

Калибровка имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем

Д. С. ПЕЧЕРИЦА, В. Н. ФЕДОТОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: pecheritsa_ds@vniiftri.ru

Представлен метод калибровки имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Определены действительные значения метрологических характеристик имитаторов по формированию псевдодальности. Метод основан на одновременном высокочастотном аналого-цифровом преобразовании навигационного сигнала и секундной метки шкалы времени имитатора сигналов с последующей цифровой демодуляцией, фильтрацией, поиском перехода соответствующего фронта двоичной модулирующей последовательности через нуль и измерением интервала времени между фазовым переходом и временной меткой шкалы имитатора. Предложено выполнять дискретизацию и запись высокочастотного сигнала имитатора и его секундной метки в одной временной шкале с последующей демодуляцией записанного сигнала на квадратурные составляющие.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система, ГЛОНАСС, имитатор сигналов, навигационный сигнал.

The method of calibration of signal simulators of global navigation satellite systems is presented. Defined valid values of metrological characteristics on the formation of the pseudo range. The method is based on the simultaneous high-frequency analog-to-digital conversion of the navigation signal and the second mark of the signal simulator time scale with subsequent digital demodulation, filtering, search for the transition of the corresponding front of the binary modulating sequence through zero and measurement of the time interval between the phase transition and the time stamp of the simulator scale. It is proposed to carry out sampling and recording of high-frequency signal of the simulator and its second mark in one time scale with subsequent demodulation of the recorded signal into quadrature components.

Key words: global navigation satellite system, GLONASS, GNSS simulator, navigation signal.

Согласно Федеральной целевой программе № 189 «Поддержка, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы», утверждённой Постановлением Правительства Российской Федерации от 3 марта 2012 г., в настоящее время с целью обеспечения коммерциализации и массового внедрения отечественных спутниковых навигационных технологий и услуг в интересах неограниченного числа пользователей наземного, морского, воздушного и космического базирования, специальных и гражданских (в том числе коммерческих и научных) потребителей, а также для международного внедрения этих технологий и услуг проводятся работы по поддержанию, развитию и широкому применению системы ГЛОНАСС. При этом погрешность определения навигационно-временного местоположения объектов за счёт использования космического сегмента ГЛОНАСС должна быть уменьшена до 1,4 и 1,0 м в 2018 и 2020 гг., соответственно.

С учётом среднего значения пространственного геометрического фактора, принимаемого равным двум единицам, составляющая эквивалентной погрешности измерений псевдодальности, возникающей из-за погрешности бортовой эфемеридно-временной информации (ЭВИ) навигационных космических аппаратов (НКА), должна составлять не более 0,7 и 0,5 м в 2018 и 2020 гг., соответственно.

На основе псевдодальностей, т. е. дальностей, измеренных беззапросным методом, определяют координаты и время при решении навигационных задач. Псевдодальности, которые вычисляют с помощью навигационной аппаратуры потребителя (НАП), можно представить как [1]:

$$R_i = \sqrt{(x_{\text{НКА}_i} - x_{\text{НАП}})^2 + (y_{\text{НКА}_i} - y_{\text{НАП}})^2 + (z_{\text{НКА}_i} - z_{\text{НАП}})^2} + c \Delta t_i,$$

где $x_{\text{НКА}_i}$, $y_{\text{НКА}_i}$, $z_{\text{НКА}_i}$ – координаты i -го НКА, рассчитанные на основе передаваемой эфемеридной информации; $x_{\text{НАП}}$, $y_{\text{НАП}}$, $z_{\text{НАП}}$ – координаты НАП; c – скорость света; Δt_i – расхождение шкалы времени потребителя и системной шкалы времени ГЛОНАСС в предположении, что бортовые шкалы времени НКА синхронны.

Погрешность измерения δR псевдодальности рассчитывают по формуле [1]:

$$\delta R = \delta_{\text{ЭВИ}} + \delta_{\text{атм}} + \delta_{\text{РГЭ}} + \delta_{\text{НАП}} + \delta_{\text{МЛР}} + \varepsilon,$$

где $\delta_{\text{ЭВИ}}$, $\delta_{\text{атм}}$, $\delta_{\text{РГЭ}}$, $\delta_{\text{НАП}}$, $\delta_{\text{МЛР}}$ – вклады в погрешность измерения псевдодальности, возникающие при влияниях бортовой ЭВИ, атмосферы, релятивистских и гравитационных эффектов, инструментальной (аппаратурной) погрешности измерения псевдодальности НАП, многолучевого распространения навигационного сигнала, соответственно, и прочих составляющих погрешности.

Погрешности $\delta_{\text{атм}}$, $\delta_{\text{РГЭ}}$ в той или иной степени компенсируются при использовании соответствующих моделей. Например, составляющая погрешности $\delta_{\text{МЛР}}$ компенсируется антеннами с эффектом подавления многолучевости, а также

специальными алгоритмами обработки сигналов. Составляющая погрешности $\delta_{\text{ЭВИ}}$ соответствует значениям, приведённым выше, т. е. 0,7 и 0,5 м.

Для достижения потенциально высокой точности определения местоположения, которую потребитель может получить при приёме сигналов ГЛОНАСС, необходимо, чтобы инструментальная погрешность измерений $\delta_{\text{НАП}}$ была существенно меньше (в три раза и менее), чем погрешность $\delta_{\text{ЭВИ}}$. Таким образом, согласно требованиям к инструментальной погрешности измерений, проводимых с помощью НАП, значения этой погрешности должны составить 0,2 и 0,15 м в 2018 и 2020 гг., соответственно.

Инструментальная погрешность измерения псевдодальности с помощью НАП обусловлена существованием зависимости группового времени запаздывания (ГВЗ) навигационных сигналов ГЛОНАСС в приёмном тракте аппаратуры от несущей частоты и типа данного сигнала. Сигнал может быть как с открытым, так и с санкционированным доступом. Следовательно, навигационные сигналы ГЛОНАСС на разных несущих частотах имеют неодинаковые значения ГВЗ в приёмном тракте НАП, и эти значения вносят вклад в погрешность измерения псевдодальности. Данная погрешность может достигать единиц метров для сигналов ГЛОНАСС в пределах одного частотного диапазона и превышать десятки метров для сигналов из различных частотных диапазонов. Такая погрешность носит преимущественно систематический характер и её можно определить по результатам калибровки. При этом калибровать необходимо все частотно-зависимые элементы НАП: приёмно-измерительное и антенно-фидерное устройства.

Приёмно-измерительные устройства НАП калибруют с применением специализированного оборудования – имитаторов сигналов глобальной навигационной спутниковой системы [2, 3]. Такой вид калибровки является основным для данных устройств. Имитаторы сигналов используют в качестве источников эталонных навигационных сигналов с известными параметрами, в том числе псевдодальностью.

Как отмечалось выше, инструментальная погрешность измерения псевдодальности НАП не должна превышать 0,2 м. Это означает, что и расширенная неопределённость калибровки НАП в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности не может превышать 0,2 м при коэффициенте охвата $k=2$. Такая неопределённость идентична суммарной неопределённости 0,1 м и менее. С учётом неопределённости калибровки антенно-фидерного устройства, равной 0,03 м [3], и других составляющих неопределённости, описанных в работе [4], имитатор сигналов должен обеспечивать инструментальную погрешность формирования псевдодальности не более 0,03 м, что эквивалентно погрешности формирования временного интервала не более 0,1 нс. Поскольку в радиочастотном тракте имитатора сигналов присутствует неравномерность ГВЗ навигационных сигналов, то он также подлежит калибровке в части систематической инструментальной погрешности формирования псевдодальности. При этом суммарная неопределённость калибровки не должна превышать 0,03 м, что эквивалентно погрешности формирования временного интервала 0,1 нс.

Методы калибровки имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. В настоящее время имитаторы сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) калибруют следующим образом:

с использованием опорного приёмника сигналов ГНСС;

с помощью цифрового запоминающего осциллографа (калибруют по минимуму амплитуды формируемого навигационного сигнала).

Первый метод характеризуется малыми материальными затратами, обеспечивает неопределённость калибровки порядка 0,3 м (эквивалентно 1 нс), но имеет существенный недостаток – фактически он оценивает не погрешность формирования псевдодальности, а разность этих погрешностей для калибруемого имитатора и имитатора, посредством которого был откалиброван опорный приёмник сигналов ГНСС. Другими словами, обеспечивается лишь оценка сходимости разных имитаторов сигналов, т. е. происходит так называемая «относительная калибровка». Надо заметить, что разные производители применяют для калибровки различные опорные приёмники сигналов ГНСС, что порождает расхождение систематических погрешностей формирования псевдодальностей между имитаторами сигналов неодинаковых типов.

Второй метод описанного выше недостатка лишён: выполняется так называемая «абсолютная калибровка». Однако при этом необходимо дорогостоящее оборудование, точность которого ниже требуемой, поскольку неопределённость калибровки составляет не менее 0,15 м (эквивалентно 0,5 нс). К тому же метод используют только при навигационных сигналах с одной квадратурной составляющей, что ограничивает возможность его применения, так как сигналы действующих ГНСС имеют как минимум две квадратурные составляющие.

Таким образом, в настоящее время ни один из методов не позволяет калибровать имитаторы сигналов ГНСС (далее – имитаторы сигналов) в части погрешности формирования псевдодальности с требуемой точностью для всех типов сигналов (в том числе, по разным квадратурам навигационного сигнала). Исходя из этого, необходимо разработать метод калибровки имитаторов сигналов в части погрешности формирования псевдодальности с неопределённостью не более 0,03 м (эквивалентно 0,1 нс). Новый метод также должен позволять проводить калибровку по навигационным сигналам, имеющим две квадратурные составляющие во всех частотных диапазонах действующих ГНСС. При этом необходимо обеспечить прослеживаемость результатов калибровки указанных имитаторов сигналов к государственным первичным эталонам единиц величин.

Предлагаемый метод калибровки имитаторов сигналов ГНСС. Наиболее полную математическую модель псевдодальности, формируемой имитатором сигналов, можно представить в следующем виде [1, 5]:

$$R_i = \rho_i + (t_{\text{НКА}_i} - t_{\text{НАП}})c + Tr_i + I_i + cb_i + \varepsilon, \quad (1)$$

где R_i – псевдодальность до i -го НКА; ρ_i – моделируемая геометрическая дальность до i -го НКА; $(t_{\text{НКА}_i} - t_{\text{НАП}})$ – моделируемая разность шкал времени i -го НКА и НАП с учётом релятивистской поправки к шкале времени НКА; c – скорость света;

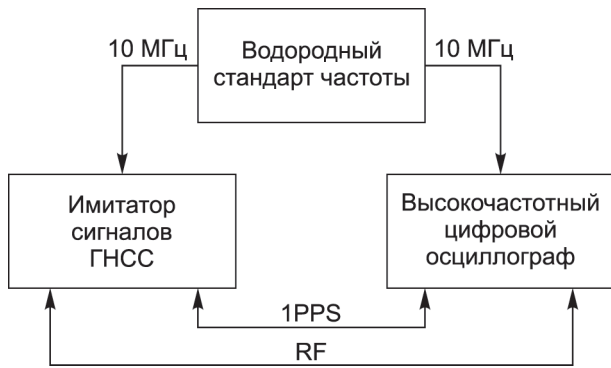


Рис. 1. Схема проведения измерений:

1PPS – сигнал секундной метки шкалы времени имитатора сигналов;
RF – навигационный сигнал, формируемый имитатором сигналов;
ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система

Tr_i , I_i – моделируемые задержки навигационного сигнала от i -го НКА в тропосфере и ионосфере, соответственно; ε – гауссов шум, обусловленный случайной составляющей погрешности воспроизведения псевдодальности; b_i – инструментальная погрешность формирования псевдодальности имитатором сигналов (неучтенная систематическая задержка в радиочастотном тракте); ε – гауссов шум, обусловленный случайной составляющей погрешности воспроизведения псевдодальности.

В общем случае погрешность b_i отличается для всех видов навигационных сигналов, имеющих различные частотные характеристики:

- для разных квадратурных составляющих навигационного сигнала, которые получаются при неодинаковой ширине спектра;
- для сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением;
- для сигналов в разных частотных диапазонах.

Для упрощения процедуры калибровки рекомендуется соблюдать следующие условия:

- шкалы времени приёмно-измерительного устройства и имитатора сигналов синхронизированы, т. е. $t_{\text{НКА}} = t_{\text{НАП}}$;
- имитатор сигналов формирует навигационный сигнал без погрешностей ЭВИ, а шкалы времени всех НКА синхронизированы между собой и со шкалой времени имитатора сигналов;
- имитатор сигналов формирует навигационный сигнал без задержек в тропосфере и ионосфере, т. е. $Tr_i = 0$ и $I_i = 0$;
- значения моделируемой геометрической дальности от НКА до НАП и скорости НКА относительно НАП нулевые, при этом влиянием релятивистских эффектов можно пренебречь.

Псевдодальность можно определить как интервал времени между моментом формирования сигнала НКА в бортовой шкале времени и моментом приёма того же сигнала потребителем в шкале времени потребителя [1, 6]. В этом случае математическую модель (1) псевдодальности T_i запишем как

$$T_i = [p_i + (t_{\text{НАП}} - t_{\text{НКА}})c + Tr_i + I_i + cb_i + \varepsilon] / c.$$

С учётом наложенных условий уравнение примет вид:

$$T_i = b_i + \varepsilon / c.$$

Таким образом, псевдодальность, формируемая имитатором сигналов, будет определяться инструментальной погрешностью, обусловленной влиянием шума. Определение инструментальной погрешности формирования псевдодальности сводится к оценке погрешности измерения временного интервала между шкалой времени имитатора сигналов и меткой времени в навигационном сигнале, соответствующей данной шкале.

Согласно структуре навигационного сигнала (на примере сигнала ГЛОНАСС), в конце каждой двухсекундной строки в кадре навигационного сообщения передаётся код метки времени, являющийся укороченной псевдослучайной последовательностью из тринадцати символов [7]. Задний фронт последнего символа соответствует окончанию очередного (от начала суток) двухсекундного интервала времени по шкале времени НКА. Навигационная информация, в свою очередь, дополнительно модулируется дальномерным кодом, который представляет собой М-последовательность из 511 элементов. Длительность дальномерного кода составляет 1 мс. Задний фронт последнего символа М-последовательности будет являться событием в навигационном сигнале, соответствующим секундной метке времени. Следовательно, необходимо измерить интервал времени между секундной меткой времени имитатора сигналов и задним фронтом последнего символа М-последовательности, которая соответствует окончанию строки в кадре навигационного сообщения.

Необходимо обратить внимание на следующие особенности. Во-первых, полученная двоичная последовательность модулирует гармонический сигнал, мощность которого очень мала: от -160 дБ/Вт на поверхности Земли для сигнала НКА и до -60 дБ/Вт для имитатора сигналов. Во-вторых, итоговый сигнал является суммой двух гармонических сигналов одной частоты, но смещённых по фазе на 90° и модулированных последовательностями разной частоты, т. е. в данном случае применяется квадратурное разделение двух сигналов. В ГЛОНАСС на разных квадратурах передаются сигналы с открытым и санкционированным доступом, частота дальномерного кода которых различна.

В результате из-за влияния шумов, низкой мощности сигнала, несовершенства модуляторов имитатора сигналов и существования двух квадратурных составляющих фазовый переход на экране высокочастотного осциллографа оказывается растянут по времени. Продолжительность фазовой манипуляции составляет несколько наносекунд, а положение перехода через ноль фронта модулирующей последовательности невозможно определить точнее 1 нс, тогда как требуемая погрешность должна быть не более 0,1 нс.

Для определения точного положения фронта модулирующей последовательности авторы предлагают следующий метод.

1. Собрать схему устройства (рис. 1), которое работает следующим образом: формируемые имитатором навигационный сигнал и сигнал шкалы времени подаются на разные каналы осциллографа, при этом имитатор и осциллограф используют внешний высокостабильный стандарт частоты в качестве источника опорной частоты. Необходимо предварительно измерить ГВЗ соединительных кабелей RF и 1PPS на соответствующих частотах с помощью векторного анализа

тора цепей. При этом имитатор должен формировать навигационный сигнал одного НКА с нулевой псевдодальностью. Имитатор и осциллограф используют стандарт частоты в качестве внешнего источника опорной частоты 10 МГц.

2. Записать выборку отсчётов, применив осциллограф с каналами 1PPS, RF. Тогда можно оцифровать в одной шкале времени высокочастотный сигнал имитатора и его секундную метку.

3. Определить начальную фазу и частоту несущего гармонического колебания. Для обеспечения стабильности измерений несущей частоты нужно обеспечить функционирование всех элементов схемы на частоте общего опорного генератора (водородного стандарта частоты).

4. Провести демодуляцию записанной выборки отсчётов, разделив квадратурные составляющие навигационного сигнала (при наличии начальной фазы и частоты несущей). Для отсекающей высокочастотной составляющей использовать сглаживающий цифровой фильтр метода наименьших квадратов 1-го порядка, так как он имеет вещественную передаточную функцию и не смещает точку перехода фронта через нуль.

5. Определить точку перехода фронта модулирующей последовательности через нуль.

Результаты математической обработки приведены на рис. 2, 3. На рис. 2 показан фрагмент навигационного сигнала, записанный с помощью аналого-цифрового преобразователя. На рисунках 3, а, б представлены синфазная и квадратурная составляющие демодулированного сигнала, соответственно. Кривой показан результат фильтрации – двоичная модулирующая последовательность. Из представленных результатов можно сделать вывод, что предложенный авторами метод позволяет определить момент перехода фронта модулирующей последовательности через нуль с погрешностью менее половины цены деления, т. е. половины периода дискретизации.

При апробации метода применяли осциллограф цифрового запоминающего устройства WaveMaster 820Zi (LeCroy, США) с частотой дискретизации 40 Гвыб./с, которая соответствует периоду дискретизации 25 пс. В качестве калибруемого средства измерений (СИ) использовали имитатор сигналов спутниковых навигационных систем GSS8000 (Spirent, Великобритания). Групповое время запаздывания измеряли с помощью векторного анализатора электрических цепей N5222A (KeySight, США). При этом для каждого СИ обеспечивали прослеживаемость к государственным первичным эталонам единиц величин. Расчёт неопределённости калибровки проводили по формуле

$$u = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2},$$

где u_{A1} , u_{A2} , u_{B1} , u_{B2} , u_{B3} – составляющие неопределённости от различных источников.

Итоговый бюджет неопределённости калибровки приведён в таблице. Неравномерность ГВЗ в разных каналах осциллографа,

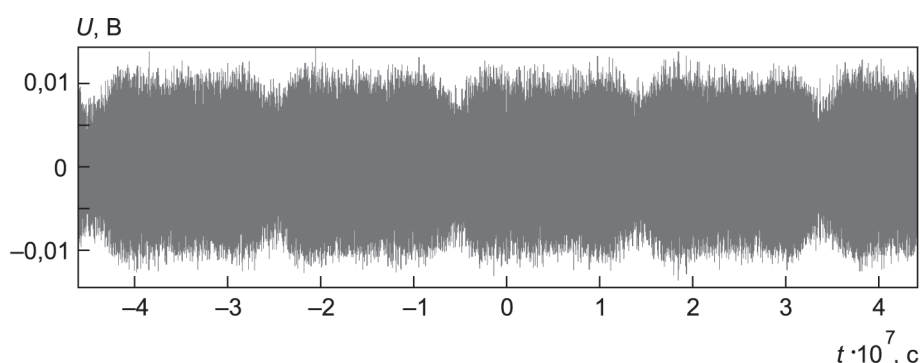


Рис. 2. Навигационный сигнал имитатора сигналов

возникающую при дополнительных измерениях, можно снизить до уровня, который соответствует величине, равной менее половины периода дискретизации, и не входит в итоговую неопределённость.

Из таблицы следует, что суммарная неопределённость калибровки не превысила 0,1 нс, что удовлетворяет заданному требованию. Основной вклад в неопределённость калибровки вносит погрешность измерения ГВЗ соединительных кабелей, а также инструментальная погрешность измерений осциллографа. Первую можно уменьшить с помощью температурной стабилизации аппаратуры и посредством увеличения времени измерений, а вторую – при использовании более точного осциллографа с высокой частотой дискретизации.

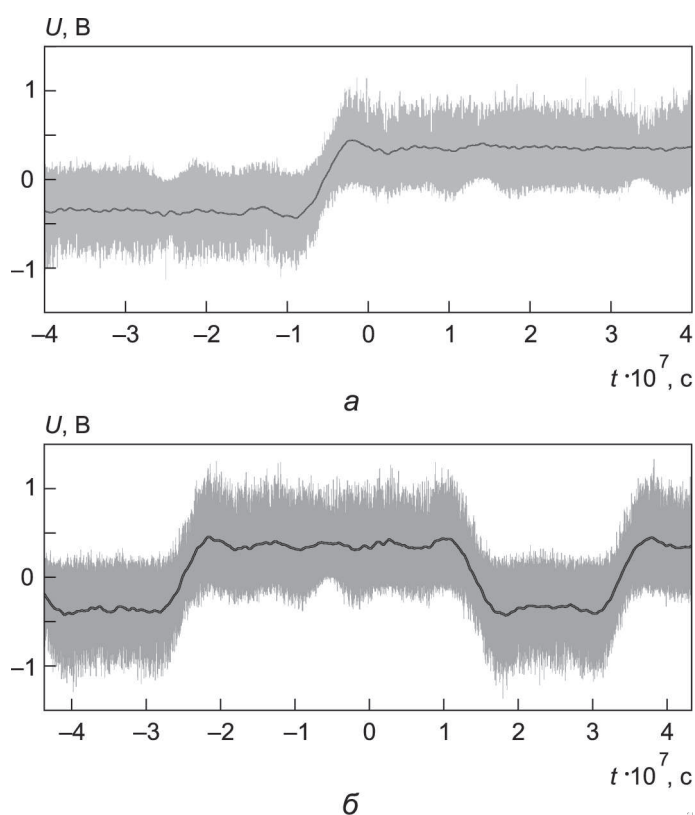


Рис. 3. Синфазная (а) и квадратурная (б) составляющие демодулированного навигационного сигнала имитатора

Бюджет неопределённости калибровки

Составляющая неопределённости	Источник неопределённости	Значение неопределённости, нс
u_{B1}	Измерения ГВЗ в соединительных кабелях векторного анализатора цепей	0,08
u_{B2}	Неравномерность ГВЗ в разных каналах осциллографа	$\leq 0,0125$
u_{B3}	Инструментальная погрешность измерений временных интервалов осциллографом	0,05
u_{A1}	Погрешность отсчёта	0,0125
u_{A2}	Дополнительные погрешности (погрешность, обусловленная дискретизацией по уровню, температурный шум, помехи)	0,02
Суммарная неопределённость, u_{Σ}	$\leq 0,10$	

Заключение. Для калибровки имитаторов сигналов ГНСС применено многоканальное высокочастотное аналого-цифровое преобразование с последующей демодуляцией оцифрованного сигнала. Это позволило уменьшить неопределённость калибровки до 0,1 нс (эквивалентно 0,03 м), в то время как при существующих методах калибровки обеспечивается неопределённость не менее 0,5 нс.

В результате проведённых исследований обеспечена прослеживаемость калибруемых имитаторов сигналов ГНСС в части погрешности формирования псевдодалности к государственным первичным эталонам единиц величин:

Государственному первичному эталону единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–2012;

Государственному первичному специальному эталону единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса от $4 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ с ГЭТ 182–2010;

Государственному первичному эталону единицы волнового сопротивления в коаксиальных волноводах ГЭТ 75–2011.

Разработанный метод калибровки имитаторов сигналов ГНСС позволил выполнить калибровку по навигационным сигналам с двумя квадратурными составляющими для всех частотных диапазонов действующих спутниковых систем, в то время как существующие методы обеспечивают калибровку только по навигационным сигналам с одной квадратурной составляющей.

Использование калиброванных имитаторов сигналов ГНСС позволит проводить калибровку НАП в части систематической погрешности измерения псевдодалности с точ-

ностью, необходимой для достижения потенциальной погрешности определения местоположения по сигналам ГЛОНАСС на текущем этапе развития системы.

Л и т е р а т у р а

1. Перов А. И., Харисов В. Н., ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования, М.: Радиотехника, 2010.

2. Денисенко О. В., Федотов В. Н., Сильвестров И. С., Смирнов Ф. Р., Баженов Н. Р., Гериева Л. Б. Обеспечение единства измерений при развитии и использовании ГЛОНАСС // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 17–21.

3. Денисенко О. В., Федотов В. Н., Сильвестров И. С. Основные направления развития комплекса средств метрологического обеспечения радиотехнических средств измерений и средств измерений длины в рамках системы ГЛОНАСС // Вестник метролога. 2013. № 4. С. 14–16.

4. Печерица Д. С., Федотов В. Н. Калибровка беззапросных измерительных систем ГЛОНАСС с обеспечением прослеживаемости к государственным первичным эталонам единиц величин // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение КВНО-2017: Тез. докл. VII науч.-техн. Всерос. конф. С.-Петербург, 2017.

5. Hoffman-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. Wien: Springer, 2008.

6. Поваляев А. А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. М.: Радиотехника, 2008.

7. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. М.: Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2008 [Электрон. ресурс]: http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (дата принятия: 10.01.2018).

Дата принятия: 16.03.2018.