

УДК 621.376.4

КАЛИБРОВКА НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГНСС ПО ФАЗОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ПСЕВДОДАЛЬНОСТИ

С.Ю. Бурцев, Д.С. Печерица

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

Аннотация. Для получения высокоточных координат в режиме кинематики реального времени RTK и методом PPP используются измерения навигационной аппаратуры потребителей по фазе несущей частоты. В статье рассматривается калибровка навигационной аппаратуры потребителей по фазе несущей частоты с использованием имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем с обеспечением прослеживаемости измерений к первичному эталону по государственной поверочной схеме для координатно-временных измерений. В работе представлен метод определения межлитерной и межспутниковой зависимости измерений псевдодальности по фазе несущей частоты.

Ключевые слова: навигационная аппаратура, калибровка, метод, имитатор навигационных сигналов.

RECEIVER CALIBRATION BASED ON PSEUDORANGE MEASUREMENTS BY CARRIER PHASE

S.Yu. Burtsev, D.S. Pecheritsa

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
burtsevsky@vniiftri.ru,
pecheritsa_ds@vniiftri.ru

Annotation. GNSS-receivers carrier phase measurements are necessary in Real Time Kinematic (RTK) and Precise Point Positioning (PPP) technologies. The article discusses the receiver calibration in the carrier frequency phase using simulators of global navigation satellite systems signals with ensuring traceability of measurements to the primary standard according to the state calibration scheme for coordinate-time measurements. The paper presents a method for determining the inter-frequency slots and intersatellite dependence of pseudorange measurements in the carrier phase.

Key words: navigation equipment, calibration, method, navigation signals simulator.

Введение

Измерения навигационной аппаратуры потребителей (НАП) псевдодальности по фазе несущей частоты имеют пренебрежимо малый шум и поэтому широко применяются в задачах относительных навигационных определений и высокоточных навигационно-временных определений (метод PPP).

Для реализации наиболее перспективной технологии interger-PPP требуется однородность фазовых задержек в приёмниках базовой сети и ровера, что может быть обеспечено проведением калибровки навигационных приёмников по фазе несущей частоты [1, 2].

В радионавигации под фазой несущей частоты понимают разность между фазой сигнала, созданного в приёмнике в момент приёма сигнала, и фазой сигнала, созданного на спутнике в момент передачи сигнала.

При фазовых измерениях имеют дело с гармоническими колебаниями, не имеющих начала отсчёта, что приводит к проблеме разрешения фазовой неоднозначности результатов измерений.

Калибровка НАП включает в себя совокупность операций по измерению группового времени запаздывания в антенно-фидерном тракте и определение калибровочных поправок приёмно-измерительного устройства в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности [3–5].

Калибровочные поправки НАП различают по видам:

- междиапазонные: для сигналов одной или нескольких спутниковых навигационных систем (между частотными диапазонами L1, L2 и др.);
- межлитерные: для сигналов с частотным разделением в одном частотном диапазоне;
- межаппаратные: для сигналов с кодовым разделением.

Для обеспечения единства измерений и прослеживаемости результатов измерений к первичным эталонам единиц величин калибровку НАП необходимо проводить средствами измерений, отвечающими характеристикам рабочих эталонов согласно Государственной поверочной схеме для координатно-временных измерений. Такими средствами измерений являются имитаторы навигационных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Имитаторы предназначены для моделирования созвездия навигационных космических аппаратов (НКА) ГНСС с воспроизведением навигационных сигналов при разработке, отладке и оценке точностных характеристик НАП. Имитаторы позволяют получить навигационный сигнал с большим отношением сигнал/шум, что дает возможность определить инструментальную погрешность измерений НАП и калибровочные поправки с высокой точностью [6].

Метод калибровки имитатора в части формирования псевдодальности по фазе несущей частоты основан на определении абсолютного значения разности фаз между сигналом несущей и математически синтезируемым образцовым сигналом с нулевой начальной фазой той же частоты и амплитуды, что и несущая, и заключается в определении дробной части цикла несущей частоты в радиочастотном (РЧ) тракте имитатора.

Фаза несущей частоты (в циклах) равна разности между фазой сигнала, созданного в приёмнике в момент приёма сигнала, и фазой сигнала, созданного на спутнике в момент передачи сигнала. Во время приёма навигационного сигнала со спутника может измеряться только дробная часть фазы, при этом целое число длин волн остается неизвестным.

В общем виде оценённое навигационным приёмником значение фазы несущей может быть представлено дробной и целой частями циклов несущей частоты:

$$\hat{N}_\lambda = p_\varphi + \Phi, \tag{1}$$

где p_φ — дробная часть цикла, измеренная навигационным приёмником; Φ — целое число циклов.

При калибровке НАП на имитаторе сигналов ГНСС соотношение дробных частей может быть представлено выражением, куда входят дробные части цикла несущей в РЧ-тракте навигационного приёмника, имитатора и в измерительном кабеле:

$$p_\varphi + b_{\varphi RX} = \text{mod}(P, \lambda) + b_{\varphi S} + b_{\varphi c}, \tag{2}$$

где $b_{\varphi RX}$ — дробная часть цикла несущей частоты в РЧ-тракте навигационного приёмника; P — псевдодальность, формируемая имитатором; λ — длина волны несущей частоты; $b_{\varphi S}$ — дробная часть цикла несущей частоты в РЧ-тракте имитатора; $b_{\varphi c}$ — дробная часть цикла несущей частоты в измерительном кабеле.

Таким образом, дробная часть цикла несущей частоты в РЧ-тракте навигационного приёмника может быть найдена из уравнения:

$$b_{\varphi RX} = \text{mod}(P, \lambda) - p_\varphi + b_{\varphi S} + b_{\varphi c}. \tag{3}$$

Дробная часть цикла несущей частоты в РЧ-тракте навигационного приёмника является калибровочной поправкой к измеренному значению фазы несущей частоты НАП.

Апробация метода

Опробование метода калибровки навигационного приёмника по фазе несущей частоты было проведено по схеме подключения, представленной на рис. 1.

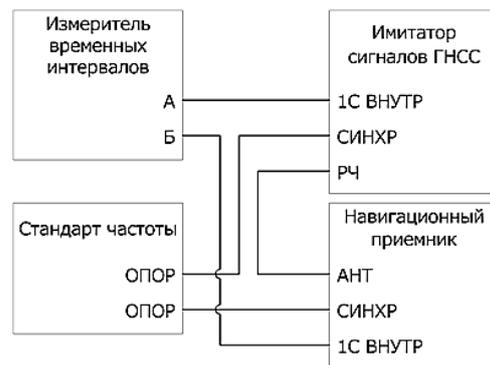


Рис. 1. Структурная схема подключения навигационного приёмника для проведения калибровки

Синхронизация шкал имитатора навигационного сигнала и навигационного приёмника обеспечена стандартом частоты. Учёт расхождения шкал времени имитатора и навигационного приёмника ведётся измерителем временных интервалов для расчёта калибровочной поправки к измеренной псевдодальности.

Параметры сценария имитатора навигационных сигналов включают полную текущую группировку спутниковых навигационных систем GPS, ГЛОНАСС для неподвижного объекта без затенения и отсутствия влияния тропосферы, ионосферы и многолучевости на распространение навигационного сигнала.

Была реализована следующая хронология эксперимента калибровки НАП для опробования метода:

- 1) проведение измерений НАП на сценарии длительностью 20 ч (результатам измерений присвоен индекс «А»);
- 2) перезапуск имитатора и «холодный» перезапуск НАП;
- 3) проведение измерений НАП на сценарии длительностью 8 ч (результатам измерений присвоен индекс «Б»);
- 4) «горячий» перезапуск НАП;
- 5) проведения измерений НАП на сценарии длительностью 16 ч (результатам измерений присвоен индекс «В»).

Изначально эксперимент был проведён с использованием имитатора сигналов № 1.

Результаты измерения «А» для НКА № 19 (литера +3) ГНСС GPS и ГЛОНАСС представлены на рис. 2.

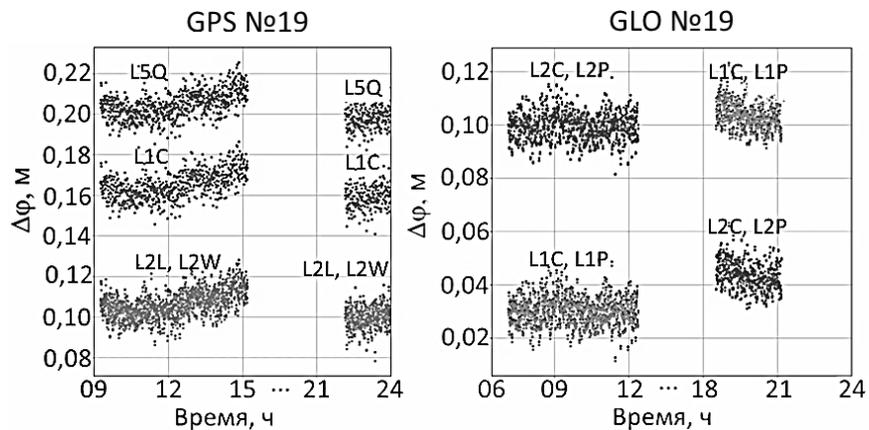


Рис. 2. Первые разности измерений НАП по фазе несущей частоты на имитаторе сигналов № 1

Разрыв измерений на графиках показывает уход навигационного аппарата за горизонт из зоны видимости и затем снова его появление на небосводе. На графиках отчётливо видны нестационарность процессов и скачок измерений фазы несущей НКА ГЛОНАСС после появления его в зоне видимости НАП.

Нестационарность процессов могла быть обусловлена как плохим формирователем имитатора, так и неточными измерениями самого навигационного приёмника.

Скачок измерений фазы несущей частоты для сигналов в диапазоне L1 — приблизительно 7 см, в диапазоне L2 — минус 6 см, что не соответствует длинам волн в этих диапазонах частот (длина волны в диапазоне частот L1 составляет 18,7 см, в диапазоне L2 — 24 см). Учитывая дополнительно тот факт, что навигационный приёмник проводит измерения относительно своего опорного генератора, синхронного с опорным генератором имитатора (см. рис. 1), скачок измерений фазы связан с работой формирователя навигационного сигнала имитатора.

Повторяемость результатов калибровки имитатора сигналов № 1 по фазе несущей частоты не подтвердилась после перезапуска имитатора, что показало невозможность использования данного имитатора для калибровки НАП по фазовым измерениям псевдодальности [7, 8].

Вторым имитатором для апробации метода калибровки НАП по фазе несущей частоты был выбран имитатор сигналов № 2, калибровка которого по фазе несущей частоты подтвердила повторяемость результатов измерений и представлена в таблице 1.

Таблица 1

Оценка повторяемости результатов калибровки имитатора сигналов № 2 по фазе несущей частоты

ГНСС	Литера/Номер НКА	φ_1 , мм	φ_2 , мм	$\Delta\varphi$, мм
GLO L1 F	-7	10,74	10,93	0,19
GLO L1 F	0	37,50	37,52	0,02
GLO L1 F	6	6,93	7,00	0,07
GLO L2 F	-7	36,36	36,38	0,02
GLO L2 F	0	5,50	5,61	0,11
GLO L2 F	6	30,51	30,63	0,12
GPS L1	10	5,12	5,14	0,02
GPS L2C	10	0,47	0,48	0,01
GPS L5	10	19,22	19,16	-0,06
φ_1 — измерение дробной части фазы несущей имитатора до перезагрузки; φ_2 — после перезагрузки; $\Delta\varphi$ — разница результатов измерений				

По результатам калибровки имитатора сигналов № 2 был подтверждён фазовый шум (среднее квадратическое отклонение) 0,02 рад, заявленный производителем.

Результаты измерений НАП по фазе несущей частоты навигационных сигналов GPS и ГЛОНАСС в диапазоне L1 на имитаторе сигналов № 2 представлены на рис. 3, 4. Измерения НАП по фазе несущей частоты лежат в пределах длины волны навигационного сигнала, что было учтено при построении зависимости измерений по фазе несущей частоты от литеры НКА ГНСС ГЛОНАСС.

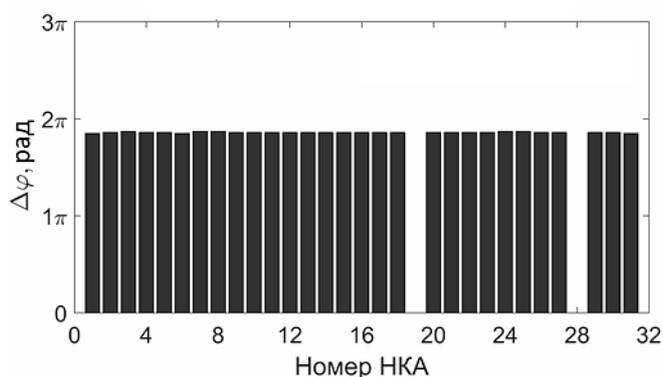


Рис. 3. Первые разности измерений по фазе несущей частоты ГНСС GPS в диапазоне L1. Измерения «А»

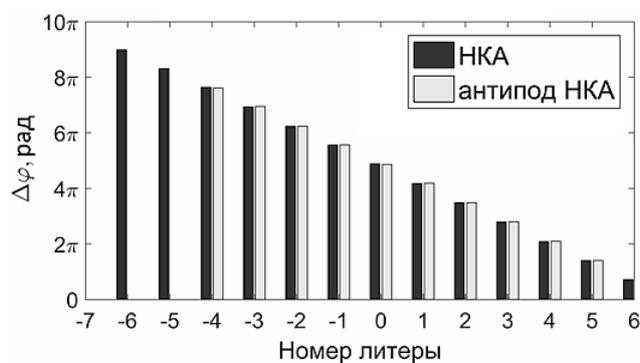


Рис. 4. Первые разности измерений по фазе несущей частоты ГНСС ГЛОНАСС в диапазоне L1. Измерения «А»

В таблице 2 представлены результаты измерений по фазе несущей частоты НКА ГНСС GPS.

Таблица 2

Оценки результатов измерений по фазе несущей частоты на имитаторе сигналов № 2

ГНСС	Оценка	Измерения		
		«А»	«Б»	«В»
GPS L1	М, рад	5,847	3,873	2,018
	СКО, рад	0,017	0,087	0,045
GPS L2	М, рад	4,271	4,698	3,286
	СКО, рад	0,018	0,098	0,043
GPS L5	М, рад	2,109	5,661	1,662
	СКО, рад	0,013	0,074	0,034

Максимальная разница результатов измерений по фазе несущей частоты ($P-P$) между антиподами НКА ГНСС ГЛОНАСС и изменение фазо-частотной характеристики тракта навигационного приёмника (r) представлены в таблице 3.

Таблица 3

Максимальная разница результатов измерений по фазе несущей частоты между антиподами НКА ГНСС ГЛОНАСС

ГНСС	Оценка	Измерения		
		«А»	«Б»	«В»
GLO L1	$P-P$, мм	1	7	3
	r , рад/МГц	3,870	3,865	3,851
GLO L2	$P-P$, мм	1	8	3
	r , рад/МГц	0,679	0,670	0,688

В таблице 4 приведена разница между проведёнными сериями измерений с использованием имитатора сигналов № 2.

Таблица 4

Разница результатов серий измерений по фазе несущей частоты ГНСС GPS

ГНСС	Оценка	Измерения		
		«А»–«Б»	«А»–«В»	«Б»–«В»
GPS L1	ΔM , рад	1,974	3,829	1,855
GPS L2	ΔM , рад	-0,427	0,985	1,412
GPS L5	ΔM , рад	-3,552	0,447	3,999

Анализ абсолютных разностей (средних значений) между проведёнными сериями измерений показывает отсутствие требуемой повторяемости результатов измерений навигационным приёмником фазы несущей частоты для исследуемых спутниковых группировок (не более ± 2 см).

В то же время сравнение измерений «А», «Б» и «В» по фазе несущей частоты показывает:

- точность измерений возрастает с увеличением интервала наблюдения;
- повторяемость измерений по фазе несущей частоты между литерами ГНСС ГЛОНАСС сохраняется после перезапуска навигационного приёмника и имитатора навигационных сигналов в пределах ± 1 см, что позволяет получить межлитерные калибровочные поправки для навигационных сигналов с частотным разделением;
- при включении и перезапуске навигационного приёмника не обеспечивается повторяемость измерений по фазе несущей частоты между диапазонами в пределах ± 2 см;
- не обнаружено систематической разницы между формированием имитатором и измерением навигационным приёмником навигационных сигналов НКА ГНСС ГЛОНАСС и его антипода.

Выводы и заключение

Разработанный метод возможно реализовать на имитаторе навигационных сигналов, схемотехника которого обеспечивает привязку фазы несущей частоты к фронту выходного импульсного сигнала 1 Гц (с пределом погрешности ± 1 мм), что позволяет получить повторяемость калибровочных поправок имитатора по фазе несущей частоты.

Представленный метод позволяет калибровать НАП при условии привязки измерений фазы несущей частоты в приёмнике к определённому событию, например, формированию внутренней шкалы времени или переходу через «нуль» опорного сигнала задающего генератора приёмника.

В настоящее время реализация предложенного метода ограничена схемотехникой средств измерений. Предложенный метод позволяет получить межлитерные калибровочные поправки.

Список литературы

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and practice. — Wienn, New York: Springer, 2001. — 384 p.
2. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. — Т. 1. — М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. — 334 с.
3. Beer S., Wanninger L. Temporal Stability of GPS Transmitter Group Delay Variations // *Sensors*. — 2018. — 18 (6). — 1744.
4. Печерица Д.С., Федотов В.Н. Калибровка беззапросных измерительных систем ГЛОНАСС с обеспечением прослеживаемости к государственным первичным эталонам единиц величин // Труды VII Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение». — СПб.: ИПА РАН, 2017. — С. 204–205.
5. Powers E.D., Miranian M., White J., Brad J. Absolute Time Error Calibration of GPS Receivers Using Advanced GPS Simulators // *Proceedings of the 29th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*. — California, 1997. — P. 193–200.
6. Fischer J., Perdue L. A Calibrated Precision GNSS Simulator for Timing Applications // *Proceedings of the 45th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*. — Washington, 2013. — P. 107–111.
7. Pecheritsa D.S., Burtsev S.Yu., Frolov A.A. Method for Determining the Fractional Part of the Cycle of the Carrier Frequency of the Navigation Signal of the GNSS Signal Simulator // *Measurement Techniques*. — 2021. — V. 63. — No. 11. — P. 891–898.
8. Бурцев С.Ю., Печерица Д.С., Федотов В.Н. ПМО оценки погрешности формирования псевдодальности имитатора сигналов ГНСС. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021619933. — 18.06.2021.

Статья поступила в редакцию: 30.08.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 28.09.2021 г.

Статья принята в работу: 22.10.2021 г.