

В.В. Пасынков

УТОЧНЕНИЕ ЗАДЕРЖЕК НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛОНАСС

Аннотация. Статья посвящена решению ряда частных задач по оценке задержек распространения сигнала между космическими аппаратами системы ГЛОНАСС и наземными станциями в общей задаче разработки перспективной информационной технологии совершенствования частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС. Рассмотрены задержки, вызванные выносами фазовых центров антенн наземных станций, а также задержки в приемно-передающих трактах бортовой аппаратуры при проведении псевдозапросных измерений. Приведены результаты обработки накопленных в процессе проведения экспериментов измерений дальностей между космическими аппаратами и станциями, включающие оценки упомянутых задержек. Полученные оценки могут быть использованы при реализации перспективной технологии частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, задержки ГНСС-сигнала, навигационный космический аппарат.

V.V. Pasyнков

CLARIFICATION OF NAVIGATION SIGNAL DELAYS IN THE PROBLEM OF TIME-FREQUENCY DETERMINATION OF GLONASS

Abstract. The article describes solving a number of particular problems of estimating signal propagation delays between GLONASS spacecraft and ground stations in general task of prospective information technology development for improving GLONASS time-frequency support. The delays caused by the removal of the phase centers of the antennas of ground stations, as well as delays in the receiving and transmitting paths of on-board equipment during pseudo-query measurements are considered. The results of processing the range measurements accumulated during the experiments between spacecraft and stations, including estimates of the mentioned delays, are presented. The obtained estimates can be used in the implementation of a promising technology of GLONASS time-frequency support.

Keywords: GLONASS, GNSS signal delays, navigation spacecraft.

Введение

Данная статья продолжает описание [1] развиваемой информационной технологии, направленной на совершенствование процесса сличения шкал времени навигационных космических аппаратов (далее – НКА) ГЛОНАСС с перспективными характеристиками бортовых часов, обеспечивающих единицы пятнадцатого знака секунды в суточной нестабильности [2]. Данный процесс осложнен наличием широкого спектра неконтролируемых факторов, привносящих погрешности при выполнении типовых процедур частотно-временного обеспечения, уровень которых сопоставим или даже превышает погрешность, вызванную нестабильностью бортовых часов. Среди этих погрешностей: задержки сигналов в приемных и передающих трактах, на различных литерках и в разных диапазонах частот у НКА, беззапросных измерительных станций (далее – БИС) и наземных станций (далее – НС); погрешности знания выносов фазовых центров антенных систем НКА, БИС, НС; погрешности при распространении сигналов в атмосфере; погрешности

Пасынков Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 704 Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва. Сфера научных интересов: навигация, ГЛОНАСС. Автор более 70 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: pasynkov_vv@mail.ru

синхронизации шкал времени НКА, БИС, НС с часами системы; погрешности непосредственно измерений; погрешности эфемерид. В настоящей статье рассматривается подход к обработке навигационных измерений между НКА и НС, преследующий цель определения выносов фазовых центров антенных систем (далее – ФЦ АС) для используемых в перспективе при формировании частотно-временных поправок навигационных станций и определение задержек в приеме-передающих трактах.

Описание подхода к устранению погрешностей

Если взглянуть на приведенный во введении перечень погрешностей, то становится очевидным, что в условиях штатного функционирования группировки ГЛОНАСС при проведении любых измерений до наземных средств с целью обработки и сличения шкал времени они не разделимы. В связи с этим необходимо выработать практический и методический подход к их поэтапному устранению. Данный подход частично описан в [1]. Суть его состоит в последовательном выделении неопределенных факторов путем формирования составных функций измерений между НКА, БИС, НС. В результате этого применение апостериорных данных, которые могут быть использованы как эталонные (например, финальные эфемериды, параметры вращения Земли, частотно-временные поправки (далее – ЧВП), ионосферные карты, тропосферные карты) вместо части определяемых в навигационной задаче параметров позволит провести оценку упомянутых факторов и впоследствии решать уже обратную задачу.

Функциональная схема одного из сценариев такого подхода приведена на Рисунке 1.

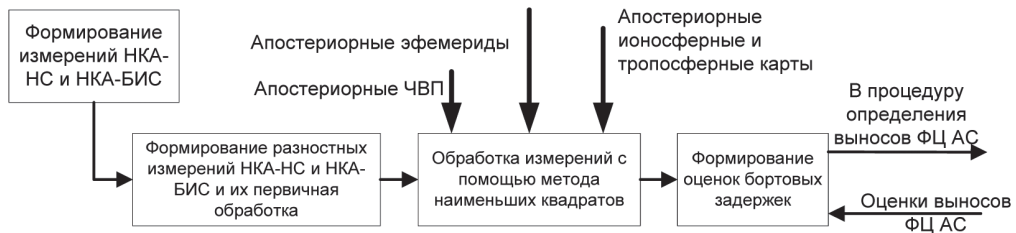


Рисунок 1. Функциональная схема этапов устранения погрешностей измерений НКА-НС

Таким образом, реализация обсуждаемой информационной технологии требует формирования поэтапной рекуррентной методики, включающей шаги по уточнению относительно стабильных во времени (определяемых конфигурацией бортовых и наземных аппаратных средств) погрешностей, в том числе выносов фазовых центров антенн, задержек в приемно-передающих трактах аппаратуры. Оценка этих величин позволит приступить к разработке части технологии, отвечающей за другие погрешности, возникающие при сличении шкал времени НКА и наземных средств.

Оценки задержек в приемных наземных трактах распространения сигнала

Рассмотрим математическую модель разностного измерения НС-БИС (для i -го КА между приемниками k -БИС и l -НС при проведении прямых измерений):

$$\Delta S_{k(2)БИС,l(2)НС}^i = S_{k(2)БИС}^i - S_{l(2)НС}^i \quad (1)$$

где с учетом того, что НС и БИС принимают, а КА излучает (встречное измерение),

$$S_{k(2)НС}^i = \rho_{k(2)}^i + c\bar{t}_n - c\bar{t}^i + a_0^{iПД(МРЛ)} + a_{0кн}^{iПМ} . \quad (2)$$

$$S_{k(2)БИС}^i = \rho_{k(2)}^i + c\bar{t}_б - c\bar{t}^i + a_0^{iПД(БИНС)} + a_{0кб}^{iПМ} . \quad (3)$$

В таком случае при совмещении трактов МРЛС и БИНС на одной станции

$$\Delta S_{k(2)БИС,k(2)НС}^i = \rho_{k(2)}^i - \rho_{l(2)}^i + c\bar{t}_б - c\bar{t}_n + a_{0кб}^{iПМ} - a_{0к}^{iПМ} . \quad (4)$$

В соотношениях (1)–(4) $\rho_{k(1)}^i$, $\rho_{k(2)}^i$ – геометрические дальности; \bar{t}^i – сдвиг часов КА; \bar{t}_1 , \bar{t}_a – сдвиг часов станции и БИС соответственно; $a_{0кн}^{iПМ}$, $a_{0кб}^{iПМ}$ – задержки в приемных трактах станции и БИС соответственно; $a_0^{iПД(БИНС)}$, $a_0^{iПД(МРЛ)}$ – задержки в передающих трактах КА.

В уравнении (1.4) присутствуют геометрическая разность АС НС и БИС, разность часов (при использовании одного опорного стандарта – только систематическая погрешность оцифровки времени на НС и БИС) и разность задержек в наземной аппаратуре, что при использовании калиброванной (опорной) БИС ($a_{0кб}^{iПМ} = 0$) позволяет непосредственно оценить задержку в НС $a_{0к}^{iПМ}$ при использовании эталонных данных об эфемеридах и ЧВП. На всех пунктах эксплуатации перспективного наземного сегмента реализована локальная близость НС и БИС, что позволяет провести обработку в первых разностях на каждой линейной комбинации (1.4) на каждой отдельной частоте. В этом случае нивелируются: погрешность знания бортовых выносов антенны на частоте F_i ; погрешность знания бортовых задержек на частоте F_i ; погрешность ЧВП i -го КА; погрешности распространения сигнала в ионосфере и тропосфере, которые при интерпретации данного измеряемого параметра можно не учитывать.

Таким образом, при одновременном наблюдении НС и БИС, находящихся на одном стандарте частоты и совокупности созвездия из n КА, остаются неразрешенными систематическая разность шкал времени между k -м комплектом НС и эталонной БИС, если за эталон принимать часы БИС. Литерные калибровки НС по литерам КА (для сигналов с частотным разделением), которые имеют второй порядок величины погрешности; координаты станции (могут быть определены отдельно с геодезической точностью); вынос ФЦ АС НС относительно ОПУ. Рассмотрим устранение выноса.

Оценка задержек, вызванных выносами фазовых центров относительно опорно-поворотных устройств для альт-азимутальных антенн

Полноценная оценка выносов ФЦ АС (далее – ax_{off}) для больших АС требует построения параметрической модели, которая бы включала эффект температурной деформации антенны [2]. На Рисунке 2 представлена рекомендуемая параметризация для альт-азимутальных телескопов (для положительного и отрицательного выносов ФЦ АС). Формализуем вклад в задержку распространения сигнала температурных деформаций антенны:

Уточнение задержек навигационных сигналов в задаче частотно-временного определения ...

$$\Delta D = \Delta D_0 + \Delta D_{off}, \tag{5}$$

где

$$\Delta D_0 = \gamma_f (T_f - T_0) h_f \sin \varepsilon + \gamma_a (T_a - T_0) (h_p \sin \varepsilon + h_v - F h_s) \tag{6}$$

$$\Delta D_{off} = \gamma_a (T_a - T_0) a x_{off}, \tag{7}$$

T_i – опорная температура (рекомендуется использовать значения средних температур для каждой из станций); T – температура окружающего воздуха; $F = 0,9$ – для первичного фокуса (вариант запросной измерительной станции); $F = 1,8$ – для вторичного; T_f, T_a – температура фундамента и антенны соответственно; h_f – высота фундамента; h_v – высота вертекса; h_s – высота контррефлектора; h_p – высота антенного столба; γ_a – коэффициент температурного расширения антенны; γ_f – коэффициент температурного расширения фундамента антенны. Для альт-азимутальной монтировки $a x_{off} = \pm h_p \cos \varepsilon$.

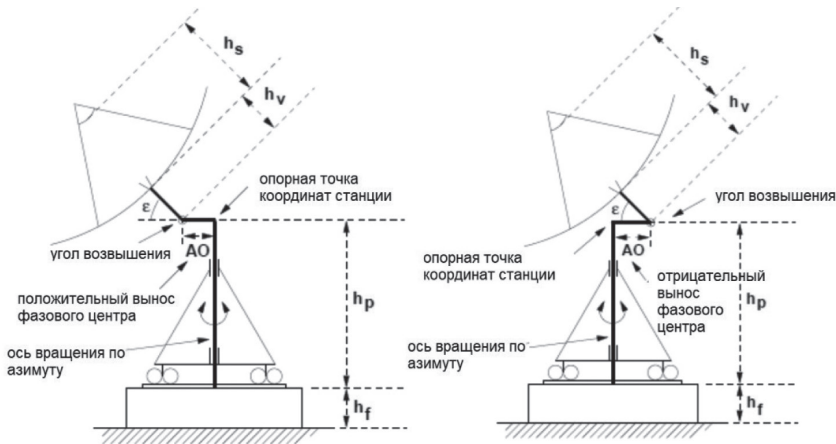


Рисунок 2. Иллюстрация изменения выносов фазового центра антенных систем наземных станций

Учет временной задержки между изменением температуры воздуха и соответствующей температурной деформацией антенны (в том числе фундамента) производится путем введения дополнительной фазы Δt_a и Δt_f . Тогда $T_f = T(t - \Delta t_f)$ и $T_a = T(t - \Delta t_a)$. Рекомендуемые IERS-значения [3]: $\Delta t_f = 6$ часов, $\Delta t_a = 2$ часа. В настоящее время T_a и T_f принимаются равными температуре воздуха T , то есть $\Delta t_a = 0, \Delta t_f = 0$. Коэффициент температурного расширения γ зависит от материала и структуры антенны. Итоговая параметрическая модель в экспериментах с АС НС характеризуется следующими параметрами (см. Таблицу 1):

Таблица 1

Итоговая параметрическая модель в экспериментах с АС НС

γ_f	h_f	γ_a	h_p	h_v	h_s	h_d	focus	$T_0, \text{°C}$	γ_p
0,00001	3,0	0,0000232	3,3	1,6	1,8	0,0	20	6,0	0,0000118

При оценке выноса использовалась модель тропосферы GPT3_5 [5], которая является априорной, значит, в результатах оценок могут присутствовать неучтенные зенитные задержки до 10 см, обусловленные влажной составляющей тропосферы. Ожидаемая величина выноса (согласно документации на АС) 3,3 м. Результаты оценки получены следующие: для НС-1 – 0,571 м (СКО 0,1 м), для НС-2 – 0,218 м (СКО 0,1 м), для НС-3 – 0,649 м (СКО 0,09 м). Анализ полученных значений показывает, что для всех АС выносы меньше ожидаемого уровня примерно в 5–6 раз, но при этом весьма близки между собой, несмотря на сильное различие в координатах мест размещения станций.

Определение задержек в приемно-передающих трактах

Величины задержек в трактах излучения и приема НС и НКА входят аддитивно в измерение дальности, формируемое между ними. Для их раздельного учета были проведены и прямые, и встречные измерения (между НС и НКА и между НКА и НС). Разность таких асинхронных измерений для принимающих НС и БИС имеет вид

$$\Delta S_{k(2)БИС,k(2)НС}^i(\tau) = \rho_{k(2)}^i(t) - \rho_{l(2)}^i(t + \tau) + c\bar{t}_o(t) - c\bar{t}_n(t + \tau) + (a_{0k\delta}^{ИМ} - a_{0k}^{ИМ}) + (a_0^{ИД(МРЛ)} - a_0^{ИД(БИНС)}). \quad (8)$$

На интервале τ вариациями наземных и бортовых часов можно пренебречь, и в таком случае нивелируется погрешность ЧВП i -го КА, погрешности распространения сигнала в тропосфере. В то же время присутствуют разности задержек: $(a_0^{ИД(МРЛ)} - a_0^{ИД(БИНС)})$ – в передающих трактах бортовой аппаратуры на частотах МРЛ и БИНС; $(a_{0k\delta}^{ИМ} - a_{0k}^{ИМ})$ – в приемных трактах в наземной аппаратуре на частотах МРЛ и БИНС; погрешность знания бортовых выносов антенны на частотах БИНС и МРЛ, которая входит в геометрические расстояния $\rho_{k(2)}^i(t) - \rho_{l(2)}^i(t + \tau)$ (ее определение описано в разделе 2); погрешность распространения в ионосфере на различных частотах. При этом в случае совмещения навигационного и МРЛ каналов в НС рефракцию в ионосфере можно компенсировать различными способами: либо использовать навигационный канал с последующим пересчетом из L - в S -диапазон, либо ионосферно свободную линейную комбинацию (далее – ЛК) строить по измерениям, выбрав синхронное измерение на одной из частот в L -диапазоне и непосредственно в S -диапазоне, либо по уточненной локальной модели для пункта эксплуатации, либо по апостериорным ионосферным картам. В таком случае остается оценить задержки, применив все те же эталонные данные об эфемериде и частотно-временных поправках и произведя обработку измерений. Приведенная далее оценка средних систематических задержек в приемном тракте НС проведена с опорой на формулярное значение задержки передающего тракта 705 КА (принят равным нулю). Результаты (в виде постоянного значения задержки A_0 и скорости ее ухода A_1) приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Оценка средних систематических задержек в приемном тракте НС

Станция	A_0 , м	СКО	A_1 , м/сут	СКО
НС-1	38,1	0,1	-0,078	0,006
НС-2	-214,6	0,1	-0,056	0,011
НС-3	-134,9	0,1	-0,204	0,019

Уточнение задержек навигационных сигналов в задаче частотно-временного определения ...

Разброс систематики может быть обусловлен погрешностями оцифровки измерений относительно стандарта частоты, ошибками передачи времени на НС или неизвестными калибровочными трактами от вывода стандарта до каждой АС. При этом получены следующие значения задержек и вариации систематики в межспутниковых измерениях по литерам относительно R11 (см. Таблицу 3).

Таблица 3

Значения задержек и вариации систематики в межспутниковых измерениях

Системный номер	Номер КА	Литера	a_0 , м	СКО	Ожидаемое
R04	759	6	-1,395	0,008	-0,38
R05	756	1	-0,109	0,008	-0,80
R09	702	-2	0,197	0,009	-0,30
R11	705	0	-	-	-
R15	757	0	0,013	0,008	-1,16
R24	760	2	-0,617	0,009	-0,97

Результаты, приведенные в Таблице 3, показывают наличие литерной зависимости, так как НКА 757, который находится на литере 0, также как и 705, имеет околонулевое значение задержки с учетом погрешности оценивания.

Заключение

Предложена методика поэтапного устранения части погрешностей в задаче разработки информационной технологии сличения шкал времени ГЛОНАСС. Получены результаты, включающие оценки выносов фазовых центров навигационных станций, а также оценки задержек в бортовых приемно-передающих трактах НС и НКА. Данные величины могут быть использованы при интерпретации проводимых измерений в идентичных диапазонах частот между НКА и НС, что позволит устранить эти неопределенные факторы в задаче частотно-временного обеспечения НКА ГЛОНАСС и повысить точность сличения бортовых шкал времени.

Иными словами, появляется возможность в дальнейшем провести полноценную обработку различных комбинаций измерений и устранение других погрешностей, выполнив в конечном итоге процедуру оценки частотно-временных поправок к БШВ НКА ГЛОНАСС с точностью, удовлетворяющей перспективным требованиям.

Литература

1. Пасынков В.В. Формирование перспективной информационной технологии совершенствования частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС // Перспективы науки. 2023. № 7 (166). 48 с.
2. Богданов П.П., Феоктистов А.Ю. Анализ функционирования бортовых часов КА ГНСС // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение: X Всероссийская конференция с международным участием. СПб., 2023.
3. Губанов В.С., Суркис И.Ф. Обработка РСДБ-наблюдений: Программный пакет QUASAR. I. Редукция данных наблюдений // Сообщения Института прикладной астрономии РАН. 2002. № 141. 32 с.
4. <https://iers.org> (дата обращения: 20.06.2023).

5. Landskron D., Bohm J. (2018) VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *J. Geod.*, 2018, No. 92(4), Pp. 349–360.

Literature

1. Pasyнков В.В. (2023) [Formation of promising information technology for improving frequency-time support of GLONASS]. *Perspektivy nauki*, 2023, No. 7, 48 p. (in Russian).
2. Bogdanov P.P., Feoktistov A.Yu. (2023) [Analysis of the functioning of the on-board clock of the GNSS spacecraft]. *Fundamental'noe i prikladnoe koordinatno-vremennoe i navigacionnoe obespechenie: X Vserossijskaja konferencija s mezhdunarodnym uchastiem* [Fundamental and applied coordinate-time and navigation support: X All-Russian conference with international participation]. St. Petersburg, 2023 (in Russian).
3. Gubanov V.S., Surkis I.F. (2002) [Processing of VLBI observations: QUASAR software package. I. Reduction of observational data]. *Soobshhenija IPA RAN*, 2002, No. 141, 32 p. (in Russian).
4. <https://iers.org> (accessed: 20.06.2023)
5. Landskron D., Bohm J. (2018) VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *J. Geod.*, 2018, No. 92, Pp. 349–360.