидов¹, С. М. Широкий¹

¹АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия ²ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В первом квартале 2017 г. были завершены предварительные работы по выбору сигналов КА системы ГЛОНАСС, потенциальных для применения РСДБ-техники. В мае 2017 г. был поставлен и проведен эксперимент по наблюдению навигационных сигналов КА в диапазоне L1 на радиотелескопах РТ-32 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» [1].

В ходе эксперимента были решены следующие задачи:

- выбор, исходя из технической оснащенности РСДБ-станций, навигационных сигналов КА системы ГЛОНАСС для последующей корреляционной обработки;
- разработка математической модели РСДБ-задержки при работе по сигналам ГЛОНАСС, оценка точности нового измеряемого параметра в интересах определения потенциального вклада новой навигационной функции в улучшение штатного эфемеридно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС;
- оценка параметров трансформирования Гельмерта для систем координат, уточняемых в различных техниках: $PCДБ \Gamma HCC$ KOC (квантовая оптическая система).

Корреляционная обработка выполняется в ИПА РАН на программном корреляторе RASFX [2, 3]. Разработанное специальное ПО постпроцессорной обработки фазомодулированных сигналов КА обеспечивает вычисление как «грубой» (групповой), так и «точной» (фазовой) РСДБ-задержки.

При обработке РСДБ-задержек по сигналам ГЛОНАСС впервые предложена технология комплексирования РСДБ-задержек по внегалактическим радиоисточникам и по навигационным сигналам и измерений наземного сегмента космического комплекса системы ГЛОНАСС.

В докладе приводятся результаты обработки и анализа наблюдений, состоящие в экспериментальном подтверждении: 1) миллиметрового уровня точности новой навигационной функции РСДБ-задержки, полученной по сигналам системы ГЛОНАСС, и 2) сантиметрового уровня точности

определения рассогласования координат, формируемых с использованием различных техник: РСДБ - ГНСС - КОС.

Разработаны предложения по совершенствованию РСДБ-техники при работе по навигационным сигналам КА системы ГЛОНАСС.

- 1. Иванов Д. В., Ипатов А. В., Пасынков В. В. и др. Использование узлов колокации для повышения точности системы ГЛОНАСС // Сб. тезисов докладов конференции 7-й Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). Санкт-Петербург: ИПА РАН, 2017. 3 с.
- 2. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Программный коррелятор для РСДБ-сети малых антенн // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 84–88.
- 3. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен и др. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. N 6. С. 1–9.

Текущие работы ГМЦ ГСВЧ в части определения ПВЗ

С. Л. Пасынок¹, И. В. Безменов¹, И. Ю. Игнатенко¹, В. С. Иванов¹, Е. Н. Цыба¹, В. Е. Жаров²

¹ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия ²ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

Работы по оперативному определению ПВЗ в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) ведутся с самого момента создания ФГУП «ВНИИФТРИ» — с 1954 г. [1]. Роль ФГУП «ВНИИФТРИ» как ГМЦ ГСВЧ закреплена Постановлениям Правительства РФ № 225.

В настоящее время во ФГУП «ВНИИФТРИ» и его филиалах, расположенных в Новосибирске, Иркутске, Хабаровске и Петропавловске-Камчатском, проводятся ГНСС-, РСДБ- и спутниковые лазерные дальномерные измерения, а также последующая обработка результатов с целью определения ПВЗ. Ведутся работы по вычислению орбит и поправок часов КА, а также обработка данных спутниковых альтиметрических измерений. Оперативное формирование сводной информации о ПВЗ в результате совместной обработки всех данных и передача бюллетеней потребителям осуществляются ежесуточно [2]. Использование при обработке данных радиоинтерферометра на узлах колокации, созданного ИПА РАН, позволяет существенно увеличить точность определения сводных значений Всемирного времени и их прогнозирования.

- 1. Кауфман М. Б., Синенко Л. А., Юношев Л. С. Государственная служба определения параметров вращения Земли: краткая история и современное состояние // Труды ИПА РАН. 2001. Вып. 6. С. 24–33.
- 2. Pasynok S., Bezmenov I., Ignatenko I., et al. Operative EOP activities at VNIIFTRI // Proceedings of the Journées systèmes de référence Spatio-temporels «Astrometry, Earth rotation and reference system in the Gaia era». Paris Observatory, 2020. P. 135–140.

Феномен различных систематических погрешностей измерений псевдодальности по сигналам НКА с общей рабочей частотой

Д. С. Печерица, В. Н. Федотов

ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Москва, Россия

Определение значений систематических погрешностей измерений псевдодальности сигналов ГНСС в навигационной аппаратуре потребителя необходимо в ряде современных задач. На сегодняшний день выявлена зависимость таких погрешностей от частоты сигнала, что объясняется зависимостью задержки сигнала в тракте от его частоты. Кроме того, к настоящему моменту многие исследователи обнаружили наличие различных систематических погрешностей измерений псевдодальностей по сигналам GPS для разных приёмников. Эти различия не могут быть объяснены групповым временем запаздывания в радиочастотном тракте приёмника, поскольку сигналы GPS излучаются на одной частоте. Однако их можно объяснить эффектом влияния искажений формы навигационного сигнала на смещение оценки псевдодальности. В случае идеального сигнала эффект не проявляется, но при наличии неких искажений могут проявиться дополнительные систематические ошибки, которые зависят от схемотехники приёмника и алгоритма обработки сигнала. Т. е. это дополнительная составляющая может измениться даже при смене только прошивки навигационного приёмника.

Проведены исследования DCB для набора различных моделей приемников на основе реальных сигналов ГЛОНАСС, GPS, GALILEO.

Также был проведен эксперимент с синтезированным сигналом, который показал наличие зависимости систематической погрешности измерений псевдодальности от характеристик модулятора формирователя навигационного сигнала.

- 1. Pecheritsa D. S. GLONASS receivers calibration in pseudorange biases // 2018 XIV International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). IEEE, 2018. № 10. doi: 10.1109/apeie.2018.8545157.
- 2. Hauschild A., Montenbruck O. A study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing // GPS Solutions. 2014. № 20. P. 159–171. doi: 10.1007/s10291-014-0426-0.

Солнечное затмение 10.06.2021 г. по наблюдениям на радиотелескопах РТ-32 и РТ-13 в обсерваториях «Светлое» и «Бадары» (первые результаты)

И. А. Рахимов¹, Т. С. Андреева¹, Н. А. Топчило², Н. Г. Петерова³, Д. В. Иванов¹, А. В. Ипатов¹, Г. Н. Ильин¹, В. Г. Олифиров¹, Е. Ю. Хвостов¹

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

Представлены первые результаты наблюдений солнечного затмения 10.06.2021 г. в двух точках вдоль его полосы: обсерватории «Светлое» (Карелия, фаза ~ 0.27) и обсерватории «Бадары» (Бурятия, фаза ~ 0.43). Наблюдения выполнены с помощью полноповоротных радиотелескопов РТ-32 и РТ-13 в микроволновом диапазоне длин волн ($1.0~{\rm cm}$, $3.5~{\rm cm}$, $6.2~{\rm cm}$ и $13~{\rm cm}$ с анализом круговой поляризации). Это восьмой случай исследований Солнца методом наблюдения солнечных затмений, реализация которого с использованием инструментов, принадлежащих ИПА РАН, позволяет достичь теоретического предела эффективного углового разрешения затменных наблюдений $\sim (1-3)^{\prime\prime}$ на микроволнах.

Основным достоинством затменных наблюдений являются координатные измерения, дающие самые точные сведения о тонкой структуре атмосферы Солнца на микроволнах. Это открывает возможность ставить задачи исследования слабых деталей структуры, таких как распределение радиояркости вблизи лимба, корональные дыры, радиогрануляция, до сих пор недостаточно изученные. Приведены оригинальные записи и результаты первичной обработки, а также предварительного отождествления отдельных деталей структуры источников микроволнового излучения путем сопоставления с наблюдениями Солнца в других диапазонах (УФ и X-гау).

Адаптивное формирование выборки измерений аппаратуры спутниковой навигации высокоорбитального космического аппарата

Г. В. Скорынина

ОАО «Корпорация «Комета», г. Москва, Россия

Особенности навигационного поля на геостационарной и высокоэллиптических орбитах приводят к значительным трудностям при определении параметров движения центра масс КА. Для преодоления этих трудностей можно использовать обработку измерений, накопленных на временном интервале, сопоставимом с периодом обращения КА [1], или аппаратуру спутниковой навигации, интегрированную с другими системами КА [2].

Задача обработки измерений часто оказывается плохо обусловленной. Её можно решать с помощью специальных методов. Наиболее распространены методы масштабирования, регуляризации и сингулярного разложения [3–5].

Альтернативой такому подходу представляется предложенный автором особый способ формирования выборки измерений, позволяющий уйти от необходимости решения плохо обусловленных задач.

- 1. Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации / Под ред. В. А. Бартенева, М. Н. Красильщикова. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2014. 191 с.
- 2. Кружков Д. М. Оценка точности астро-спутниковой интегрированной навигационной системы спутника связи // Труды МАИ. 2012. Вып. 51. С. 1–23.
- 3. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В. Вычислительные методы для инженеров. М.: Издательство МЭИ, 2003. 596 с.
- 4. Форсайт Дж., Молер К. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. М.: Мир, 1969. 168 с.
- 5. Кабанихин С. И. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. 457 с.

Адаптивный подход к коррекции оценки влажностной тропосферной задержки

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

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Возможности радиометров водяного пара (РВП) [1] позволяют производить оценку влажностной компоненты тропосферной задержки (ВТЗ) в режиме реального времени с частотой обновления данных до 1 Гц. Однако неблагоприятные погодные условия искажают результаты, делая их непригодными для использования. Эти искажения можно идентифицировать по значению абсолютной величины ВТЗ, первой производной и др. Пороговые значения указанных параметров временного ряда значений ВТЗ определяются на основе консервативной модели влияния внешних факторов (преимущественно погодных) на измерения радиометром первичных данных (антенные температуры) и последующую оценку ВТЗ. В консервативной модели пороговые значения определяются эмпирически и остаются постоянными.

Разработка консервативной модели позволяет не только распознавать периоды с недостоверными данными измерений, но и корректировать эти данные, приближая их к действительным значениям. Недостатком консервативной модели является затрудненный выход из режима коррекции. Развитие консервативной модели в адаптивную позволяет решать указанную проблему выхода из режима коррекции, более того скорректированные данные лучше соотносятся с фактическим состоянием тропосферы в соответствующее время.

Использование адаптивной модели превращает алгоритм коррекции в систему обучения этого алгоритма на основе истории наблюдений с использованием различных средств измерений (ГНСС, РСДБ, РВП, метеозонды).

Действующая версия адаптивной модели функционирует в режиме псевдореального времени (обновление производится 1 раз / 5 мин) и обеспечивает визуальный контроль работоспособности РВП.

Литература

1. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмпковский В. Г., Шишикин А. М. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 210–215.

Синтезирование круговой поляризации при корреляционной обработке РСДБ-наблюдений, выполненных на радиотелескопах РТ-13 с линейными поляризациями

И. Ф. Суркис

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Сотрудниками ИПА РАН в 2019—2020 гг. на радиотелескопах РТ-13 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» [1] проводились совместные наблюдения на широкополосных приемниках с линейной и круговой поляризацией. В ходе корреляционной обработки, выполненной на программном корреляторе RASFX [2], получены взаимные корреляции всех сочетаний поляризации.

На завершающем этапе обработки корреляционные данные, полученные с разными сочетаниями поляризации, объединялись для получения единой групповой задержки, то есть по линейной поляризации выполнялся «синтез» в круговую поляризацию сигналов. В процессе синтеза выполнялась амплитудно-фазовая калибровка взаимно-корреляционных спектров.

Полученные групповые задержки часовых сессий наблюдений по синтезированной круговой поляризации и по исходной линейной использовались для получения оценок Всемирного времени UT1 – UTC пакетом программ «Quasar» [3]. Сравнение результатов показало их улучшение — как уменьшение отклонения от опорного ряда, так и уменьшение случайных составляющих ошибок оценок UT1 – UTC.

- 1. Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., et al. Russian VLBI network "Quasar": Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2019. Vol. 10, Issue 2. P. 150–156.
- 2. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 6. С. 1–9.
- 3. Гаязов И. С., Губанов В. С., Курдубов С. Л. Служба параметров вращения Земли ИПА РАН // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 39. С. 23–29.

Система контроля навигационного поля КНС ГЛОНАСС / GPS на территории Восточного полушария Земли беззапросными измерительными системами

Н. А. Тестоедов¹, В. М. Владимиров², Д. Н. Рыжков¹, А. В. Кузовников¹, Р. Д. Маликов²

¹АО «ИСС», г. Железногорск, Россия ²ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

Анализ навигационной системы GPS показал, что на основе беззапросных технологий можно обеспечивать как высокие точностные характеристики эфемерид навигационных космических аппаратов (НКА), так и временные поправки. В связи с этим было принято решение [1] о создании беззапросных измерительных систем (БИС), которые позволяют одновременно измерять эфемериды НКА и определять положение временной шкалы НКА относительно шкалы времени центрального синхронизатора.

В настоящее время данная сеть БИС введена в опытную эксплуатацию. Дальнейшее увеличение количества БИС на территории России уже не дает качественного улучшения точности эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС, в связи с этим необходимо размещение сети беззапросных систем за рубежом. Принято решение о размещении БИС на российских станциях в Антарктиде [2].

- 1. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы».
- 2. Владимиров В. М., Тяпкин В. Н. Фатеев Ю. Л. и др. Мониторинг навигационного поля ГЛОНАСС/GPS в Антарктиде // Радионавигационные технологии. 2017. Вып. 6. С. 37–42.

Определение азимута по радионаблюдениям геостационарных ИСЗ

Д. А. Трофимов¹, С. Д. Петров¹, И. В. Чекунов²

¹СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия ²МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

Задача определения азимута направления является актуальной во многих приложениях, таких как ориентация геодезических сетей и полигонов, наведения и прицеливания, а также для начальной выставки инерциальных навигационных систем. Традиционно азимут определяется по астрооптическим наблюдениям Полярной звезды или Солнца, а также посредством гиротеодолита. Астрооптический способ обладает высокой точностью, но требует прямой видимости Полярной звезды и/или Солнца. Гиротеодолитный способ является всепогодным, но требует длительного времени и обладает низкой точностью, которая зачастую недостаточна для решения той или иной задачи.

В данной работе предлагается автоматизированный способ определения азимута направления по радиоинтерферометрическим наблюдениям геостационарных телекоммуникационных спутников. В основе метода лежат измерения разности фаз телекоммуникационных сигналов, синхронно принимаемых разнесенными на местности антеннами. Такой метод является всепогодным, оперативным и позволяет получить точность азимута, сравнимую с астрооптическим методом. В работе рассмотрено математическое описание метода определения азимута по радиоинтерферометрическим наблюдениям геостационарных ИСЗ, представлены особенности технической реализации, а также даны численные оценки точности определения азимута.

Определение видимых собственных движений объектов на небесной сфере

В. Н. Тряпицын

ФГБУН «КрАО РАН», пос. Кацивели, Республика Крым, Россия

В работе предложен метод определения видимых собственных движений звезд и небесных тел (как параллактическое смещение на небесной сфере положения двигающегося небесного тела при движении центра системы координат относительно центра масс Галактики), а также метод определения движения наблюдателя вокруг центра координат. Рассмотрено несколько вариантов движения как небесного тела, так и наблюдателя вокруг центра системы координат. Движение центра координат при этом предполагается прямолинейным и равномерным или по круговой орбите вокруг центра Галактики. Параллакс рассматривается как функция, зависящая от движений небесного тела и наблюдателя.

Предложен алгоритм оптимального проведения измерений для конкретных небесных объектов по координатам α и δ. Рассмотрено использование спектров объектов — смещение полос из-за эффекта Доплера, определение по спектру примерной массы объекта и т. д. Изучена необходимость внесения поправок в видимые собственные движения, параллаксы и расстояния в зависимости от положения исследуемых объектов относительно центра-масс Галактики и других массивных тел, прохождения объектами зон газопылевых туманностей. Предложен алгоритм по обнаружению объектов из анализа видимых собственных движений групп небесных тел, испытывающих ощутимое взаимное гравитационное притяжение.

Предложено провести эксперимент по фиксации положений и спектральных особенностей небесных тел из двух точек — L2 и точки на орбите Меркурия или вблизи Солнца — и их сопоставлению. Изучается необходимость и обоснованность этих экспериментов.

Технологические основы навигационно-баллистического обеспечения управления КА и примеры применения перспективных космических технологий

А. Е. Тюлин, В. В. Бетанов

АО «Российские космические системы»

Стратегическая цель программы «Комплексное развитие космических информационных технологий на 2020–2030 годы» представлена следующими задачами:

- достижение необходимого уровня обеспечения спутниковыми услугами всех отраслей экономики России;
- создание условий для цифровизации экономических, производственных, образовательных, научных, административных и культурных процессов развития страны с помощью спутниковых технологий;
- расширение присутствия отечественных космических продуктов на международных рынках;
- максимальное использование возможностей существующих и перспективных космических систем и комплексов в интересах национальной, общественной и экономической безопасности страны.

Реализация указанной цели невозможна без разработки и использования новейших спутниковых и космических технологий. В работе исследованы основные принципы создания и применения космических технологий (в том числе навигационно-баллистических): системность, комплексность, оптимальность (рациональность), устойчивость, перспективность и оперативность.

Создание технологий, прежде всего ключевых, является одной из главных функций целевой разработки современных перспективных систем и комплексов, в том числе для реализации крупных космических программ страны. Поэтому разработка космических технологий должна вестись в соответствии с принципом системности [1, 2].

К числу важнейших принципов разработки современных технологий можно отнести принцип комплексности, реализация которого обеспечивает разработку комплексных планов проведения и технико-экономического обеспечения их исследования, моделирования на начальном этапе, разработки, испытаний, их согласование с общими планами создания технической системы.

В основу планирования создания любого организационно-технического мероприятия, как правило, закладывается принцип *оптимальности*

(при определенных обстоятельствах — рациональностии). Применительно к созданию технологий это означает выбор показателей и критериев эффективности разработки и использования создаваемой технологии, а в соответствии с этим поиск инструмента создания его с учетом конкретных целей, условий, ограничений, применяемых методик и априорных сведений об объекте разработки.

Одним из важнейших рассматриваемых принципов служит аспект *устойчивости*, так как разрабатываемая технология, как правило, применяется в конкретных пределах области использования. Вместе с тем, отклонения входных параметров «заготовки» в известных пределах не должны приводить к катастрофическим результатам на выходе процесса создания и (или) использования. При этом можно говорить о корректности разработанной технологии.

Применяемые технологии должны быть и перспективными, и оперативными. Перспективные технологии позволяют реализовать преимущества системного подхода к созданию систем и комплексов путем наилучшей увязки всего многообразия технологических операций с главными целями создания объекта. К числу важнейших задач перспективной разработки технологий относится разработка комплексных элементов проведения, технико-экономического обеспечения и финансирования разработки, их согласование с общими планами создания системы. Оперативность технологий должна обеспечить не только временную составляющую процесса разработки и ее применения, но также конкретизацию и детализацию перспективного использования и ее уточнение на основе анализа хода испытаний и предварительной эксплуатации.

В настоящее время ключевые технологии — это сложный комплекс знаний и ноу-хау, полученных при проведении дорогостоящих исследований [1–3]. В работе изучаются вариант общей классификации технологий и важные их примеры из навигационно-баллистического обеспечения (НБО) управления КА. В частности, используется адаптация понятий технологическая операция, технологический цикл и технологический процесс НБО, а также их исследование с помощью ленточных графиков в общей схеме управления КА.

При представлении типового цикла НБО в рассматриваемом формате вводятся пространственные матрицы проблем, возникающих в процессе решения соответствующих задач КВНО. Их элементами служат традиционные матрицы проблем, моделирование и анализ которых позволяет выявить рейтинг каждой из них для противодействия («борьбы») в первую очередь с наиболее значимыми из них.

В качестве решения предложена обобщенная технологическая модель оперативного определения параметров движения (ОПД) КА, содержащая четыре подсистемы расчета и реализации сервисов НБО. Проведен соответствующий анализ последовательности решения некорректных задач в подсистеме ОПД КА, изучена процедура решения некорректной задачи на основе прямых методов оптимизации (сопряженных градиентов) с использованием априорной информации.

Проанализирована схема решения так называемых обобщенных некорректных задач первого и второго рода с введенными модификациями с учетом представления решения задач в объект-системе «задача НБОинструмент ее решения (АС НБО)». Дополнительно показано использование в подобной схеме обобщенных структурных свойств измерительных задач, в частности понятия «обобщенная наблюдаемость».

В заключении проанализирован ряд практических примеров по определению параметров движения КА. Показано, что результаты определений параметров движения КА на этапе выведения на орбиту демонстрируют возможность обеспечения требуемых точностных характеристик в условиях неполной реализации запланированной схемы контроля орбиты и в условиях штатной схемы контроля орбиты на короткой мерной базе.

- 1. Тюлин А. Е., Бетанов В. В., Кобзарь А. А. Навигационно-баллистического обеспечения полета ракетно-космических средств. Книга 1. Методы, модели и алгоритмы оценивания параметров движения. М.: Радиотехника, 2018. 479 с.
- 2. Тюлин А. Е., Бетанов В. В., Юрасов В. С., Стрельников С. В. Навигационно-баллистического обеспечения полета ракетно-космических средств. Книга 2. Системный анализ НБО. М.: Радиотехника, 2018. 487 с.
- 3. Лысенко Л. Н., Бетанов В. В., Звягин Ф. В. Теоретические основы баллистиконавигационного обеспечения космических полетов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 518 с.

Развитие геоцентрической системы координат Республики Узбекистан

Д. Ш. Фазилова, М. Н. Рахимбердиева, Б. Т. Халимов

АИ АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Широкое применение технологии ГНСС в Республике Узбекистан дало возможность использовать широкий спектр информации о местоположении, которая может быть получена на основе различных видов данных и, следовательно, является привязанной к национальной (СК42) и глобальной (ITRF2014) системам отсчета [1]. К настоящему моменту на большей части территории страны с развитой инфраструктурой построена спутниковая геодезическая сеть (СГС), базирующаяся на ГНССизмерениях, включающая сеть референцных геодезических пунктов, СГС нулевого и первого класса — СГС-0, СГС-1.

В настоящее время ведутся работы по обработке измерений сети и исследования по определению новой геоцентрической системы страны. Одним из вариантов является создание динамической системы координат с заданной моделью деформаций земной коры региона [2]. В работе будут представлены результаты обработки измерений СГС в программном комплексе GAMIT/GLOBK [3].

- 1. О применении и открытом использовании на территории Республики Узбекистан международных геодезических систем координат. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан. №1022. 26.12.2017. [Электронный ресурс]. URL: http://www.lex.uz/pages/getpage.aspx?lact_id=3481466 (дата обращения 18.08.2021)
- 2. Haasdyk J., Donnelly N., Harrison C., et al. Options for modernizing the geocentric datum of Australia // CEUR Workshop Proceedings. 2014. Vol. 1142. P. 72–85.
- 3. Herring T. A., King R. W., Floyd M., McClusky S. C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology, 2018. [Электронный ресурс]. URL: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf (дата обращения: 12.03.2021).

Квантовый нивелир и сеть «Квантовый футшток». Возможности и проблемы реализации

В. Ф. Фатеев

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

В 2015 г. на Пражской конференции IAG была принята специальная резолюция «Обопределении и реализации международной системы отсчета высот» (IHRS). Согласно этой резолюции за опорную поверхность при определении высоты следует принять эквипотенциальную поверхность геоида и высоту любой точки на Земле отсчитывать относительно нее.

В новой системе определения высот измеряемой физической величиной является разность гравитационных потенциалов. Согласно общей теории относительности, физическими эффектами, непосредственно связанными с разностью гравитационных потенциалов, являются эффекты гравитационного смещения частоты и гравитационного замедления (смещения) времени. Эти эффекты в настоящее время измеряются с помощью высокостабильных стандартов частоты и времени (СЧВ). В свою очередь, разность потенциалов в первом приближении линейно связана с разностью ортометрических высот геоида и исследуемой точки через значение ускорения свободного падения. В системе GGOS установлено требование измерения разности потенциалов с погрешностью на уровне 10^{-2} м²/с². Для достижения такой точности необходимы СЧВ с относительной нестабильностью 10^{-19} . При этом условии разность ортометрических высот точек на поверхности Земли определяется с эквивалентной погрешностью 1 мм.

Комплекс необходимых средств, ДЛЯ измерения разности гравитационных потенциалов И соответствующей разности ортометрических высот включает два разнесенных СЧВ и систему их синхронизации [1]. Такой комплекс можно назвать квантовым нивелиром. По сравнению с классическим нивелиром его погрешность слабо зависит от расстояния между исследуемыми точками, и на нем, в зависимости от возможностей системы синхронизации, можно выполнять глобальные измерения. Синхронизация может выполняться с использованием сигналов ГНСС, РСДБ, а также с помощью ВОЛС.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» созданы два макета квантового нивелира, созданные на основе перебазируемых квантовых водородных часов с нестабильностью 1×10^{-15} и 4×10^{-15} [2]. При этом успешно прошел испытания новый метод синхронизации, который назван «методом

релятивистской синхронизации» [3]. Он основан на непрерывном вычислении релятивистских эффектов вдоль трассы движения, которое получают по результатам измерений текущих координат и скорости движения перевозимых квантовых часов с помощью приёмников ГЛОНАСС/GPS и последующей их компенсации. Ожидаемая погрешность метода при погрешностях современной навигационной аппаратуры потребителя ГНСС — единицы-десятки пикосекунд.

Кроме измерения разности ортометрических высот квантовый нивелир открывает ряд других возможностей:

- 1. Повышение точности транспортирования ШВ с помощью мобильных СЧВ. Метод экспериментально подтвержден при перемещении СЧВ на трассе «Москва Иркутск».
 - 2. Измерение уклонения отвесной линии.
- 3. Создание распределенной сети квантовых нивелиров для непрерывного мониторинга разности ортометрических высот (геопотенциальных чисел) между удаленными точками. Схема такой системы мониторинга включает в себя Центральный СЧВ, региональные СЧВ, мобильные СЧВ и различные системы синхронизации между ними. Центральный СЧВ с наивысшей стабильностью предлагается назвать «Квантовый футшток», по аналогии с Кронштадтским футштоком в системе классических нивелиров. Относительно Квантового футштока ведется отсчет изменений ортометрических высот во всей сети квантовых нивелиров. В системе GGOS по подобной схеме предполагается создавать Международную систему отсчета высот IHRF.

Рассмотрены различные схемы и проблемы реализации квантовых нивелиров и элементов сети Квантовый футшток, предъявлены требования к характеристикам СЧВ и распределенной сети их взаимных радио- и оптических измерений.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рам-ках научного проекта номер 19-29-11023.

- 1. Фатеев В. Ф. Жариков А. И., Сысоев В. П. и др. Об измерении разности гравитационных потенциалов Земли с помощью перевозимых квантовых часов // ДАН. 2017. Т. 472, № 2.
- 2. Фатеев В. Ф., Рыбаков Е. А. Экспериментальная проверка квантового нивелира на мобильных квантовых часах // ДАН. Физика, технические науки. 2021. Т. 496, № 1. С. 41-44.
- 3. Фатеев В. Ф., Рыбаков Е. А., Смирнов Ф. Р. Метод релятивистской синхронизации мобильных атомных часов и его экспериментальная проверка // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, № 10. С. 3-11.

Метод повышения детальности гравиметрических карт

В. Ф. Фатеев, Д. С. Бобров

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

Выполнение наземных высокоточных измерений значений ускорения свободного падения (УСП) при помощи гравиметров обычно сопряжено с большими затратами времени и сил, необходимых для получения качественных гравиметрических измерений и измерений по их координатной привязке. Поэтому при проектировании таких гравиметрических съемок выбирают минимально необходимое количество измерительных точек для решения поставленной задачи. В случае необходимости получить значение УСП в некоторую промежуточную точку, не совпадающую с измеренными, выполняют простое интерполирование.

Предлагается усовершенствованный метод интерполяции значений УСП в промежуточные точки за счет дополнительного учета данных о рельефе окружающей местности и значений плотности пород, слагающих рельеф [1]. Метод также применим для повышения детальности существующих гравиметрических карт.

Литература

1. Бобров Д. С. Разработка методов и средств создания навигационных гравитационных карт: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, пос. Менделеево, 2020.

Гравитационная система навигации на поверхности Земли и Луны

В. Ф. Фатеев¹, Д. С. Бобров¹, Р. А. Давлатов^{1,2}, В. П. Лопатин¹, М. М. Мурзабеков¹, Ю. В. Гостев¹, П. Г. Харламов¹, Ю. В. Москвитин¹, Д. С. Олейников¹

¹ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия ²МИИГАиК, г. Москва, Россия

Существующие навигационные системы не в полной мере отвечают требованиям точности, глобальности, скрытности и помехозащищенности при навигации под водой и других сложных условиях. Указанные недостатки могут быть исключены путем коррекции бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) с использованием текущей информации об аномальном гравитационном и магнитном полях.

Для отработки гравимагнитной системы навигации во ФГУП «ВНИ-ИФТРИ» разработан наземный макет. В состав макета входят БИНС, высокоточный относительный гравиметр, гравитационный градиентометр, магнитометр, магнитный градиентометр и спецвычислитель. В работе представлены результаты испытаний макета на территории Московской области.

С учетом проведенных исследований выполнено моделирование системы автономной навигации подвижного ровера на поверхности Луны. В состав измерительных средств гравиметрической системы навигации входят БИНС, высокоточный относительный гравиметр, гравитационный градиентометр и спецвычислитель. Создание такой системы предполагает решение двух проблем: подготовка карт гравитационного поля Луны и создание бортовых гравиметрических датчиков требуемой точности.

Важнейшая особенность налунной гравиметрической системы навигации заключается в том, что величина аномалии гравитационных градиентов на поверхности Луны примерно на порядок выше, чем на поверхности Земли.

По результатам моделирования определены ожидаемые точности навигации, а также требуемые интервалы коррекции БИНС.

Применение эволюционной оптимизации в работе алгоритмов предупреждения столкновения воздушных судов в воздухе

В. В. Худошин¹, Н. В. Иванцевич^{1,2}

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

Работа алгоритмов системы предупреждения столкновения воздушных судов второго поколения в определенной воздушной обстановке может приводить к выдаче экипажу нецелесообразной рекомендации выхода на манёвр [1].

Для выдачи более точных и правильных рекомендаций была проведена модернизация алгоритмов работы системы с применением нейронной сети, отрегулированной на тестовых наборах данных [2]. С помощью настроенной нейронной сети исследуемая воздушная обстановка оценивалась значительно лучше. Анализ полученных результатов выявил дальнейший способ повышения уровня разрешения исследуемой конфликтной ситуации в воздухе путем применения эволюционных алгоритмов в процессе настройки работы нейронной сети: тестирования нейронной сети с целью улучшения ее архитектуры и уточнения весов нейронных связей [3, 4]. В ряде случаев рассматриваемой воздушной обстановки был проведен дальнейший сравнительный анализ результатов работы модернизированной нейронной сети по вышеописанному методу с результатами предыдущей модернизации. Подтверждено, что в процессе второго этапа модернизации получена улучшенная конфигурация нейронной сети, позволяющая повысить точность необходимых рекомендаций.

- 1. RTCA DO-337. Recommendations for future collision avoidance systems. Washington: RTCA, 2012. 44 p.
- 2. Худошин В. В. Исследование работы алгоритмов предупреждения столкновений при полёте двух воздушных судов в одном направлении с медленным горизонтальным сближением // РИ-2020. Материалы конференции ч.1. СПб.: СПОИСУ, 2020. С. 361–362.
- 3. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. М.: ДМК Пресс, 2020. С. 1002.
- 4. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы. М.: Телеком, 2006. С. 452.

Метод повышения точности определения орбит спутников глобальных навигационных систем в базисе нейросетевого моделирования

Е. Н. Цыба¹, О. А. Волкова², С. С. Панарин³, С. Л. Пасынок¹

¹ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия Менделеево ²ООО «Мосинжиниринг Групп», г. Москва, Россия ³ООО «Горка Инжиниринг», г. Москва, Россия

ГНСС с каждым годом играют все более важную роль в экономике, обществе, науке и обороноспособности страны. Многие решаемые с помощью ГНСС задачи, например точное позиционирование, оперативное определение ПВЗ, прогноз погоды и т. д., требуют наличия высокоточных спутниковых орбит. В настоящий момент потребители могут воспользоваться сверхбыстрыми орбитами IGS для решения задач в реальном и почти реальном времени. К сожалению, точность сверхбыстрых орбит ограничена — 5–10 см [1], что может являться препятствием в достижении поставленных целей.

Задача определения точных орбит относится к классу плохо формализованных. В работе представлен метод повышения точности сверхбыстрых орбит, в основе которого лежит идея постепенной формализации и методы глубокого обучения [2]. Нейронные сети глубокого обучения выбраны как эффективный инструмент решения задач подобного рода.

Разработанный метод позволил улучшить точность определения орбит КА ГНСС на 27–49 % (зависит от типа КА ГНСС). С 2019 г. по настоящее время предложенный подход используется в ООО «Мосинжиниринг Групп» и ООО «Горка Инжиниринг» при решении задач геодезии, геологии и геофизики методами спутниковой геодезии.

- 1. IGS products. [Электронный ресурс]. URL: https://www.igs.org/products/ (дата обращения: 19.07.2021).
- 2. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с.

Оптический стандарт частоты на одиночном ионе иттербия

С. В. Чепуров, Н. А. Павлов, А. А. Луговой, С. Н. Багаев, А. В. Тайченачев

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В работе представлены текущие результаты исследований по созданию оптического стандарта частоты на основе квадрупольного перехода одиночного иона иттербия-171.

Захват и удержание иона осуществляется с помощью миниатюрной радиочастотной ловушки с торцевыми электродами. Лазерное охлаждение иона и детектирование его состояния реализуется на квазициклическом дипольном переходе с длиной волны 370 нм [1]. Для возбуждения квадрупольного перехода используется узкополосный зондирующий лазер (436 нм). Подготовка и опрос энергетических состояний иона производится с помощью специально подобранной последовательности лазерных импульсов. Детектированный спектр возбуждения квадрупольного перехода состоит из нескольких резонансов, которые содержат информацию о состоянии иона, его движении в ловушке и взаимодействии с окружающей средой. Спектральная ширина зарегистрированного резонанса на центральной частоте перехода составляет 30 Гц [2].

Осуществлена одновременная стабилизация частоты зондирующего лазера по резонансу опорного эталона Фабри-Перо и частоте центрального резонанса квадрупольного перехода иона иттербия.

Для характеризации частотных свойств $^{171}{\rm Yb}^+$ стандарта была измерена нестабильность частоты сигнала биений частоты зондирующего лазера на длине волны 871 нм и компоненты спектра фемтосекундного генератора, стабилизированного по частоте ${\rm YbYAG/I_2}$ стандарта. Измеренное значение параметра Аллана для сигнала биений составляет $\sim 3 \times 10^{-15}$ при времени интегрирования 10^3 с.

В соответствии с оценкой, проведенной на основе экспериментально полученных спектральных характеристик зондирующего лазера и оптического репера, суточная нестабильность 171 Yb $^+$ стандарта составляет порядка 10^{-17} .

- 1. Chepurov S. V., Lugovoy A. A., Kuznetsov S. N. Laser system for Doppler cooling of ytterbium ion in an optical frequency standard // Quantum Electronics. 2014. Vol. 44, no. 6. P. 527.
- 2. Chepurov S.V. Lugovoy A. A., Prudnikov O. N., et al. Spectroscopy of the quadrupole clock transition of ytterbium-171 ions for optical frequency standard development // Quantum Electronics. 2019. Vol. 49, no. 5. P. 412.

Охлаждаемый сверхширокополосный квадратурный направленный ответвитель

В. С. Черников, Е. Ю. Хвостов, В. К. Чернов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Один из способов формирования радиоволны с круговыми поляризациями — возбуждение перпендикулярных друг другу излучателей с линейной поляризацией в квадратуре. Подобная структура позволяет формировать сигналы с правой и левой круговой поляризациями одновременно с единым фазовым центром облучателя. Важным элементом систем, работающих по данному принципу, является квадратурный направленный ответвитель.

В работе представлены результаты разработки сверхширокополосного квадратурного направленного ответвителя с рабочей полосой 2—18 ГГц и возможностью охлаждения до температуры жидкого водорода для уменьшения потерь в диэлектрике. Для устранения негативных эффектов теплового сжатия была применена специальная форма корпуса. Также был выбран материал со значениями коэффициентов температурного расширения близкими по всем направлениям и сопоставимыми со значением данного параметра для меди. С помощью электродинамической модели была определена топология устройства и толщины диэлектрических слоев. В работе приведены результаты измерений характеристик направленного ответвителя при температурах 300 К и 10 К.

Оценка влияния светового давления на определение орбиты навигационных спутников ГЛОНАСС

И. Н. Чувашов

НИ ТГУ, г. Томск, Россия

В данной работе сравниваются три вида модели силы светового давления для навигационных спутников ГЛОНАСС на 5-летнем интервале времени.

- 1. Рекомендованная IERS Standards 1992 эмпирическая модель для навигационных спутников GPS (T20 и T30), полученная из усреднения коэффициентов модели Г30 для навигационных спутников ГЛОНАСС [3].
- 2. Высокоточные модели для навигационных спутников ГЛОНАСС (Г30П), полученные на основе работ Гаязова И. С. [4].
- 3. Высокоточная модель для навигационных спутников ГЛОНАСС с учетом эффективной поверхности объекта.

Как было продемонстрировано в работе [2], предложенные высокоточные модели светового давления (п. 2 и 3) показали свою эффективность (СКО не превышала 10 см на двух оборотах спутника). Однако за последние пять лет появились дополнительные наблюдения навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS, в которых точность самих наблюдений выше используемых в работе [2]. Следовательно, представляет интерес определение уточняющих коэффициентов для высокоточных моделей силы светового давления на новых интервалах времени и проведение дополнительного анализа по изменению их с течением времени.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

- 1. Rodriguez-Solano C. J., Hugentobler U., Steigenberger P. Impact of Earth radiation pressure on GPS position estimates // Advances in Space Research. 2012. Vol. 49. P. 1113–1128.
- 2. Александрова А. Г., Чувашов И. Н. Выбор эффективной модели силы светового давления для спутников ГЛОНАСС // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. С. 117-122.
- 3. Гаязов И. С. Использование высокоточных наблюдений геодезических и навигационных ИСЗ для решения задач геодинамики: диссертация на соискание степени доктора физ.-мат. наук. ИПА РАН, Санкт-Петербург, 2005. 217 с.
 - 4. IERS Standarts. IERS Technical Note. Paris: Central Bureau of IERS, 1992. 150 p.

Методы синтеза полосы частот при постпроцессорной обработке на корреляторе RASFX РСДБ-наблюдений, проведенных на РТ-32

В. А. Шантырь, А. С. Кумейко, И. Ф. Суркис, А. Е. Мельников

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

С целью определения поправок Всемирного времени UT1-UTC в ИПА РАН на радиотелескопах РТ-32 непрерывно проводятся РСДБ-наблюдения, результаты которых обрабатываются с помощью различного программного обеспечения. Коррелятор АРК [1] являлся основным средством обработки до 2020 г. включительно, новый разработанный в ИПА РАН программный коррелятор RASFX [2] применяется с 2020 г., используется также разработанный в Австралии коррелятор DiFX [3] с пакетом постпроцессорной обработки РІМА [4].

Алгоритмы синтеза частотных каналов, реализованные в трех корреляторах, отличаются методами фазовой калибровки. В корреляторе АРК калибровка выполняется по сигналам фазовой калибровки, в пакете РІМА — по опорным сканам наблюдений. В постпроцессорном обеспечении коррелятора RASFX реализованы оба метода калибровки.

В работе описаны применяемые алгоритмы синтезирования, проведено сравнение результатов обработки корреляторами APK, RASFX и DiFX. Показано, что результаты корреляционной обработки во всех трех случаях близки и существующее различие обусловлено в первую очередь применяемыми методами фазовой калибровки частотных каналов.

- 1. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Аппаратно-программное обеспечение коррелятора АРК // Труды ИПА РАН. 2009. Вып. 20. С. 223–230.
- 2. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 6. С. 1–9.
- 3. 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.
- 4. VLBI processing software PIMA [Электронный ресурс]. URL: http://astrogeo.org/pima/ (accessed: 08.08.2021).

Параметры эфемериды Луны ЕРМ2021

Э. И. Ягудина, М. О. Кан

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В работе получены новые параметры эфемериды Луны EPM2021, которая является частью эфемерид EPM (Ephemerides of planets and Moon) [1], разработанных в ИПА РАН. Для получения новой версии эфемериды Луны EPM2021 было использовано 30357 высокоточных лазерных наблюдений Луны (LLR normal points) со станций: McDonald/MLRS1/MLRS2, Cerga, Apache, Matera, Wettzell на интервале 1970–2021 гг.

Модель орбитально-вращательного движения Луны реализована в программном комплексе ERA 8 как часть модели движения тел Солнечной системы [2]. Количество определяемых параметров эфемериды Луны EPM2021 — около 100, включая координаты рефлекторов на Луне, координаты наблюдательных станций и сдвиги: поправки на различных станциях, вызванные изменением положения наземного дальномера (лазера), и другие параметры. Полученные параметры эфемериды сравнивались с параметрами предыдущей версии [3] и с параметрами французской эфемериды INPOP2019a [4]. Рассматриваются дальнейшие шаги по увеличению точности параметров эфемериды Луны.

- 1. Pavlov D., Skripnichenko V. Rework of the ERA software system: ERA-8 // Proceedings of the Journées "Systèmes de Référence Spatio-Temporels". 2014. P. 243–246.
- 2. Pavlov D. A., Williams J. G., Suvorkin V. V. Determining parameters of Moon's orbital and rotational motion from LLR observations using GRAIL and IERS-recommended models // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2016. Vol. 126, no. 1–3. P. 61–88.
- 3. Павлов Д. А., Ягудина Э. И. Анализ уточненной лунной части эфемерид ЕРМ. // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 43. Р. 106–112.
- 4. Fienga A., Deram P. Viswanathan V., et all. INPOP19a planetary ephemerides // Notes scientifiques et techniques de l'Institut de mécanique céleste. Paris: Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides, 2019. P. 1–35.

Методика расчета допустимого шага дискретизации цифровой модели рельефа в зависимости от степени пересечённости местности

А. И. Яковлев, В. Ф. Алексеев, Д. О. Медянников, К. К. Жбанов

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

Для решения прикладных задач функция высот рельефа H(x,y) задаётся дискретно в узлах регулярной сетки с некоторым шагом $\Delta x \times \Delta y$. Очевидно, что чем меньше шаг $\Delta x \times \Delta y$, тем подробнее описывается функция рельефа. Вместе с тем, использование цифровых моделей рельефа в различных программных продуктах накладывает ограничения на объём информационных и вычислительных ресурсов, которые могут быть выделены на хранение и обработку модели. Поэтому необходимо рассчитать допустимый шаг дискретизации модели, при котором рельеф будет описан с требуемой точностью при минимально возможном количестве элементарных площадок $\Delta x \times \Delta y$ (для конкретного типа рельефа).

Проблема определения дискретности функции, применительно к картографированию параметров аномального гравитационного поля Земли, решена в работах [1] и [2], в основе которых лежит гипотеза изотропности оцениваемой функции, что применительно к рельефу выполняется крайне редко.

Доклад посвящён получению объективных оценок дискретности функции рельефа, для чего решены 2 задачи:

- 1. Выполнено районирование рельефа по сложности его структуры.
- 2. Оценена допустимая дискретность представления рельефа для различных его типов, с использованием зависимостей, описанных в работах [1] и [2].

- 1. Нейман Ю. М. Расчет проекта дискретизации аномалии силы тяжести в ближней зоне при высокоточных определениях высот квазигеоида и уклонений отвеса // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1993. № 5–6. С. 82–95.
- 2. Алексеев В. Ф. Оперативный мониторинг гравитационного поля Земли в сейсмически опасных и тектонически активных районах: монография. Спб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2009. 106 с.

Опыт эксплуатации распределенного кластерного хранилища vSAN в ИПА РАН

В. А. Яковлев, И. А. Безруков, А. И. Сальников

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Технология виртуальных машин на базе VMware используется в ИПА РАН с 2009 г. [1]. Виртуальные машины применяются как для вторичной обработки данных РСДБ-наблюдений, так и в качестве серверов буферизации в режиме е-РСДБ [2]. По мере развития информационной сети ИПА РАН многие служебные сервисы, такие как почтовый сервер или веб-сервер, были перемещены с физических серверов на виртуальные машины. Возникла необходимость обеспечить бесперебойную работу этих сервисов или минимизировать время простоя в случае отказа оборудования или проведения профилактических работ.

С 2014 г. в ИПА РАН использовались два сервера виртуальных машин на двух географически разнесенных площадках. Однако единой точкой отказа оставалось сетевое файловое хранилище. В 2020 г. было принято решение внедрить технологию распределенного кластерного хранилища vSAN [3] для решения этой проблемы.

На стендовом докладе представлены описание технологии миграции инфраструктуры виртуальных машин на новое хранилище, преимущества и недостатки этой технологии, выводы и практический опыт после года использования vSAN.

- 1. Стэмпковский В. Г., Гаязов И. С. Использование технологии виртуальных машин в центре обработки и анализа данных ИПА РАН // Труды ИПА РАН. 2009. Вып. 20. С. 314–318.
- 2. Сальников А. И., Яковлев В. А., Безруков И. А. Применение технологии виртуальных машин в режиме е-РСДБ на радиоинтерферометрическом комплексе «Квазар-КВО» // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 6. С. 30–34.
- 3. VMware vSAN Documentation [Электронный ресурс]. URL: https://docs.vmware.com/en/VMware-vSAN/index.html (дата обращения: 10.08.2021).