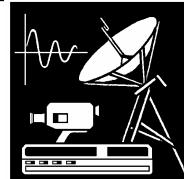


РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ



УДК 629.7

DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).91-96](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).91-96)

ФОРМИРОВАНИЕ ЭФЕМЕРИДНО-ВРЕМЕННЫХ ПОПРАВОК В СИСТЕМЕ ГЛОНАСС НА ОСНОВЕ ХРОНОМЕТРИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОМ КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ

В.М.Гусаков, Т.О.Мысливцев, В.Н.Цыкунов

FORMATION OF EPHemeris AND TIME CORRECTIONS IN THE GLONASS SYSTEM BASED ON CHRONOMETRICATION OF PULSAR RADIATION ON A GEOSTATIONARY SPACECRAFT

V.M.Gusakov, T.O.Myslivtsev, V.N.Tsykunov

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, Санкт-Петербург, vka@mil.ru

Рассматриваются вопросы поддержания качественных показателей навигационного поля системы ГЛОНАСС в условиях ограниченного функционирования наземного комплекса управления и возможности применения космических аппаратов на геостационарной орбите для уточнения параметров движения навигационных космических аппаратов посредством межспутниковых радиолиний и расчета эфемеридно-временных поправок. Анализируется возможность формирования на борту геостационарного космического аппарата независимой шкалы времени на основе хронометрирования излучения группы нейтронных звезд (пульсаров). Предлагается модель формирования высокоточной эфемеридно-временной информации в системе ГЛОНАСС на основе бортовых измерений при включении в состав орбитального космического аппарата на геостационарной орбите. Представлен вариант формирования реперных значений частоты и времени на борту геостационарного космического аппарата на основе разработки технологии приема и обработки излучения пульсаров с компенсацией доплеровского сдвига частоты, возникающего при движении геостационарного космического аппарата относительно точки пульсарного радиоизлучения, а также синтезирования групповой пульсарной шкалы времени.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, космический аппарат, пульсарная шкала времени, эфемеридно-временная информация

Для цитирования: Гусаков В.М., Мысливцев Т.О., Цыкунов В.Н. Формирование эфемеридно-временных поправок в системе ГЛОНАСС на основе хронометрирования излучения пульсаров на геостационарном космическом аппарате // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №4(125). С.91-96. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).91-96](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).91-96)

The issues of maintaining the quality indicators of the navigation field of the GLONASS system in the conditions of limited functioning of the ground control complex and the possibility of using spacecraft in geostationary orbit to refine the parameters of the movement of navigation spacecraft by means of inter-satellite radio lines and calculating ephemeris-time corrections are considered. The possibility of forming an independent time scale on board a geostationary spacecraft based on the timing of radiation from a group of neutron stars (pulsars) is analyzed. A model is proposed for the formation of high-precision ephemeris-time information in GLONASS GNSS based on on-board measurements when included in the orbital spacecraft in geostationary orbit. A variant of forming reference values of frequency and time on board a geostationary spacecraft is proposed based on the development of technology for receiving and processing pulsar radiation with compensation for the Doppler frequency shift that occurs when the HCA moves relative to the pulsar radio emission point, as well as synthesizing a group pulsar time scale.

Keywords: GLONASS, spacecraft, pulsar scale time, ephemeris temporal information

For citation: Gusakov V.M., Myslivtsev T.O., Tsykunov V.N. Formation of ephemeris and time corrections in the GLONASS system based on chronometration of pulsar radiation on a geostationary spacecraft // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №4(125). P.91-96. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).91-96](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).91-96)

Введение

Основной качественной характеристикой системы ГЛОНАСС является текущая точность местоопределения потребителей, существенный вклад в которую вносят ошибки эфемеридно-временной информации (ЭВИ) навигационных космических аппаратов (НКА).

Прогноз параметров движения НКА и ухода их бортовой шкалы времени осуществляется с использованием математических моделей на основании проведения измерений текущих навигационных параметров средствами наземного комплекса управления (НКУ), значений ухода бортовой шкалы времени (БШВ) и последующей закладкой на борт НКА в виде эфемеридно-временных поправок (ЭВП) [1].

Действующие математические модели и алгоритмы прогнозирования хода шкал времени (ШВ) НКА основаны на представлении систематической составляющей процесса ухода БШВ полиномиальной функцией первой или второй степени в зависимости от характеристик конкретного стандарта частоты каждого из НКА. При этом отклонение модели прогноза от реального ухода ШВ составляют величину порядка 1-2 нс на интервале времени в один час, что приводит к погрешностям в определении псевдодальности до 1 метра, существенно влияющих при неблагоприятных условиях распространения сигналов НКА и высоком геометрическом факторе на точность позиционирования потребителя. На сегодняшний день характеристики бортовых стандартов частоты, прежде всего стабильности частоты, соответствуют достигнутому уровню развития техники и технологий, поэтому возможности по созданию стандартов с новыми качественными показателями связаны со значительными материальными затратами. В этой связи необходимо искать альтернативные направления формирования и синхронизации БШВ НКА, которые позволят наряду с развитием современной технологической базы при создании высокоточных генераторов частоты и времени изготавливать сравнимые по точности шкалы. Одно из таких направлений связано с использованием технологии приёма радиоизлучения нейтронных звезд (пульсаров) в интересах формирования независимой высокоточной шкалы времени с последующей реализацией алгоритмов обработки наземных и бортовых измерений для эфемеридно-временного обеспечения ГНСС ГЛОНАСС. Практическая реализация такого решения требует соответствующего научно-методического обоснования на алгоритмическом и аппаратном уровне.

Основные направления повышения точности навигационных определений потребителя системы ГЛОНАСС связаны с модернизацией средств НКУ и развитием орбитальной группировки за счет включения в ее состав КА на геостационарных и высокоэллиптических орbitах. Выведение геостационарных космических аппаратов (ГКА) дает возможность разместить на их борту программно-аппаратный комплекс хронометрирования излучения пульсаров (высокоточного измерения временных интервалов) с последующим формированием независимой шкалы времени в космосе и дальнейшим проведением взаимных сравнений со шкалами времени наземных и бортовых синхронизаторов ГНСС.

При этом поддержание точности местоопределений потребителя в условиях ограниченного функци-

ционирования НКУ системы может быть достигнуто за счет совершенствования алгоритмов обработки бортовых измерений текущих навигационных параметров НКА с использованием независимого источника частотно-временной информации на борту ГКА для формирования ЭВП.

Модель формирования эфемеридно-временных поправок в системе ГЛОНАСС с использованием ГКА и данных межспутниковых измерений

Траектория движения КА описывается системой дифференциальных уравнений с известными правыми частями, что позволяет свести их решение к определению начальных условий, относящихся к некоторому моменту времени. В результате текущие параметры движения КА могут быть определены в любой момент времени методом интегрирования соответствующей системы дифференциальных уравнений. Таким образом, целью навигационной задачи является определение вектора состояния КА в заданной системе координат по данным измерениям текущих навигационных параметров.

Наиболее трудно разрешимой проблемой в эфемеридной задаче является наличие неполной наблюдаемости всего набора начальных условий, НКА ГНСС ГЛОНАСС, по взаимным измерениям дальностей и радиальной скорости. При этом эфемеридная задача гораздо сложнее частотно-временной как в отношении наблюдаемости, так и по количеству степеней свободы (размерности вектора оцениваемых параметров) и сложности процедур предикции движения [2].

Сущность предлагаемой схемы заключается в том, что ГКА обрабатывает взаимные измерения автономно, используя при этом измерения дальностей и радиальной скорости от себя до «ведомых» НКА, т.е. только до тех аппаратов, с которыми он напрямую взаимодействует посредством межспутниковой радиолинии. При этом наблюдаемость в схеме ГКА–НКА наиболее продолжительна и одновременно в зоне радиовидимости может находиться порядка 5-6 НКА, по которым могут проводиться взаимные бортовые измерения.

Рассмотрен вариант проведения межспутниковых измерений (рис.1) по схеме «ГКА–НКА» в предположении, что ГКА является «ведущим», а НКА — «ведомым».

Точное значение вектора состояния НКА, соответствующее измерениям дальности и радиальной скорости ГКА–НКА, получим с использованием метода наименьших квадратов при нахождении минимума следующего функционала:

$$\begin{aligned}
 f(\vec{R}, \vec{V}) = & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_R^2} \left[\sqrt{(x_{\text{ГКА } n} - x_{\text{НКА } n})^2 + (y_{\text{ГКА } n} - y_{\text{НКА } n})^2 + (z_{\text{ГКА } n} - z_{\text{НКА } n})^2} - R_{\text{изм. } n} \right]^2 + \\
 & + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_V^2} \left[\frac{(x_{\text{ГКА } n} - x_{\text{НКА } n}) \cdot V_x n + (y_{\text{ГКА } n} - y_{\text{НКА } n}) \cdot V_y n + (z_{\text{ГКА } n} - z_{\text{НКА } n}) \cdot V_z n}{\sqrt{(x_{\text{ГКА } n} - x_{\text{НКА } n})^2 + (y_{\text{ГКА } n} - y_{\text{НКА } n})^2 + (z_{\text{ГКА } n} - z_{\text{НКА } n})^2}} - \dot{R}_{\text{изм. } n} \right]^2 = \\
 & = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_R^2} (R_{\text{расч. } n} - R_{\text{изм. } n})^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_V^2} (\dot{R}_{\text{расч. } n} - \dot{R}_{\text{изм. } n})^2 \rightarrow \min,
 \end{aligned} \tag{1}$$

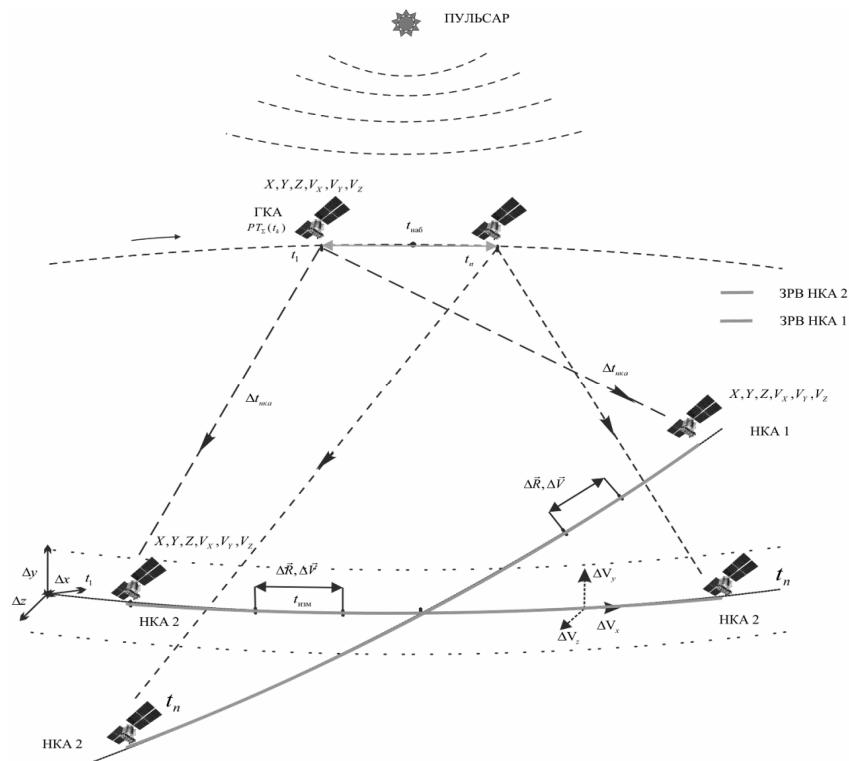


Рис.1. Графическое пояснение к модели формирования ЭВП

где σ_R^2 — дисперсия погрешности измерений дальности; σ_v^2 — дисперсия погрешности измерений скорости; $x_{\text{НКА } n}, y_{\text{НКА } n}, z_{\text{НКА } n}$ — искомые значения координат НКА на заданные моменты времени измерений с номером n ; n — номер, соответствующий времени измерения, $n = \overline{1, N}$; $x_{\text{ГКА } n}, y_{\text{ГКА } n}, z_{\text{ГКА } n}$ — значения координат ГКА на заданные моменты времени измерений с номером n ; V_{xn}, V_{yn}, V_{zn} — искомые значения разностей проекций вектора скорости на заданные моменты времени измерений с номером n ; $R_{\text{изм } n}$ и $\dot{R}_{\text{изм } n}$ — n измеренных значений дальности и радиальной скорости соответственно.

При проведении взаимных сравнений ШВ по схеме ГКА–НКА вычисляется временная поправка к шкале каждого аппарата в зоне радиовидимости и в соответствии с выражением $\Delta T_{\text{ГКА-НКА}} = R/c + \delta t_{\text{ГКА-НКА}}$, где $\delta t_{\text{ГКА-НКА}} = \delta T$ — смещение показаний часов.

Таким образом, формирование ЭВП в ГНСС ГЛОНАСС на основе обработки бортовых измерений при включении в состав орбитальной группировки космического аппарата на геостационарной орбите можно записать в виде уравнений, учитывающих определение вектора состояния НКА и положение ШВ:

$$\begin{cases} \Delta T_{\text{ГКА-НКА}} = R/c + \delta t_{\text{ГКА-НКА}}; \delta t_{\text{ГКА-НКА}} = AT_{\text{ГКА}} - t_{\text{НКА}}; \\ f(\vec{R}, \vec{V}) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_R^2} (R_{\text{расч. } n} - R_{\text{изм. } n})^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_V^2} (\dot{R}_{\text{расч. } n} - \dot{R}_{\text{изм. } n})^2 \rightarrow \min. \end{cases} \quad (2)$$

Основываясь на приведенных соотношениях, можно записать оптимизируемый функционал в общем виде на трассе ГКА–НКА — $f_{\text{гка-нка}}[\vec{R}_{\text{гка-нка}}, \vec{V}_{\text{гка-нка}}, AT_{\text{гка}}(t_k)] \rightarrow \min$, где $AT_{\text{гка}}(t_k)$ — положение ШВ геостационарного космического аппарата в момент t_k .

Обработка навигационных измерений по классическому алгоритму включает три основных этапа: первичная, предварительная и вторичная обработка.

Наиболее сложным и трудоемким этапом обработки навигационных измерений является вторичная обработка, связанная с подбором оптимальной траектории космического аппарата, которая в максимальной степени удовлетворяет исходной измерительной выборке. На точность и оперативность получения решения навигационной задачи существенное влияние оказывает информативность измерительной выборки и метод оптимизации, положенный на основу решения обратной задачи.

Проведенный анализ и численное моделирование поставленной задачи определения вектора состояния НКА показали, что использование прямых методов оптимизации имеет ряд преимуществ в сравнении с градиентными процедурами. Это

связано с наблюдаемостью навигационных параметров \bar{R} и \bar{V} при взаимном движении НКА относительно геостационарного космического аппарата, так как при плохой наблюдаемости линеаризация функции может привести к расходимости градиентных методов оптимизации, что математически выражается большим числом обусловленности матрицы частных производных [3].

На рис. 2 и 3 представлен поиск методом деформируемого многогранника при оптимизации целевой функции $f(\bar{R}, \bar{V})$ для случая двух и трех неизвестных компонент вектора состояния космического аппарата, когда точка минимума находится внутри многогранника (ошибки по остальным компонентам вектора состояния космического аппарата равны нулю).

Расчеты целевой функции при исходных ошибках местоположения x, y, z, v_x, v_y, v_z представлены в таблице.

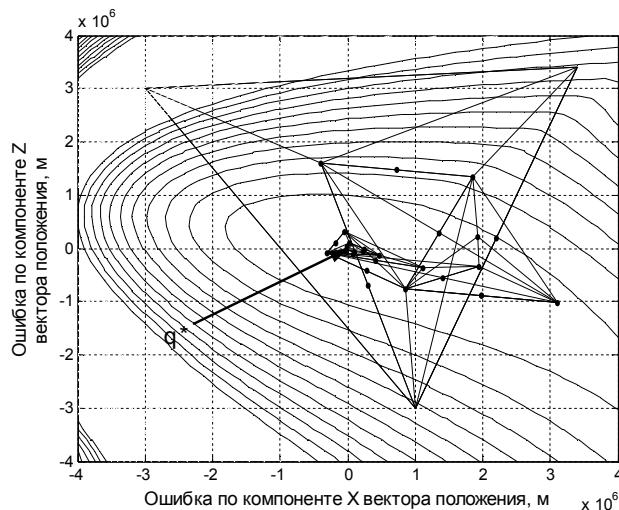


Рис.2. Поиск минимума целевой функции методом деформируемого многогранника для случая двух переменных

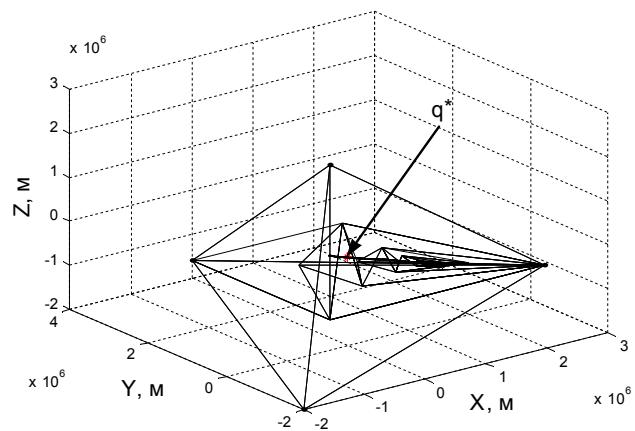


Рис.3. Поиск минимума целевой функции методом деформируемого многогранника для случая трех переменных

Таким образом, разработанная модель позволяет формировать ЭВП в зависимости от изменения ошибок в бортовых измерениях в системе ГЛОНАСС с учетом включения в состав орбитальной группировки КА на геостационарной орбите и предусматривает возможность учета поправок, сформированных при хронометрировании излучения пульсаров на ГКА.

Формирование бортовой шкалы времени ГКА на основе хронометрирования излучения пульсаров

На основе приёма пульсарного излучения возможно построение первичной и вторичной ШВ ГКА с бортовой аппаратурой, формирующей первичную шкалу, которая требует достаточно частой коррекции. В соответствии с проведенным анализом существующих способов формирования пульсарной шкалы времени (ПШВ) и с учетом особенностей приема излучения пульсаров в околоземном космическом пространстве на основе предложенной модели формирования ЭВП в системе ГЛОНАСС разработан порядок расчета реперных значений частоты и времени на борту ГКА [4,5].

При хронометрировании излучения пульсаров на борту ГКА необходимо учитывать нижеследующие временные поправки. Для формирования ПШВ

Поиск минимума целевой функции методом деформируемого многогранника

$q = [x, y, z, v_x, v_y, v_z]^T$	Начальные ошибки	Количество этапов поиска	Значение целевой функции, рад^2	Конечные значения элементов вектора состояния НКА
$q = [x, y, 0, 0, 0, 0]^T$	$x = 2 \text{ км}$ $y = 2 \text{ км}$	65	$3,941 \cdot 10^{-7}$	$0,0183745 \text{ м}$ $-0,0213150 \text{ м}$
$q = [x, 0, z, 0, 0, 0]^T$	$x = 2 \text{ км}$ $z = 2 \text{ км}$	74	$3,997 \cdot 10^{-7}$	$-0,030001 \text{ м}$ $0,002037 \text{ м}$
$q = [0, 0, 0, v_x, v_y, 0]^T$	$v_x = 0,5 \text{ км/с}$ $v_y = 0,5 \text{ км/с}$	60	$3,183 \cdot 10^{-7}$	$0,061872 \text{ м/с}$ $-0,0015039 \text{ м/с}$
$q = [0, 0, 0, v_x, 0, v_z]^T$	$v_x = 0,5 \text{ км/с}$ $v_z = 0,7 \text{ км/с}$	57	$5,482 \cdot 10^{-7}$	$-0,059668 \text{ м/с}$ $0,0009969 \text{ м/с}$
$q = [x, 0, 0, v_x, 0, 0]^T$	$x = 1,5 \text{ км}$ $v_x = 0,5 \text{ км/с}$	59	$8,493 \cdot 10^{-7}$	$0,019176 \text{ м}$ $-0,001087 \text{ м/с}$

на ГКА, движущемся вокруг Солнца, необходимо провести переход от барицентрической к инерциальной системе координат, учесть поправки связанные с распространением излучения пульсаров в межзвёздной среде. При этом атмосферные ошибки при вычислениях не учитываются, что является достоинством предлагаемого варианта хронометрирования излучения пульсаров на геостационарной орбите [6,7].

Момент прихода импульса в барицентр Солнечной системы t_B связан с моментом прихода импульса в точку положения ГКА — $t_{\text{ГКА}}$, тогда разность $t_B - t_{\text{ГКА}}$ является временной поправкой, которая учитывается при формировании ПШВ и имеет вид:

$$\Delta T_{PSRi} = \Delta t_{Roemer} + \Delta t_{Shapiro} + \\ + \Delta t_{Einstein} + \Delta t_{Dop} + \Delta t_{CKO} + \Delta t_{DMi}, \quad (3)$$

где Δt_{Roemer} — поправка Рёмера, учитывающая разность во времени распространения излучения от пульсара до ГКА и до барицентра Солнечной системы, составляет $\sim 0,9$ с; $\Delta t_{Shapiro}$ — поправка, вызванная эффектом Шапиро, составляет $\sim 1,1$ мкс; $\Delta t_{Einstein}$ — поправка Эйнштейна, вызванная движением ГКА вокруг барицентра Солнечной системы, которая составляет $\sim 1,5$ с; Δt_{Dop} — поправка, вызванная эффектом Доплера, возникающим при движении ГКА относительно выбранного пульсара, составляет $\sim 1,5$ мкс; Δt_{CKO} — поправка, представляющая среднеквадратичное отклонение моментов прихода импульсов при хронометрировании пульсарного излучения, ~ 2 мкс; Δt_{DM} — поправка, обусловленная прохождением излучения пульсара через межзвёздную среду, которая составляет ~ 3 мкс.

Для уменьшения нестабильности ПШВ и интервала хронометрирования предлагается объединять измерения группы пульсаров $PT_{\text{ГКА}\Sigma}(t_k)$.

Временная поправка, вызванная эффектом Доплера, учитывается согласно разработанному математическому аппарату с использованием соотношений специальной теории относительности, которые опре-

деляют смещение частоты первого и второго порядков и при учете воздействия факторов движения вокруг Земли и относительно Солнца [8]

$$F_D / f_0 = (v_{\tau_{KA}} / c \cdot \sin \beta_3 + v_{\tau_3} / c \cdot \sin \beta_C) \cos \alpha - \\ - 0,5(v_{\tau_{KA}} / c \cdot \cos \beta_3 + v_{\tau_3} / c \cdot \cos \beta_C)^2, \quad (4)$$

где $v_{\tau_{KA}}$ — тангенциальная составляющая скорости КА; v_{τ_3} — тангенциальная составляющая скорости Земли вокруг Солнца; α — угол направления на пульсар; f_0 — частота приёма пульсарного излучения; c — скорость света; β_3, β_C — угол ориентации плоскости орбиты Земли и Солнца соответственно.

Поправка Ремера Δt_{Roemer} — это геометрическая поправка, учитывающая разность во времени распространения излучения пульсара до ГКА и до барицентра Солнечной системы. Поправка Шапиро $\Delta t_{Shapiro}$ учитывает задержку распространения излучения пульсаров в гравитационном поле Земли и Солнца.

Формирование групповой шкалы времени производится путём масштабирования соответствующих ПШВ и при вычислении взвешенного среднего с присвоением каждому пульсару весового коэффициента. Для группы, состоящей из M пульсаров, формируются значения секунды $PT_i(t) = PT_h + \Delta_i(t) + \varepsilon_i(t)$, где $\Delta_i(t)$ — систематическая составляющая погрешности, обусловленная медленно протекающими физическими изменениями; $\varepsilon_i(t)$ — случайная составляющая, возникающая при распространении излучения в межзвёздной среде. Несмешённая оценка в момент t_k будет равна средневзвешенному значению [9].

$$PT_{\text{ГКА}\Sigma}(t_k) = \sum_{i=1}^M P_i(t_k) [PT_{\text{ГКА}i}(t_k) - \Delta_i(t_k)] \quad (5)$$

Результатом является высокостабильная групповая ПШВ ГКА, сопоставимая с характеристиками БСЧ, при этом обладающая более высокой долговременной стабильностью (рис. 4).

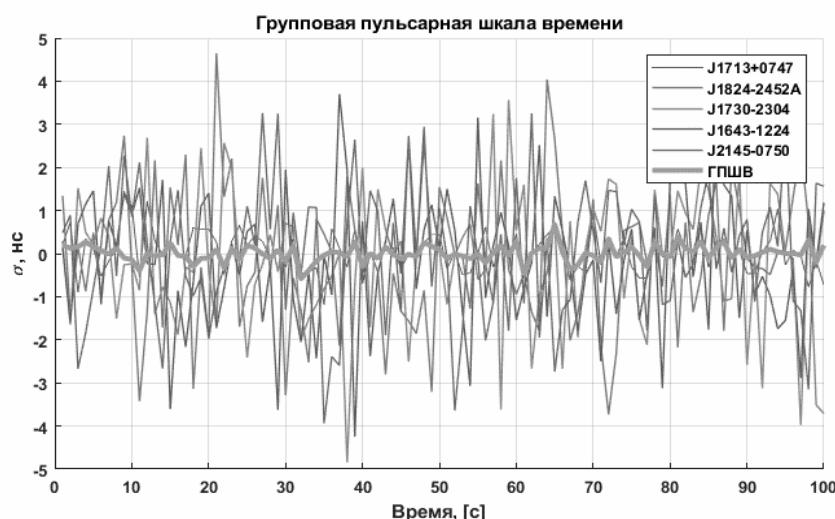


Рис.4. Шкала времени, воспроизводимая каждым пульсаром и групповая ПШВ

Используя свойство пульсарного времени поддерживать постоянство и выявлять изменения масштаба времени, возможно определить отклонение ШВ БСЧ и получить, таким образом, реальное время $PT_{ГКА}$, согласованное с ПШВ $PT_{ГКА} = AT_{ГКА} + \Delta PT_{ГКА\sigma}$, где $\Delta PT_{ГКА\sigma}$ — величина отклонения атомного эталона относительно ПШВ.

Заключение

Использование предложенной модели формирования ЭВП в системе ГЛОНАСС и с учетом ПШВ ГКА позволит на основе бортовых измерений в условиях ограниченного функционирования НКУ поддержать качественные показатели навигационного поля, формируемого системой.

При этом высокостабильный репер частоты и времени на борту ГКА может использоваться в виде резервного источника доведения частотно-временной информации для любого потребителя находящегося в зоне его радиовидимости.

1. Бакитко Р.В., Болденков Е.Н., Булавский Н.Т. и др.: ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 796 с.
2. Щекутьев А.Ф. Уточнение параметров движения космических аппаратов по межспутниковым измерениям взаимных дальностей // Космонавтика и ракетостроение. 2012. №4(69). С.26-44.
3. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 957 с.
4. Матасов Ю.В., Цыкунов В.Н. Предложения по формированию высокостабильной шкалы времени на борту космического аппарата на основе приема сигналов источников естественного радиоизлучения // Сб. тр. 73-й Всерос. науч.-техн. конф., посвящённая Дню радио. СПб, 20-28 апреля 2018 г. С.8-9.
5. Бакурский К.В., Гусаков В.М., Цыкунов В.Н. Использование сигналов источников космического радиоизлучения в интересах частотно-временного обеспечения ГНСС ГЛОНАСС // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. Вып.670. С.22-27.
6. Авраменко А.Е. Пульсар: Природный эталон времени – пространства. М.: Ленанд, 2015. 200 с.
7. Авраменко А.Е. Нейтронная звезда: от экстремальной турбулентности вспышки сверхновой к эталонной монотонности когерентного излучения пульсара // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2015. №5(62). С.23-37.
8. Мысливцев Т.О., Павский В.Ф., Цыкунов В.Н. Анализ влияния эффекта Доплера на характеристики бортовой пульсарной шкалы времени геостационарного космического аппарата // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. Вып. 672. С.131-139.
9. Цыкунов В.Н Алгоритм формирования автономной бортовой шкалы времени космического аппарата с использованием технологии приёма и обработки излучения пульсаров в интересах частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС // Навигация и гидрография. 2019. №57. С.38-48.

References

1. Bakitko R. V., Boldenkov E. N., Bulavsky N. T. et al.: GLONASS. Printsipy postroyeniya i funktsionirovaniya [GLONASS. Principles of construction and functioning]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2010. 796 p.
2. Shchekutiev A. F. Utochneniye parametrov dvizheniya kosmicheskikh apparatov po mezhsputnikovym izmereniyam vzaimnykh dal'nostey [Refinement of spacecraft motion parameters based on inter-satellite distance measurements]. Kosmonavtika i raketostroyeniye – Cosmonautics and rocket science, 2012, no. 4(69), pp. 26-44.
3. Himmelblau D. Process Analysis by Statistical Methods. New York: John Wiley and Sons, 1969. (Russ ed.: Himmelblau D. Analiz protsessov statisticheskimi metodami, Moscow: Mir Publ., 1973. 957 p.).
4. Matasov Y. V., Tsykunov V. N. Predlozheniya po formirovaniyu vysokostabil'noy shkaly vremeni na bortu kosmicheskogo appara na osnove priyema sig-nalov istochnikov yestestvennogo radioizlucheniya [Proposals for the formation of a highly stable time scale on board a spacecraft based on the reception of signals from natural radio sources]. Sbornik trudov 73-y Vserosiiskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu radio [Proc. the 73rd All-Russian scientific and technical conference dedicated to the Day of Radio], St. Petersburg, 2018, pp. 8-9.
5. Bakursky K. V., Gusakov V. M., Tsykunov V. N. Ispol'zovaniye signalov istochnikov kosmicheskogo radioizlucheniya v interesakh chastotno-vremennogo obespecheniya GNSS GLONASS [The use of signals from sources of space radio emission in the interests of frequency and time support of GNSS GLONASS]. Trudy Voyenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo – Proceedings of A.F. Mozhaysky's Military-Space Academy, 2019, no. 670. pp. 22-27.
6. Avramenko A. E. Pul'sar: Prirodnyy etalon vremeni – prostranstva [Pulsar: A natural standard of time – space]. Moscow: Lenand Publ., 2015. 193 p.
7. Avramenko A. E. Neytronnaya zvezda: ot ekstremal'noy turbulentnosti vspышki sverkhnovoy k etalonnoy monotonnosti kogerentnogo izlucheniya pul'sara [Neutron star: from the extreme turbulence of a supernova flare to the reference monotony of coherent pulsar radiation]. Vestnik Mgtu Im. N.e. Baumana Seriya Yestestvennyye nauki [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences], 2015, no. 5, pp. 23-37.
8. Myslivtsev T. O., Paevsky V. F., Tsykunov V. N. Analiz vliyanija effekta Doplera na kharakteristiki borto-voy pul'sarnoy shkaly vremeni geostatsionarnogo kosmicheskogo appara [Analysis of the influence of the Doppler effect on the characteristics of the onboard pulsar time scale of a geostationary spacecraft]. Trudy Voyenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo – Proceedings of A.F. Mozhaysky's Mili-tary-Space Academy, 2020, no. 672, pp. 131-139.
9. Tsykunov V. N. Algoritm formirovaniya avtonomnoy borto-voy shkaly vremeni kosmicheskogo appara s ispol'zovaniem tekhnologii priyoma i obrabotki iz-lucheniya pul'sarov v interesakh chastotno-vremennogo obespecheniya GLONASS [Algorithm for the formation of an autonomous onboard time scale of a spacecraft using the technology for receiving and processing pulsar radiation in the interests of time-frequency support for GLONASS]. Navigatsiya i gidrografiya – Navigation and Hydrography, 2019, no. 57, pp. 38-48.