

Расширенная схема прогнозирования частотно-временных поправок с использованием неравноточных данных

© А. В. Сальцберг, К. Г. Шупен

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Основная задача частотно-временного обеспечения ГНСС – прогнозирование расхождения шкал времени и расчет частотно-временных поправок к бортовой шкале времени космического аппарата.

В работе рассмотрена расширенная схема прогнозирования (РСП), позволяющая повысить точность среднесрочного прогноза частотно-временных поправок (ЧВП), под которым в контексте данной работы понимаются интервалы прогнозирования от 1 до 12 ч. Представлена последовательность сопоставления и анализа данных о ЧВП КА от различных источников, рассмотрена методика исключения различия в системных шкалах времени, в том числе через передаваемый сегмент ГНСС. Предложена РСП с использованием неравноточных данных из разных источников, определены ее ключевые элементы и ограничения. Представлены результаты использования такого подхода к улучшению среднесрочного прогноза ЧВП.

РСП основана на использовании всей доступной информации о текущем значении расхождения бортовой шкалы времени КА от различных источников, осуществляющих обработку измерений ГНСС: данные ГНСС, информация систем функциональных дополнений, высокоточные системы реального времени. РСП может быть рассмотрена как эффективное средство решения проблемы недостатка данных.

Ключевые слова: ГНСС, бортовые стандарты частоты, шкалы времени, фильтр Калмана, частотно-временные поправки, прогнозирование.

Контакты: Шупен Ксения Григорьевна (k.shupen@irt.ru).

Статья поступила в редакцию 10.12.2019, принята к публикации 29.01.2020, опубликована 12.05.2020.

Для цитирования: Сальцберг А. В., Шупен К. Г. Расширенная схема прогнозирования частотно-временных поправок с использованием неравноточных данных // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 51–56.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.52.51-56>

Extended Scheme of Satellite Clock Time Offset Prediction Using the Unequal Accuracy Data

A. V. Saltsberg, K. G. Shupen

Russian Institute of Radionavigation and Time, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The primary goal of the time/frequency support of GNSS is calculating and predicting the satellite clock time offset (SCTO) for an onboard time scale of a space vehicle.

The accuracy of predicting SCTO depends crucially on the following: the term of the prediction and the selection of observation interval, reliable calculation of onboard frequency standard parameters and the mathematical model selected for the time offset prediction. These factors should be considered for optimizing the strategy of SCTO prediction and, as a result, for increasing the accuracy of GNSS time/frequency support. A sequence of comparing and analyzing data on the space vehicle SCTO from various sources is presented, a technique for eliminating differences in system time scales, including that through the transmitted GNSS segment, is considered. An extended prediction scheme using unequal data from different sources is proposed, the key elements and limitations of the scheme are determined. The results of using this approach to improve the medium-term prediction of SCTO are presented.

The extended prediction scheme is based on the use of all accessible information on the current values of SCTO provided by different sources carrying out GNSS measurements processing: GNSS data, the information from functional additions systems, highly-precision real time systems. The scheme suggested can be considered an effective means for data deficiency problem solution.

Keywords: GNSS, onboard frequency standards, time scales, Kalman filter, satellite clock time offset, prediction.

Contacts: Ksenia Shupen (k.shupen@irt.ru).

Received December 10, 2019, accepted January 29, 2020, published May 12, 2020.

For citation: Saltsberg A. V., Shupen K. G. Extended scheme of satellite clock time offset prediction using the unequal accuracy data // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 52. P. 51–56.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.52.51-56>

Введение

Точность навигационно-временных определений потребителя ГНСС определяется эквивалентной погрешностью псевдодалности за счет космического сегмента, которая представляет собой сумму вкладов погрешностей прогнозирования эфемерид КА и частотно-временных поправок (ЧВП) к бортовой шкале времени (БШВ) КА. БШВ КА ГНСС формируется по сигналам высокостабильных стандартов частоты, являющихся основным элементом бортовых часов. Основной характеристикой бортовых часов является нестабильность частоты, обусловленная физической природой процессов, лежащих в основе формирования высокостабильной частоты.

Непрогнозируемый уход БШВ КА, обусловленный нестабильностью частоты бортовых часов, – один из основных факторов ограничения точности расчета прогнозируемых значений ЧВП. Однако непрогнозируемый уход БШВ КА может быть парирован путем сокращения времени прогноза при условии регулярного обновления исходных данных о текущем значении расхождения БШВ КА относительно шкалы системного времени ГНСС.

РСР – способ улучшения среднесрочного прогноза бортовых часов, основанный на привлечении дополнительной высокоточной информации от альтернативных источников (систем функциональных дополнений, ассистирующих систем реального времени). Ограничивающим фактором предлагаемой схемы является наличие задержки поступления дополнительных данных и доступная периодичность обновления информации.

Расширенная схема прогнозирования

Основные этапы РСР на основе фильтра Калмана

РСР объединяет в единый вычислительный процесс оценивание компонент фильтра Калмана (ФК) и расчет прогнозируемых значений ЧВП для динамически изменяющегося состава входных данных.

РСР включает следующие этапы:

- подготовка и согласование входных данных от различных источников;
- выбор модели ухода БШВ КА;
- формулировка модели в матричном виде для ФК;
- инициализация и настройка основных матриц ФК;
- переопределение параметров модели ухода БШВ КА отдельных бортовых и наземных часов в начале каждого цикла прогнозирования;
- расчет прогнозных значений ЧВП;
- оценка точности выходных данных.

На рис. 1 представлена модель РСР для возможного применения в частотно-временном обеспечении ГНСС.

Входными данными для модели РСР являются:

1. Источник 1 (ИС1) основной – данные, нуждающиеся в уточнении, в качестве которых принимаются, например прогнозные ЧВП, передаваемые в составе навигационного кадра КА ГНСС, или исходные данные о расхождении БШВ КА (РШВ), использованные для расчета прогнозных ЧВП;

2. Источник 2 (ИС2) дополнительный (альтернативный) – высокоточные данные от различных источников (ИАЦ КВНО, IGS, Систем высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) и др.), например, ultra-rapid РШВ КА или rapid РШВ КА.

При загрузке данных выполняется подготовка данных: контроль форматов, контроль временных интервалов, меток времени и пропусков в измерениях. Далее происходит оценка расхождения опорных шкал времени (ШВ) наборов данных и приведение к единой опорной шкале.

При накоплении необходимого объема данных (до одного месяца) выполняется оценка нестабильности бортовых часов (например, дисперсия Аллана), необходимая для заполнения ковариационной матрицы шума процесса при использовании ФК. Оценка характеристик часов по результатам наблюдений позволяет подстроить ФК под характеристики конкретных часов.

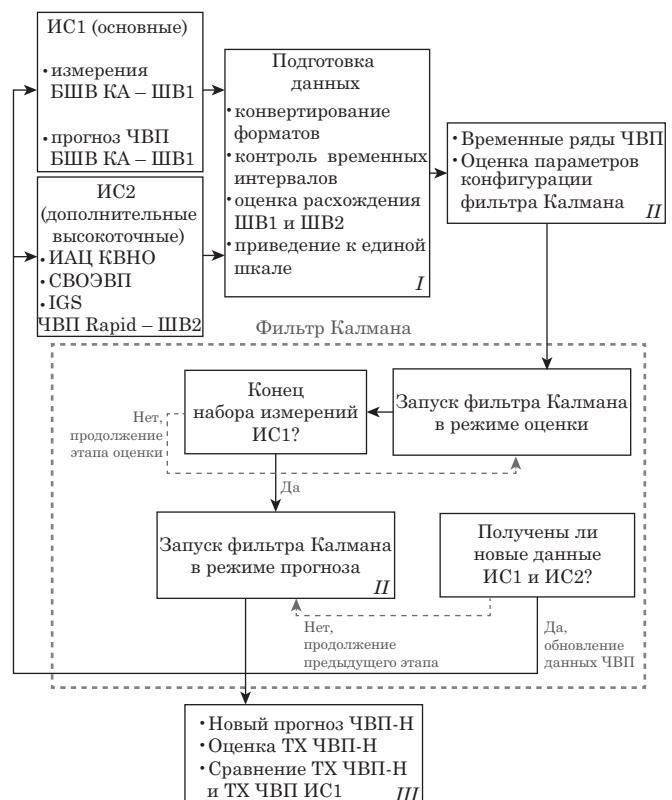


Рис. 1. Расширенная схема прогнозирования спутниковых часов ГНСС

Уровни измерительных шумов оцениваются непосредственно по данным наборов ИС1 и ИС2.

Сформированные временные ряды ЧВП и параметры конфигурации ФК, настроенные в соответствии с исходными данными, передаются в тело цикла. Запускается ФК в режиме оценки (сглаживания). По окончании набора измерений ИС1 запускается режим прогноза, который выполняется вплоть до поступления новых измерений из ИС1 или ИС2. Если данные поступили, то вся вычислительная процедура выполняется сначала.

Длительность интервала прогнозирования, то есть временной интервал между последней полученной оценкой ЧВП и прогнозом, может варьироваться.

Выходными данными системы являются новые прогнозные значения ЧВП (ЧВП-Н) и оценки их точностных характеристик. Также на выходе выполняется сравнение точностных характеристик ЧВП-Н и точностных характеристик ЧВП, полученных из ИС1 (ЧВП ИС1).

Эффективность РСП критическим образом зависит от корректной реализации основных ключевых элементов, обозначенных на рис. 1 римскими цифрами и далее рассмотренных подробно.

Ключевой элемент I

Ключевой элемент I (рис. 1) обеспечивает согласование данных о РШВ от различных источников. Имея в виду, что данные ИС1 и ИС2 получены в общем случае в различных центрах обработки и, возможно, по различным технологиям, при их совместном использовании нужно контролировать наличие корреляционной зависимости ЧВП КА и эфемерид КА, а также выполнять согласование данных о РШВ КА от ИС1 и ИС2 с целью либо подтвердить, что опорные шкалы ШВ1 и ШВ2 совпадают, либо извлечь из данных ИС1 и ИС2 параметры расхождения опорных шкал ШВ1 и ШВ2.

Согласование данных выполняется в рамках нижеописанной пошаговой программы.

Шаг 1 – взятие разностей значений ЧВП по каждому КА и получение невязок на момент времени t :

$$\text{ЧВП ИС1}_{\text{КА}}(t) - \text{ЧВП ИС2}_{\text{КА}}(t) = \Delta_{\text{сист}} + (\text{ШВ1}(t) - \text{ШВ2}(t)).$$

Ненулевые значения невязок по каждому КА характеризуют:

1. Наличие постоянного систематического смещения между ЧВП каждого КА в наборах данных ИС1 и ИС2, обусловленного в первую очередь различием в калибровочных задержках по КА суммарно в передающем тракте КА и приемном тракте опорного измерительного средства;

2. Несовпадение опорных ШВ1 и ШВ2;

3. Различие в технологиях перехода от ШВ1 и ШВ2 к ШВС ГНСС через «передаваемую» ШВ

системы (ШВС) ГНСС, если такое преобразование выполнялось для ЧВП ИС1 или для ЧВП ИС2.

Шаг 2 – исключение постоянного систематического смещения по КА (на интервале не менее 4 суток) путем оценивания по методу наименьших квадратов (МНК) параметра $A_0^{\text{КА}}$.

Шаг 3 – посуточная оценка параметров линейного тренда ряда невязок по всем КА (или оценка параметров линейного тренда «средней» невязки) $A_0^{\text{ШВ1-ШВ2}}$, $A_1^{\text{ШВ1-ШВ2}}$ на момент времени t_0 , характеризующего несовпадение опорных шкал ШВ1 и ШВ2 или различие в технологии перехода от ШВ1 и ШВ2 к ШВС ГНСС.

Шаг 4 – преобразование данных ряда ИС2 к значениям ряда ИС1 для каждого КА на момент времени t :

$$\text{ЧВП}^* \text{ИС2}_{\text{КА}}(t) = \text{ЧВП ИС2}_{\text{КА}}(t) + (A_0^{\text{ШВС2-ШВС1}} + A_0^{\text{КА}} + A_1^{\text{ШВС2-ШВС1}} \Delta t)$$

где $\Delta t = t - t_0$.

Таким образом, после согласования данных ИС1 и ИС2 следующим этапом РСП является прогнозирование значений нестационарного временного ряда при наличии собственных шумов стандарта частоты, измерительного шума и систематической ошибки обработки измерений.

Ключевой элемент II

Ключевой элемент II (рис. 1) состоит в формализации модели ухода БШВ КА в матричной форме для ФК, инициализации и настройке элементов ФК для режима прогнозирования. При этом должны быть учтены и включены в модель ухода БШВ КА следующие факторы, наблюдаемые в стандарте частоты и ограничивающие стабильность его частоты: флуктуации частоты, представляющие собой белый шум, случайные блуждания или интегрированный шум случайных блужданий, наличие линейного частотного дрейфа, периодических процессов различной природы, сложных стохастических процессов (частотные и фазовые фликкер-шумы).

Непрогнозируемый уход БШВ КА, обусловленный нестабильностью частоты стандарта частоты, монотонно возрастает со временем. Длительность возможного интервала прогнозирования тесно связана с длительностью интервала наблюдения, на котором статистические свойства шумов временного ряда поддаются корректному описанию и включению их в модель.

Для повышения точности прогнозирования РСП дает возможность использовать следующие средства:

1. *Выбор метода прогнозирования.* Преимущество использования фильтра Калмана по сравнению с МНК для модельных данных показано в работе [1]. Подробное описание алгоритма про-

гнозирования ухода БШВ КА на основе фильтра Калмана изложено в работах [2] и [3]. При прогнозировании ухода БШВ КА по непрерывным дискретным (с шагом 5–15 мин) реальным данным выигрыш от использования ФК по сравнению с МНК составляет от 10 % до 30 %.

2. *Оценка характеристик генераторов.* В работе [4] показано, что достоверная оценка шумовых составляющих и включение разложения дисперсии Аллана по шумам в соответствующие матрицы ФК обеспечивают выигрыш в погрешности прогнозирования 15–20 %.

3. *Выбор модели ухода БШВ КА.* В ГЛОНАСС традиционно используется базовая полиномиальная модель [5]. В GPS используется более полная стандартная модель, построенная на основе линейного стохастического дифференциального уравнения ухода шкалы времени [6]. Современной тенденцией в ГНСС является переход к обобщенной модели, основанной на стандартной модели и включающей дополнительные компоненты, описывающие периодические и фликкер-шумовые процессы, а также параметры согласования опорных шкал времени. В данной работе при реализации РСП использована стандартная модель.

4. *Выбор интервала наблюдения.* Оптимальная длительность интервала наблюдения оценена по моделированным и реальным данным (СВОЭВП [7] на интервале 1.03.2016–31.05.2016). При наличии непрерывных данных оптимальным является соотношение «наблюдение/прогноз = 2/1» [1]. В реальных условиях в зависимости от процента «утерянных» данных оптимальность данного соотношения не сохраняется. На рис. 2 представлен расчетный коэффициент проигрыша в точности прогнозирования БШВ КА при различных соотношениях длительности интервалов наблюдения и прогнозирования в случае потери около 75 % данных, что соответствует зонам радиовидимости условной сети «РФ + Антарктида + экваториальная зона» и ограничениям по числу каналов приемников.

Данный график позволяет сделать следующие выводы:

1. Оптимальное соотношение «наблюдение/прогноз = 2/1» при потере информации не сохраняется, и точность прогнозирования ухудшается в 1.3–1.5 раза.

2. Поддержание точности прогнозирования на уровне 90 % от минимально достижимой и выше при потере информации достигается за счет увеличения длительности интервала наблюдения в соответствии с табл. 1.

3. Наименее чувствительны к потере информации интервалы времени свыше 6 ч, так как на этих интервалах превалирует вклад непрогнозируемого ухода БШВ за счет нестабильности генератора.

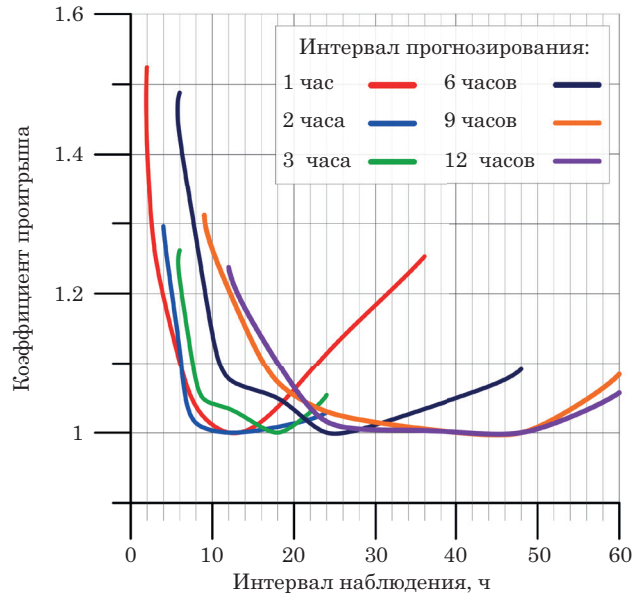


Рис. 2. Коэффициент проигрыша в точности прогнозирования для данных, прореженных в соответствии с зонами радиовидимости (разрывы $\approx 75\%$), при различных интервалах наблюдения и прогноза

Таблица 1

Ухудшение точности прогнозирования для данных, прореженных в соответствии с зонами радиовидимости, при различных интервалах наблюдения и прогноза

Прогноз, ч	Ухудшение точности	Наблюдение/прогноз	Ухудшение точности	Наблюдение/прогноз	Ухудшение точности	Наблюдение/прогноз
1	10 %	6	5 %	7	минимальное	10–14
2		3		4		5–7
3		2.5		3–4		6
6		≈ 2		3		≈ 4
9		≈ 2		≈ 2		≈ 4
12		≈ 2		≈ 2		≈ 4

При частичном отсутствии информации для интервалов прогнозирования менее 6 ч не обнаруживается устойчивой связи между погрешностью прогнозирования и соотношением длительности интервала наблюдения и прогноза. Основное значение приобретает распределение измерений внутри интервала наблюдения. Поэтому необходимо максимально заполнить интервал наблюдения доступными измерениями, что достигается использованием РСП.

Ключевой элемент III

Оценка точности прогнозирования ЧВП-Н выполняется путем сравнения с потенциально достижимым порогом точности прогнозирования.

Потенциально достижимый порог точности прогнозирования при идеальной модели часов оценивается на основе расчета параметра TDev ($\sigma_x(\tau)$). TDev определяется как квадратный корень из временной дисперсии TVar ($\sigma_x^2(\tau)$), представляющей собой меру временной стабильности и основанной на модифицированной дисперсии Аллана ($Mod\sigma_y^2(\tau)$) [8]:

$$\sigma_x^2(\tau) = \frac{\tau^2}{3} \text{Mod} \sigma_y^2(\tau).$$

Предельно достижимый уровень погрешности прогнозирования при идеальной модели часов может быть оценен по финальным апостериорным данным ИАЦ КВНО, СВОЭВП, международной службы IGS. Для примера на рис. 3 представлены результаты оценивания TDev по реальным финальным данным ИАЦ КВНО (STA) [9] и показан условный порог 1 нс.

Построение алгоритма прогнозирования на основе ФК с настройкой элементов и подстройкой ковариационной матрицы шума процесса в соответствии с характеристиками конкретного стандарта частоты позволяет получить прогноз ЧВП к БШВ КА близкий к оптимальному (рис. 4). Экспериментальная проверка выполнена по финальным данным ИАЦ КВНО. Экспериментальные оценки погрешности прогнозирования БШВ КА относительно сглаженных исходных значений РШВ КА показывают превышения заданного порога 1 нс (пунктирная линия на графиках рис. 4): на 1 ч – нет превышения; на 3 ч – 3 КА, на 6 ч – 11 КА; на 12 ч – 17 КА. Таким образом, результаты экспериментальной проверки совпадают с априорными оценками потенциального порога для различных интервалов прогнозирования.

Экспериментальная проверка достижимости потенциального порога погрешности прогнозирования (рис. 4) показывает совпадение, близкое к идеальному, поскольку выполнена относительно сглаженных значений РШВ, что является некоторым допущением. В действительности должен

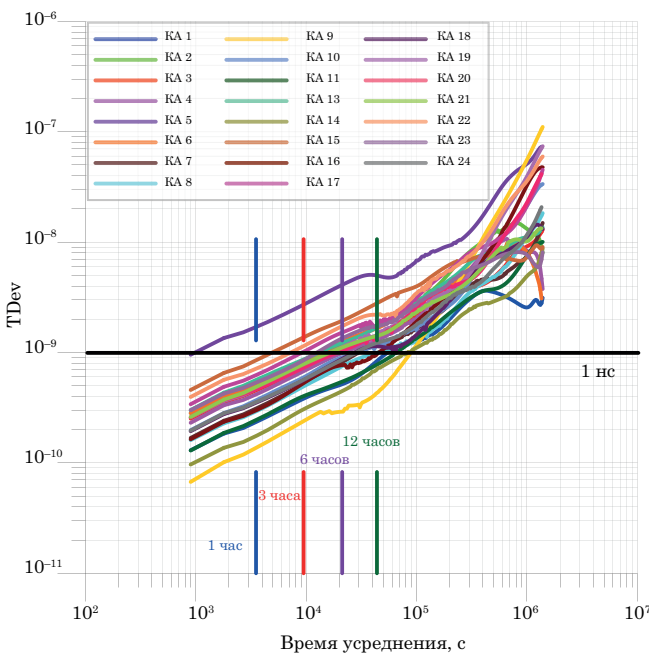


Рис. 3. Оценка потенциально достижимой погрешности прогнозирования ЧВП КА ГЛОНАСС за период 01.12.2017–18.01.2018 по финальным данным ИАЦ КВНО (STA)

быть предусмотрен запас на методическую погрешность прогнозирования, обусловленную выбранным методом.

Эмпирически подтвержденные значения методической погрешности прогнозирования с использованием ФК с соответствующей подстройкой матриц составляют 0.2–0.4 нс (СКО). Иллюстрация по КА ГЛОНАСС № 17, 11 и 16 на интервале 10.11.2017–28.11.2017 по данным СВОЭВП [7] показана на рис. 5 (потенциальный порог TDev обозначен пунктирной линией, а экспериментальная погрешность прогнозирования, представляющая собой сумму TDev и методической погрешности ФК, – сплошной линией).

Характер зависимости экспериментальной погрешности прогнозирования (сплошная линия) и потенциального порога (пунктирная линия) от длительности интервала прогнозирования совпадает, при этом прослеживается наличие постоянного смещения экспериментальной кривой, обусловленное наличием методической погрешности.

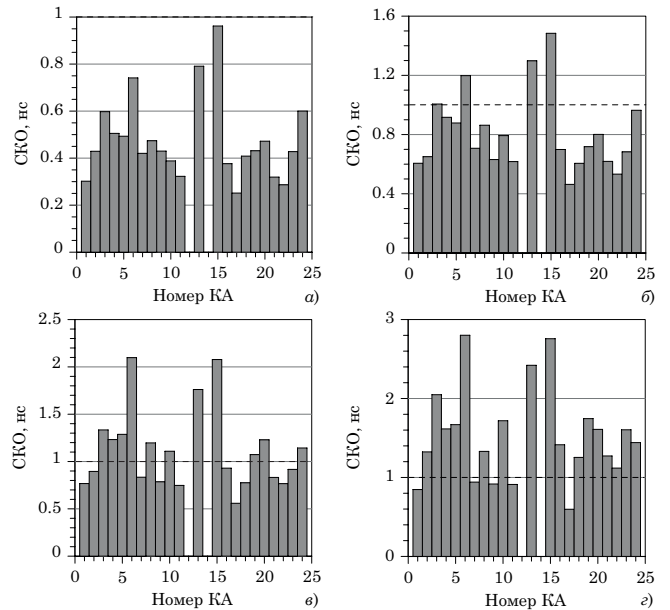


Рис. 4. Экспериментальная погрешность прогнозирования ЧВП к БШВ КА ГЛОНАСС по данным ИАЦ КВНО на основе ФК на интервале 20.08.2017–29.08.2017 для интервалов прогнозирования: а – 1 ч, б – 3 ч, в – 6 ч, з – 12 ч

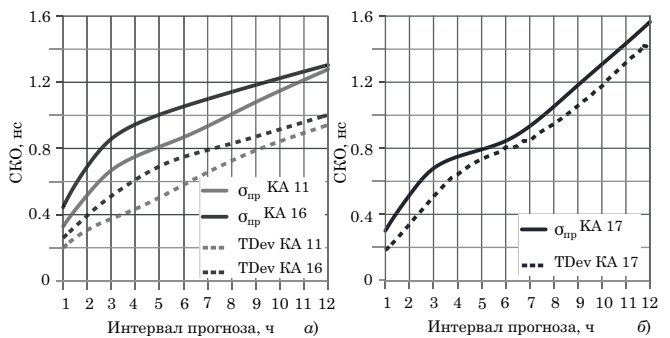


Рис. 5. Сравнение экспериментальной погрешности прогнозирования ($\sigma_{пр}$) ЧВП КА на основе ФК и потенциального порога (TDev) по данным РМК (СВОЭВП) для: а – КА 11, КА 16 ГЛОНАСС; б – КА 17 ГЛОНАСС

Практическая реализация РСП

На рис. 6 представлены результаты улучшения среднесрочного прогноза ЧВП при использовании РСП с учетом подстройки ФК.

Экспериментальные оценки выполнены для случая условной сети «РФ + Антарктида + экваториальная зона» с возможностью получения высокоточных данных ИС2 с задержкой 3 ч. Оценки выполнены для различных комбинаций длительности наблюдения и прогноза. В качестве эталонных данных для оценки точности прогнозирования использовались финальные данные ИАЦ КВНО [9].

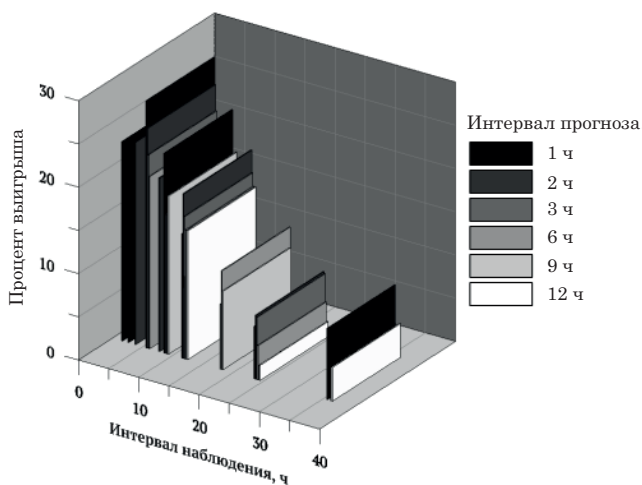


Рис. 6. Повышение среднесрочного прогноза ЧВП при использовании РСП для условной сети «РФ + Антарктида + экваториальная зона» (разрывы $\approx 75\%$) на интервале 1.03.2016–31.05.16 по данным ИАЦ КВНО

В зависимости от соотношения между интервалами прогноза и наблюдения выигрыш при использовании РСП может составлять до 30 % при прогнозировании на интервалы 1–3 ч и до 10 % на интервалах 6 ч и более.

Заключение

Точность прогнозирования ЧВП критическим образом зависит от ряда факторов: от длительности интервала прогнозирования и выбора оптимальной длительности интервала наблюдения, достоверного определения характеристик генераторов и выбора математической модели ухода ШВ. Корректный учет данных факторов позволяет оптимизировать стратегию прогнозирования ЧВП с целью повышения точности частотно-временного обеспечения в ГНСС. В данной работе предложены варианты парирования данных факторов.

Исследован вопрос выбора оптимального соотношения длительности интервала прогнозирования и наблюдения в условиях потери данных.

Представлен потенциально достижимый порог точности прогнозирования ЧВП к БШВ КА системы ГЛОНАСС. Оценена методическая погрешность реализации ФК с учетом подстройки под характеристики конкретного генератора КА.

В качестве проблемы решения недостатка данных для построения среднесрочного прогноза ЧВП к БШВ КА предложена РСП с использованием дополнительных высокоточных данных, полученных по измерениям глобальной сети станций. Результаты проведенного эксперимента показали, что выигрыш при использовании такой схемы может составлять до 30 %.

Литература

1. Пек Д. С., Чижова-Ноткина Е. А., Шупен К. Г. Анализ и оптимизация методов прогнозирования частотно-временных поправок к бортовым шкалам времени космических аппаратов системы ГЛОНАСС // Материалы 7-го международного симпозиума «Метрология времени и пространства». ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014. С. 183–184.
2. Сальцберг А. В., Шупен К. Г. Возможности использования фильтра Калмана для синхронизации и прогнозирования частотно-временных поправок бортовых шкал времени космических аппаратов системы ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. № 10. С. 167–179.
3. Сальцберг А. В., Шупен К. Г. Совместное прогнозирование частотно-временных поправок бортовых и наземных шкал времени системы ГЛОНАСС // Тезисы докладов «Седьмой всероссийской конференции Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО–2017), 17–21 апреля 2017 г., Санкт-Петербург. СПб.: ИПА РАН, 2017. С. 179–180.
4. Грязнов А. С., Петров А. А., Сальцберг А. В. и др. Использование результатов наземной экспериментальной отработки и летной эксплуатации для построения высокоточных моделей ухода шкал времени // Материалы IX Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. С. 162–163.
5. Глобальная навигационная система ГЛОНАСС. Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП). Интерфейсный контрольный документ (редакция 3.0). М.: ОАО «НПП «СПП», 2011. 93 С.
6. Tryon P. V., Jones R. K. Estimation of parameters in models for cesium beam atomic clocks // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1983. Vol. 88, no. 1. P. 17–24.
7. Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП). Филиал «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения» АО «НПК «СПП» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.glonass-svoevp.ru> (дата обращения: 15.11.2019). Архив данных: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/SVOEVP> (дата обращения: 15.11.2019).
8. Riley W. J. Handbook of frequency stability analysis // NIST Special Publication 1065. 2008. 136 p.
9. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) ФГУП ЦНИИмаш. Прикладной потребительский центр [Электронный ресурс]. URL: <http://www.glonass-iac.ru/> (дата обращения: 15.11.2019). Архив данных: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/> (дата обращения: 15.11.2019).