

А. О. Маликов^{1✉}, С. В. Долин¹

Совершенствование метода PPP для обработки ГНСС-измерений со смартфонов нового поколения

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.o.malikov@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается модификация алгоритма метода Precise Point Positioning (PPP) для обработки сигналов на частотах L1 и L5 в контексте внедрения нового сигнала L5 в спутниковую навигацию. Исследование направлено на адаптацию существующих методов обработки ГНСС-измерений, полученных на новых частотах. Основные задачи исследования включают реализацию ионосферно-свободной линейной комбинации в методе PPP с использованием измерений на частотах L1 и L5, а также учёт дифференциальных кодовых задержек в межсистемных измерениях. Модификация алгоритма позволяет использовать смартфоны нового поколения в высокоточном позиционировании, поскольку они поддерживают двухчастотные мультисистемные измерения. Приведены результаты обработки наблюдений со смартфона Mi 8 с помощью модифицированного алгоритма в статическом и кинематическом режимах, выполнена оценка точности.

Ключевые слова: ГНСС, Precise Point Positioning, RTKLIB, мультичастотные измерения, дифференциальные кодовые задержки

A. O. Malikov^{1✉}, S. V. Dolin¹

Improvement of the PPP method for processing GNSS data acquired by next-generation smartphones

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.o.malikov@mail.ru

Abstract. The article presents a modification of the Precise Point Positioning (PPP) algorithm for processing signals at L1 and L5 frequencies in the context of the implementation of the new L5 signal in satellite navigation systems. The research directed to adapt existing methods for processing GNSS measurements obtained at new frequencies. The main objectives of the study include the implementation of an ionosphere-free linear combination in the PPP method using measurements at L1 and L5 frequencies, and applying differential code biases in inter-system measurements. The modified algorithm enables the use of next-generation smartphones for precise positioning, as they support dual-frequency multi-system measurements. Results from processing observations collected with the Mi 8 smartphone using the modified algorithm in both static and kinematic modes are presented, along with an assessment of accuracy.

Keywords: GNSS, Precise Point Positioning, RTKLIB, multi-frequency measurements, differential code bias

Введение

С запуском блока ИФ космической спутниковой группировки GPS 28 мая 2010 года введен в эксплуатацию новый сигнал L5. Сигнал L5, центрированный

на частоте 1176.45 МГц, обладает большей длиной волны, чем L1 и L2, что облегчает разрешение неоднозначности, и обеспечивает защищённость от помех, связанных с переотражением сигнала. В настоящее время спутники навигационных систем Galileo, QZSS, BeiDou, а также часть космических аппаратов GPS осуществляют передачу сигналов на частоте L5. С момента введения данных КА в эксплуатацию в ГНСС-сегменте геодезического рынка доступны устройства, способные принимать и обрабатывать сигналы в новых частотных диапазонах. К таким устройствам относятся смартфоны нового поколения, оснащенные двухчастотными ГНСС-чипами, которые поддерживают обработку сигналов на частотах L1 и L5. Согласно отчёту Агентства по космической программе Евросоюза за 2024 год (EUSPA EO and GNSS Market Report 2024) [1], смартфоны составляют около 80 % от общего объёма поставок ГНСС-устройств. Смартфоны могут быть использованы для высокоточных спутниковых определений [2], в том числе для решения прикладных задач [3], однако существующие методы обработки ГНСС-измерений не адаптированы для работы с данными, полученными на частоте L5, что делает актуальным вопрос модернизации данных методов.

Цель исследования заключается в модификации алгоритма метода Precise Point Positioning (PPP) при позиционировании на частотах сигналов L1/L5 и E1/E5 а для смартфонов нового поколения. Основные задачи исследования включают реализацию ионосферно-свободной линейной комбинации (ИСЛК) в методе PPP с использованием измерений на новых частотах, а также учёт дифференциальных кодовых задержек, поставляемых в файлах формата Bias SINEX (BSX).

Классическая реализация метода PPP предполагает использование одностемных измерений и не включает в себя учёт дифференциальных кодовых задержек [4]:

$$\begin{cases} P_{r_{IF}}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \epsilon_{P_{IF}}^s \\ \Phi_{r_{IF}}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda_{IF} A_{IF} + \lambda_{IF} \phi_{pw}^s + \epsilon_{\Phi_{IF}}^s \end{cases}, \quad (1)$$

где s – номер спутника; ρ_r^s – геометрическая дальность $\|x^s - x_r\|$ между положением фазового центра антенны спутника $x^s = (x^s, y^s, z^s)^T$ в момент приема сигнала на эпоху $t_A \cong t_E + \frac{\rho_r^s}{c}$ в общеземной геоцентрической прямоугольной системе координат на момент t_A ; c – скорость света в вакууме; dt_r и dt^s – смещения часов на приемнике и спутнике относительно системной шкалы времени GPS; T_r^s – погрешность ИСЛК, связанная с тропосферной задержкой; λ_{IF} – длина волны ИСЛК несущей сигналов на частотах f_i, f_j ; A_{IF} – нецелочисленная неоднозначность ИСЛК фаз несущей; ϕ_{pw}^s – набег фазы несущей; $\epsilon_{P_{IF}}^s$ и $\epsilon_{\Phi_{IF}}^s$ – состав-

ляющие шума измерений; $P_{r_{IF}}^s$ и $\Phi_{r_{IF}}^s$ – ИСЛК кодовых и фазовых измерений [5], которые определяются как:

$$P_{r_{IF}}^s = \frac{f_i^2 P_{r_i}^s - f_j^2 P_{r_j}^s}{f_i^2 - f_j^2}. \quad (2)$$

Методы и материалы

В качестве основы используется алгоритм метода PPP, реализованный в программном комплексе RTKLIV [6], который представляет собой открытую библиотеку для обработки ГНСС-измерений. В алгоритм внесены следующие изменения:

- добавлены комбинации фазовых наблюдений с кодами, соответствующими диапазонам L1 и L5;
- реализован учет дифференциальных кодовых задержек для мультисистемных измерений на частоте L5.

Комбинации кодов фазовых наблюдений, используемые для формирования ИСЛК, интегрированы в алгоритм в соответствии с общепринятым форматом файлов обмена данными спутниковых измерений RINEX версии 4.00 [7], как представлено в табл. 1.

Таблица 1

Коды наблюдений ГНСС версии RINEX 4.00

Диапазон / частота, МГц	Коды наблюдений		Системы
	Кодовые	Фазовые	
L1/1575,42	C1C	L1C	GPS, QZSS
L5/1176,45	C5Q	L5Q	GPS, QZSS
E1/1575,42	C1C	L1C	Galileo
E5a/1176,45	C5Q	L5Q	Galileo

Уравнения измерений ГНСС с учетом дифференциальных кодовых задержек [8] имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{r_{IF}}^{s,W} = \rho_r^{s,W} + c \left(dt_r^W - dt^{s,W} + ISB_r^Y \right) + T_r^{s,W} + b_{P_{IF}}^{s,W} + \epsilon_{P_{IF}}^{s,W} \\ \Phi_{r_{IF}}^{s,W} = \rho_r^{s,W} + c \left(dt_r^W - dt^{s,W} + ISB_r^Y \right) + \\ + T_r^{s,W} + \lambda_{IF}^{s,W} \left(A_{IF}^{s,W} + \varphi_{pw}^{s,W} \right) + \epsilon_{\Phi_{IF},W}^{s,W} \end{array} \right., \quad (3)$$

где W – индекс системы GPS (G), ГЛОНАСС (R), Galileo (E); $b_{P_{IF}}^{s,W}$ – дифференциальная кодовая задержка; ISB_r^Y – межсистемное смещение (Inter-System Bias).

Проведение эксперимента

Оценка эффективности модифицированного алгоритма выполнена экспериментальным путём. В ходе эксперимента обработаны суточные файлы измерений, полученные со смартфона Mi 8, в статическом и кинематическом режимах. Для обработки использовались данные навигационных систем GPS и QZSS, быстрые файлы орбит и часов, навигационные файлы BRDC и файлы параметров вращения Земли (ERP). Использовалась маска по высоте 15 градусов. Эталонные координаты получены в результате обработки измерений с использованием онлайн-сервиса CSRS-PPP [9]. Выполнена оценка точности измерений в сравнении с эталонными координатами пункта NSKE по методу Гаусса согласно формуле:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

где x_i – координаты, полученные в i -м измерении; $\bar{x}$ – эталонные координаты пункта NSKE; n – количество измерений.

Результаты

В табл. 2 приведены среднеквадратические ошибки координат, полученных в результате эксперимента, относительно эталонных значений. Сравнение результатов двух решений в кинематическом режиме показало незначительные различия, в то время как в статическом режиме решение CSRS-PPP оказалось наиболее точным.

Таблица 2

Среднеквадратические ошибки координат

Метод, режим	СКО					
	RTKLIB			CSRS-PPP		
	Е, (м)	Н, (м)	U, (м)	Е, (м)	Н, (м)	U, (м)
PPP-static	2,0917	1,937	6,2608	0,6412	0,6605	1,397
PPP-kinematic	1,9453	3,2302	5,2707	1,9465	2,325	4,0753
Относительный (статика)	0,2075	0,0172	1,7631			
Относительный (кинематика)	1,0117	0,9301	2,1803			
Абсолютный	4,0836	6,5059	10,583			

Заключение

Модифицированный алгоритм расширяет функциональные возможности метода PPP, позволяя обрабатывать измерения, выполненные на частотах L1 и L5, и исключать систематические ошибки в мультисистемных измерениях. Это открывает возможности для использования смартфонов в коллаборативном позиционировании [10], где PPP в кинематическом режиме является основным методом.

В перспективе планируется реализация алгоритма разрешения фазовой неоднозначности в методе PPP по модели некалиброванных фазовых задержек в постобработке, и адаптивного робастного фильтра Калмана на основе вариационного Байесовского метода, что значительно повысит точность позиционирования.

Благодарности

Исследование выполняется при поддержке НИР «ГЕОТЕХ» 124102500884-9.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. EUSPA EO and GNSS Market report / European Union Agency for the Space Programme [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/external/publications/euspa_market_report_2024.pdf
2. Долин, С. В. Исследование возможности высокоточного позиционирования с использованием смартфонов нового поколения / С. В. Долин, А. В. Мареев, Л. М. Миханова // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2023. – Т. 28, № 6. – С. 28-34. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-6-28-34. – EDN DCTKFR.
3. Шевчук, А. А. Методика геодезического обеспечения землеустроительных работ с применением смартфонов с двухчастотным спутниковым модулем ГНСС / А. А. Шевчук // Геодезия и картография. – 2024. – Т. 85, № 11. – С. 10-14. – DOI 10.22389/0016-7126-2024-1013-11-10-14. – EDN RVVKAH.
4. Zumberge J.F., Heflin M.B., Jefferson D.C., Watkins M.M., Webb F.H., Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res. Solid Earth, 1997, vol. 102, no. B3, pp. 5005–5017.
5. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии / К. М. Антонович // Москва: ФГУП «Картгеоцентр», – 2007. – Т. 2. – С. 238.
6. RTKLIB / An Open Source Program Package for GNSS Positioning Electronic program [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.rtklib.com/>
7. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format. Version 4.00, 2021.
8. Долин С. В. Учет дифференциальных кодовых задержек многосистемных ГНСС-измерений при позиционировании в режиме реального времени методом Precise Point Positioning / С. В. Долин // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30, № 4(119). – С. 142-151. – DOI 10.17285/0869-7035.00108. – EDN YQJOQL.
9. CSRS-PPP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.canada.ca/en.html>
10. Долин, С. В. Коллаборативное позиционирование по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем / С. В. Долин, Л. А. Липатников // XXXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам : Сборник докладов, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2024 года. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 164-166. – DOI 10.13140/RG.2.2.23587.67369. – EDN FIXNQQ.

© А. О. Маликов, С. В. Долин, 2025