

КАЛИБРОВКА НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Д.С. Печерица

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
pecheritsa_ds@vniiftri.ru*

Представлен метод и результаты калибровки НАП ГЛОНАСС в части систематической составляющей инструментальной погрешности измерения псевдодальности. Метод основан на применении средств, обеспечивающих прослеживаемость измеряемых величин к первичным эталонам единиц величин. Показаны результаты учета результатов калибровки на погрешность определения координат.

The method and results of NAP GLONASS calibration are presented in the part of the systematic component of instrument error of pseudo range measurement is presented. The method is based on application of means that ensure the traceability of the measured values to the primary standards of units of values. The results based on calibration results for the error in determining the coordinates are shown.

Ключевые слова: ГНСС, ГЛОНАСС, НАП, имитатор сигналов ГНСС, навигационный сигнал.

Key words: GNSS, GLONASS, NAP, simulator of GNSS signals, navigation signal.

1. Введение

Основное назначение навигационной аппаратуры потребителей (НАП) системы ГЛОНАСС — приём и обработка радиосигналов навигационных космических аппаратов (НКА) системы с целью определения пространственно-временных координат потребителя, его вектора скорости, пространственной ориентации и т.п.

Самый распространённый метод решения навигационной задачи — псевдодальномерный — основан на измерении псевдодальности до НКА с известным положением и последующим расчётом своих пространственно-временных координат. Псевдодальность — это дальность, измеренная беззапросным методом, то есть сумма времени распространения сигнала и разности шкал времени источника сигнала (НКА) и приёмника (НАП).

Общая погрешность определения положения псевдодальномерным методом описывается выражением:

$$\Delta POS = \Delta R \cdot PDOP,$$

где ΔR — погрешность измерения псевдодальности, PDOP (Position Dilution of Precision) — пространственный геометрический фактор.

В свою очередь, погрешность измерения псевдодальности включает несколько основных составляющих и может быть представлена в виде выражения:

$$\Delta R = \Delta_{eph} + \Delta_{atm} + \Delta_{rel} + \Delta_M + \Delta_{REC} + \varepsilon_R,$$

где Δ_{eph} — вклад в погрешность измерения псевдодальности за счёт эфемеридно-временного обеспечения (далее — ЭВИ); Δ_{atm} — вклад за счёт задержек навигационного сигнала (далее — НС) в атмосфере; Δ_{rel} — вклад за счёт релятивистских и гравитационных эффектов (далее — РГЭ); Δ_M — вклад за счёт многолучевого распространения НС; Δ_{REC} — вклад за счёт инструментальной (аппаратурной) погрешности измерения псевдодальности; ε_R — прочие составляющие погрешности.

Все описанные составляющие сведены в общую таблицу 1. Остаточные значения каждой погрешности приведены в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Составляющие погрешности измерений псевдодальности НАП

Источник погрешности	Остаточное значение	Способ компенсации
ЭВИ (погрешность космического сегмента)	0,7	
Атмосфера	0,4	Двухчастотные измерения, применение моделей [1], [2], [3]
РГЭ	0,1	Применение моделей [3]
Многолучевое распространение	0,5	Конструкция антенны, алгоритмы обработки [1], [2], [3]
Инструментальная погрешность	>2	

Из таблицы видно, что с учетом перспектив развития системы ГЛОНАСС в 2018 г. инструментальная погрешность НАП вносит наиболее существенный вклад в общую погрешность измерения псевдодальности.

Для достижения потенциальной точности определения местоположения (времени), которую потребитель может получить при приеме сигналов ГЛОНАСС, необходимо обеспечить значение инструментальной погрешности измерений псевдодальности НАП, существенно малое по сравнению с погрешностью измерений за счет бортовой ЭВИ (минимум в 3 раза меньше). Таким образом, требования к инструментальной погрешности измерений псевдодальности НАП могут быть установлены значением 0,2 м (для требований к системе 2018 года).

Основная причина инструментальной погрешности НАП — задержка навигационного сигнала в тракте НАП. Радиочастотный тракт НАП включает в себя частотно-зависимые элементы, задержка распространения навигационного радиосигнала в которых зависит от спектральных характеристик сигнала. Поскольку в системе ГЛОНАСС применяется частотное разделение сигналов в нескольких диапазонах частот, задержка для всех принимаемых сигналов будет разной, что обуславливает наличие инструментальной погрешности измерения псевдодальности НАП. Значения этой погрешности могут достигать единиц метров для разных литер в пределах одного частотного диапазона и превышать десять метров для сигналов из разных частотных диапазонов. В силу своей природы, инструментальная погрешность НАП имеет систематический характер, а значит, может быть определена по результатам калибровки и учтена в измерениях. Под калибровкой здесь и далее понимается процедура определения систематической составляющей инструментальной погрешности измерения псевдодальности.

Поскольку необходимо обеспечить остаточную инструментальную погрешность измерения псевдодальности НАП не более 0,2 м, следовательно, суммарная стандартная неопределённость калибровки НАП не должна превышать 0,1 м (при коэффициенте охвата 2).

2. Метод калибровки НАП

Как было показано выше, измеренная псевдодальность имеет систематическую погрешность b , значение которой зависит от рабочей частоты навигационного сигнала и обусловлено частотной зависимостью ГВЗ в радиочастотном тракте НАП. Радиочастотный тракт можно разделить на две основные составляющие: антенно-фидерное устройство (АФУ) с кабелем и тракт приёмно-измерительного устройства. Очевидно, что каждый компонент вносит свой вклад в общую систематическую погрешность измерений псевдодальности. Таким образом, калибровка НАП в части систематической составляющей инструментальной погрешности измерения псевдодальности заключается к калибровке отдельных составных частей.

Калибровка АФУ также сводится к измерению ГВЗ в тракте антенны для разных значений рабочих частот, разных углов места и азимута. Измерения проводятся с помощью специально разработанного комплекса аппаратуры для измерения параметров антенно-фидерных устройств (КИП АФУ). В состав комплекса входит в том числе и эталон единицы группового времени запаздывания в антеннах навигационной аппаратуры потребителя в диапазоне частот от 1,1 до 1,7 ГГц, который прослеживается к первичному специальному эталону единиц длины ГЭТ 199-2018 и первичному эталону единицы волнового сопротивления в коаксиальных волноводах ГЭТ 75-2011.

Метод калибровки приёмно-измерительного устройства основан на полунатурном моделировании навигационного сигнала с применением имитаторов сигналов ГНСС, которые выступают в качестве источников эталонного навигационного сигнала. Схема измерений показана на рисунке 1.

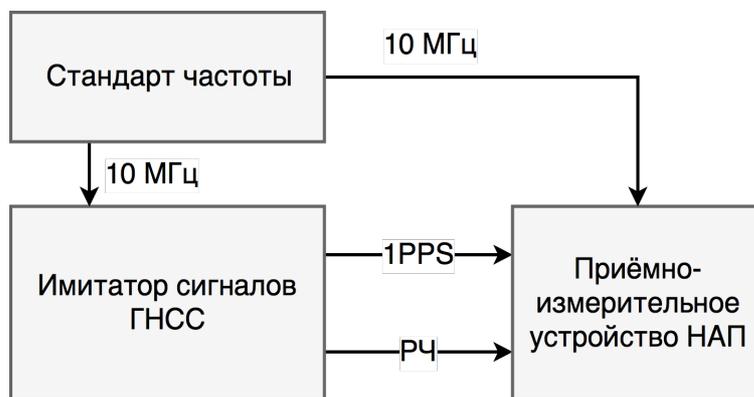


Рис. 1. Схема измерений

Как показано на схеме, имитатор и приёмное устройство используют общую опорную частоту, и их шкалы времени синхронизированы. То есть шкала времени (ШВ) имитатора является одновременно и ШВ системы, и ШВ потребителя. Это позволяет устранить составляющую псевдодальности, обусловленную разностью этих шкал времени.

На имитаторе задаётся формирование сценария навигационной обстановки со следующими параметрами:

- модель движения — твёрдая точка;
- формируемые сигналы — все, которые может принимать приёмно-измерительное устройство НАП;
- формирование атмосферных эффектов отключено;
- формирование погрешностей эфемеридно-временного обеспечения отключено.

При учёте изложенных условий, модель формируемой псевдодальности на каждый момент времени имеет следующий вид:

$$R_{IM,i}(j) = \rho_i(j) + b_{IM,i} + \varepsilon_{IM}, \quad (1)$$

где i соответствует комбинации конкретного НКА и вида сигналов (например, сигнал стандартной точности в частотном диапазоне L1 НКА № 1 системы ГЛОНАСС);

j — номер эпохи, на которую получены измерения;

$R_{IM,i}(j)$ — формируемая псевдодальность;

$\rho_i(j)$ — формируемая геометрическая дальность;

$b_{IM,i}$ — систематическая составляющая инструментальной погрешности формирования псевдодальности имитатором сигналов ГНСС, выраженная в метрах;

ε_{IM} — случайная составляющая погрешности формирования псевдодальности, нормально распределённый случайный процесс.

В свою очередь, псевдодальность, измеренная приёмно-измерительным устройством (ПИУ) по сигналам имитатора, будет описываться так:

$$R_{rec,i}(j) = \rho_i(j) + b_{IM,i} + \varepsilon_{IM} + b_{НАП,i} + \varepsilon_{НАП}, \quad (2)$$

где $R_{rec,i}(j)$ — измеренная приёмно-измерительным устройством псевдодальность;

$b_{rec,i}$ — систематическая инструментальная погрешность измерений псевдодальности приёмно-измерительным устройством, выраженная в метрах;

ε_{rec} — случайная составляющая погрешности измерения псевдодальности, нормально распределённый случайный процесс.

Измерения проводятся на интервале не менее суток, чтобы обеспечить измерения по всем НКА. Для оценки стабильности $b_{rec,i}$ измерения необходимо проводить на восьмисуточном интервале, поскольку за этот срок спутниковая группировка ГНСС ГЛОНАСС полностью повторится [1].

Разница измерений псевдодальности приёмным устройством и эталонных данных с имитатора в соответствии с формулами (1), (2) будет описываться следующим выражением:

$$R_{rec,i}(j) - R_{IM,i}(j) = -b_{IM,i} - b_{rec,i} - \varepsilon,$$

где ε — суммарная случайная погрешность псевдодальности имитатора и приёмно-измерительного устройства. Нормально распределённый случайный процесс.

Шум измерений ε устраняется с помощью статистической обработки [4]. Тогда значение $b_{rec,i}$ можно найти по формуле:

$$b_{rec,i} = -b_{IM,i} - \sum_{j=1}^N (R_{rec,i}(j) - R_{IM,i}(j)),$$

Как показано выше, систематическая инструментальная погрешность НАП обусловлена суммарной задержкой распространения навигационного сигнала в тракте антенно-фидерного устройства и приёмно-измерительного устройства. Таким образом, систематическая инструментальная погрешность НАП определяется следующим выражением:

$$b_i = b_{A,i} \cdot c - b_{IM,i} - \sum_{j=1}^N (R_{rec,i}(j) - R_{IM,i}(j)), \quad (3)$$

где c — скорость света;

$b_{A,i}$ — задержка распространения i -го навигационного сигнала в тракте АФУ, умноженная на скорость света;

$b_{IM,i}$ — систематическая инструментальная погрешность формирования псевдодальности имитатором сигналов ГНСС [5].

В соответствии с формулой (3) рассчитан бюджет неопределённости калибровки, который приведён в таблице 2 [6].

Таблица 2

Бюджет неопределённости калибровки НАП

Источник неопределённости	Абсолютное значение, м	Примечание
Неопределённость калибровки АФУ	0,045	Стандартная неопределённость измерений КИП АФУ. Обозначение $u_B(A)$
Систематическая погрешность формирования псевдодальности имитатором сигналов	0,03	Неопределённость калибровки имитатора сигналов ГНСС. Обозначение $u_B(IM)$
Остальные погрешности	0,02	Стандартная неопределённость по типу А. Обозначение u_A
Итого	<0,06	

Итоговая неопределённость калибровки рассчитывается по формуле (4) [6].

$$u_{\text{НАП}} = \sqrt{u_B^2(A) + u_B^2(IM) + u_A^2} \quad (4)$$

Итоговая неопределённость калибровки навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС в части систематической составляющей инструментальной погрешности измерения псевдодальности не превышает 0,06 м.

3. Результаты апробации

Влияние учёта калибровочных поправок к систематической составляющей инструментальной погрешности измерения псевдодальности НАП на погрешность решения навигационной задачи показаны на рисунках 2, 3. На графиках показаны погрешности определения координат в плане в статическом режиме на геодезическом пункте с известными координатами. Решение навигационной задачи проводилось методом наименьших квадратов в двухчастотном режиме на суточном интервале 30 с по сигналам ГЛОНАСС с открытым доступом с привлечением апостериорной эфемеридно-временной информации. На рисунке 2 показан результат решения навигационной задачи без учёта калибровочных поправок, на рисунке 3 — с учётом. Центр мишени — истинное положение НАП.

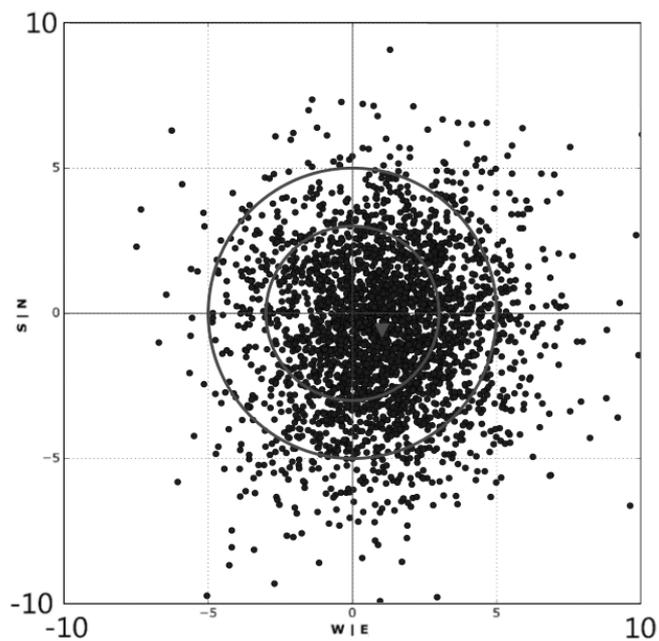


Рис. 2. Погрешность определения координат в плане без учета калибровочных поправок в метрах

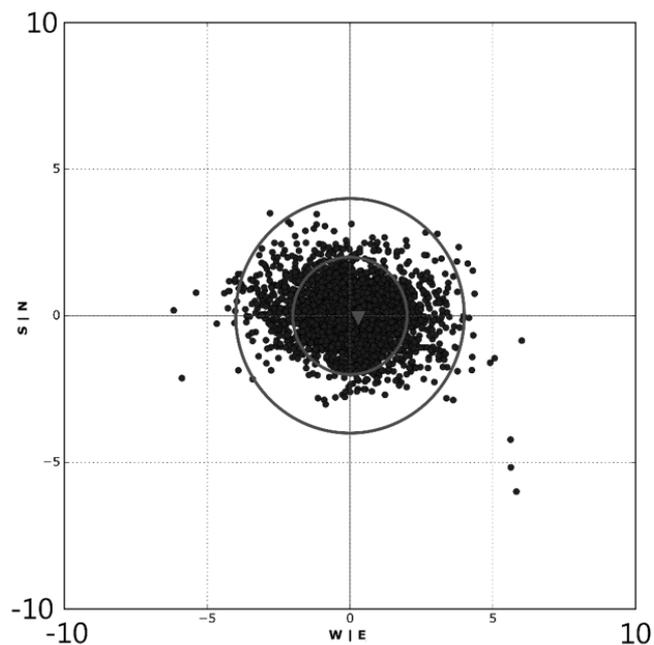


Рис. 3. Погрешность определения координат в плане с учетом калибровочных поправок в метрах

СКО погрешности определения координат в плане уменьшилась с 3,6 до 2,2 м, т.е. более чем на 30 %.

4. Заключение

В статье показан разработанный метод калибровки навигационной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС в части систематической составляющей инструментальной погрешности измерения псевдодальности с прослеживаемостью до первичных эталонов единиц величин Российской Федерации. Расчётная неопределённость метода не превышает 0,06 м в случае прямой калибровки. Учёт калибровочных поправок к измерениям псевдодальности НАП ГЛОНАСС обеспечивает повышение точности определения местоположения на 30 % и более.

Литература

1. Перов А.И., Харисов В.Н. Принципы построения и функционирования / ред., ГЛОНАСС. — М.: Радиотехника, 2010.
2. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS — global navigation satellite systems. GPS, GLONASS, GALILEO and more. — Wien: SpringerWienNewYork, 2008.
3. Subirana J. Sanz, Zornoza J.M. Juan, Hernández-Pajares M. GNSS data processing, volume I: Fundamentals and algorithm. — Noordwijk: ESA Communications, 2013.
4. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
5. Печерица Д.С., Федотов В.Н. Калибровка имитаторов сигналов ГНСС. Системный анализ, управление и навигация: тезисы докладов. — М.: Издательство МАИ, 2016. — 184 с.
6. ГОСТ 54500.3-2011-3 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. — 2011.