

А. О. Маликов^{1✉}, С. В. Долин¹

Учет некалиброванных фазовых задержек при позиционировании на смартфонах методом PPP-AR

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

Аннотация. Современные смартфоны, оснащенные многочастотными ГНСС-антеннами, открывают возможности для высокоточного позиционирования, однако требуют адаптации существующих алгоритмов обработки данных. Учет некалиброванных фазовых задержек (НФЗ) оказывает существенное влияние на качество разрешения фазовой неоднозначности и, как следствие, на итоговую точность координат. В настоящей работе представлен алгоритм оценки НФЗ с применением программного обеспечения GREAT-UPD и RTKLIB, а также результаты эксперимента по реализации метода PPP-AR на смартфоне Huawei P40 Pro, с учетом НФЗ. Время достижения устойчивого решения в условиях применения PPP с разрешением неоднозначности в среднем не превышает 30 минут, а среднеквадратические ошибки координат составляют 5–10 см. Полученные результаты подтверждают, что современные смартфоны, при наличии высокоточной эфемеридно-временной информации и корректной алгоритмической обработки, способны обеспечивать позиционирование на уровне, приближенном к геодезическим приемникам. Это свидетельствует о принципиальной реализуемости высокоточных ГНСС-приложений на базе массовых мобильных устройств.

Ключевые слова: навигация, ГНСС, Precise Point Positioning, некалиброванные фазовые задержки, позиционирование смартфона

A. O. Malikov^{1✉}, S. V. Dolin¹

Accounting for uncalibrated phase delays in smartphone-based positioning using PPP-AR method

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

Abstract. Modern smartphones with multi-frequency GNSS antennas present new opportunities for high-precision positioning. However, they require adaptation of existing data processing algorithms. Accounting for uncalibrated phase delays (UPD) significantly impacts ambiguity resolution performance and, consequently, the final positioning accuracy. This study presents an algorithm for UPD estimation using the GREAT-UPD and RTKLIB software packages, along with experimental results demonstrating PPP-AR on a Huawei P40 Pro smartphone, incorporating UPD corrections. On average, convergence to a stable ambiguity-fixed solution is achieved within 30 minutes, with resulting coordinate accuracy of 5–10 cm. The results confirm that, when provided with high-precision orbit and clock products and appropriate algorithmic processing, modern smartphones can deliver positioning performance approaching that of geodetic-grade receivers. These results underscore the fundamental feasibility of high-accuracy GNSS applications on mass-market mobile devices.

Keywords: navigation, GNSS, Precise Point Positioning, uncalibrated phase delays, smartphone positioning

Введение

Смартфоны и другие мобильные устройства занимают значительную часть рынка ГНСС-оборудования. При этом появляются новые устройства, способные выполнять многочастотные фазовые измерения, необходимые для высокоточного позиционирования. Метод Precise Point Positioning (PPP) является наиболее подходящим решением для обработки ГНСС-измерений со смартфонов, так как не требует наличия базовых станций и обеспечивает решение непосредственно в общеземной системе координат. Однако, классический метод PPP не адаптирован для применения на смартфонах. Таким образом, высокоточное позиционирование с применением смартфонов является возможным, но существует ряд факторов, существенно влияющих на точность, и возникает потребность в адаптации существующих алгоритмов обработки.

Методы и материалы

Для высокоточного позиционирования с применением метода PPP на смартфонах важны такие аспекты, как знание параметров фазового центра устройства, и наличие поправок для разрешения фазовой неоднозначности. В настоящее время множество исследований направлено на определение фазовых центров антенн смартфонов [1].

Уравнения кодовых и фазовых измерений ионосферно-свободной линейной комбинации (ИСЛК, англ. – Ionosphere-Free Linear Combination (IFLC)) для частот f_i, f_j , используемых в методе PPP, выглядят следующим образом:

$$P_{r,IFLC}^{S,\Theta} = C_i P_{r,i}^{S,\Theta} + C_j P_{r,j}^{S,\Theta} = \rho_r^{S,\Theta} + c(dt_r - dt^{S,\Theta}) + T_r^{S,\Theta} + DCB_{i,j}^{S,\Theta} + \epsilon_{P_{IFLC}}^{S,\Theta}, \quad (1)$$

$$L_{r,IFLC}^{S,\Theta} = C_i L_{r,i}^{S,\Theta} + C_j L_{r,j}^{S,\Theta} = \rho_r^{S,\Theta} + c(dt_r - dt^{S,\Theta}) + T_r^{S,\Theta} + A_{r,IFLC}^{S,\Theta} + \epsilon_{L_{IFLC}}^{S,\Theta}, \quad (2)$$

где

$$C_i = \frac{f_i^{\Theta^2}}{f_i^{\Theta^2} - f_j^{\Theta^2}}, C_j = -\frac{f_j^{\Theta^2}}{f_i^{\Theta^2} - f_j^{\Theta^2}}, \quad (3)$$

где S и r – индексы для спутника и приемника, соответственно;

Θ – индекс навигационной системы: GPS (G), Galileo (E);

f_i, f_j – частоты, соответствующие L1, L5 для GPS; E1, E5a для Galileo.

Геометрическая дальность $\rho_r^{S,\Theta}$ есть $\|\mathbf{x}^{S,\Theta} - \mathbf{x}_r\|$ между положением фазового центра антенны спутника S навигационной системы Θ – $\mathbf{x}^{S,\Theta} = (x^{S,\Theta}, y^{S,\Theta}, z^{S,\Theta})^T$ – в момент отправки сигнала на эпоху t_k и положением фазового центра антенны приемника r – $\mathbf{x}_r = (x_r, y_r, z_r)^T$ – в момент приема сигнала на эпоху $t_d \cong t_k + \frac{\rho_r^{S,\Theta}}{c}$;

c – скорость света в вакууме; dt_r и $dt^{S,\Theta}$ – смещения часов на приемнике и спутнике относительно системного времени ГНСС; $T_r^{S,\Theta}$ – тропосферная задержка. Дифференциальная кодовая задержка $DCB_{i,j}^{S,\Theta} = d_i^{S,\Theta} - d_j^{S,\Theta}$, где $d_i^{S,\Theta}$ и $d_j^{S,\Theta}$ – некалиброванные кодовые задержки; $\epsilon_{P_{IFLC}}^{S,\Theta}$, $\epsilon_{L_{IFLC}}^{S,\Theta}$ – шумы измерений; $A_{r,IFLC}^{S,\Theta}$ – нецелочисленная фазовая неоднозначность.

Вектор оцениваемых параметров стандартной модели метода PPP включает набор нецелочисленных фазовых неоднозначностей, разрешение которых не представляется в чистом виде, из-за отсутствия информации о начале фазы несущей частоты. Это приводит к тому, что сходимость метода PPP может занимать до нескольких часов, что ограничивает его применение.

Однако, существуют методики позволяющие выполнять разрешение неоднозначностей в уравнениях ионосферно-свободной линейной комбинации. Один из самых эффективных способов является метод декомпозиции неоднозначности на широкополосную (ШП, англ. – Wide-lane (WL)) и узкополосную (УП, англ. – Narrow-lane (NL)), после разрешения которых, становится возможным разрешение ионосферно-свободных неоднозначностей.

Для успешного разрешения неоднозначностей важны точные внешние поправки некалиброванных фазовых задержек (НФЗ, англ. – Uncalibrated Phase Delay (UPD)) – это систематическая ошибка в фазовых ГНСС-измерениях, вызванная неоднородностью приемника и спутника, которая не устраняется дифференцированием и не компенсируется стандартными поправками часов или эфемерид [2]. Согласно рекомендациям Астрономического института Университета Берна (AIUB), надежное разрешение фазовой неоднозначности невозможно без учета фазовых задержек [3]. Фазовую задержку можно представить как:

$$\Delta\phi_{r_i}^{S,\Theta} = \delta\phi_{r_i} + \delta\phi^{S,\Theta}, \quad (4)$$

где $\delta\phi_{r_i}$ – фазовая задержка приемника;

$\delta\phi^{S,\Theta}$ – фазовая задержка спутника.

Эта ошибка является не целочисленной, а дробной, и зависит от частоты сигнала, игнорирование которой существенно искажает оценку неоднозначности в PPP, особенно при декомпозиции неоднозначностей ионосферно-свободной комбинации. Такие фазовые смещения представляются в циклах в фазовых комбинация ШП, УП и ИСЛК. Нецелочисленную неоднозначность в ИСЛК можно представить как:

$$A_{r,IFLC}^{S,\Theta} = \frac{f_i L_{r,i}^{S,\Theta} - f_j L_{r,j}^{S,\Theta}}{f_i - f_j} = N_{r,IFLC}^{S,\Theta} + \epsilon_{IFLC}, \quad (5)$$

где $A_{r,IFLC}^{S,\Theta}$ – нецелочисленная неоднозначность ИСЛК;

$L_{r,i}^{S,\Theta}$, $L_{r,j}^{S,\Theta}$ – фазовые измерения (в циклах) на частотах f_i, f_j для спутника S и

приемника r ;

$N_{r,IFLC}^{S,\Theta} \in \mathbb{Z}$ – искомая целочисленная ИСКЛ неоднозначность;

ε_{IFLC} – остаточный шум.

Поскольку длина волны в ИСКЛ слишком короткая ($\approx 5,4$ см), прямое разрешение неоднозначности невозможно из-за высокой дисперсии и чувствительности к смещениям. Поэтому необходимо выполнить декомпозицию на ШП и УП, после чего используя уравнения Мельбурна-Вюббена (англ. – Melbourne-Wübbena (MW)) выполнить разрешение неоднозначности. Широкополосная и узкополосная комбинации могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} A_{r,WL}^{S,\Theta} &= \frac{L_{r,i}^{S,\Theta}}{\lambda_i} - \frac{L_{r,j}^{S,\Theta}}{\lambda_j} = N_{r,WL}^{S,\Theta} + \varepsilon_{WL}, \\ A_{r,NL}^{S,\Theta} &= \frac{L_{r,i}^{S,\Theta}}{\lambda_i} + \frac{L_{r,j}^{S,\Theta}}{\lambda_j} = N_{r,NL}^{S,\Theta} + \varepsilon_{NL}. \end{aligned} \quad (6)$$

Следовательно, нецелочисленная неоднозначность в ИСКЛ:

$$\begin{aligned} A_{r,IFLC}^{S,\Theta} &= \lambda_{NL} N_{r,NL}^{S,\Theta} + \gamma_j N_{r,WL}^{S,\Theta}, \\ \gamma_j &= \left(\frac{f_i}{f_j} \right)^2 = \frac{\lambda_j^2}{\lambda_i^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\lambda_{NL} = \frac{c}{f_i + f_j}$ – длина волны узкополосной комбинации.

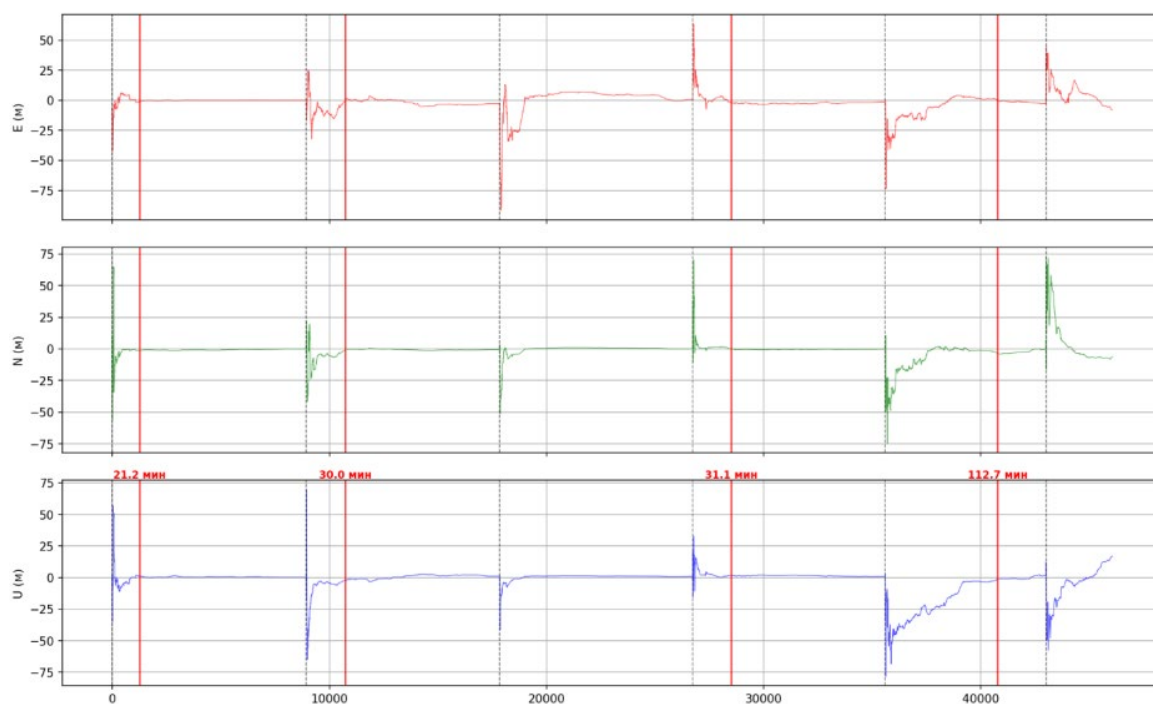
Используемое для вычисления ШП-неоднозначности уравнение Мельбурна-Вюббена имеет вид:

$$A_{MW}^{S,\Theta} = \left(\frac{L_{r,i}^{S,\Theta}}{\lambda_{S_i,\Theta}} - \frac{L_{r,j}^{S,\Theta}}{\lambda_{S_j,\Theta}} \right) - \left(\frac{f_i^{S,\Theta} P_{r,i}^{S,\Theta} + f_j^{S,\Theta} P_{r,j}^{S,\Theta}}{f_i^{S,\Theta} + f_j^{S,\Theta}} \right). \quad (8)$$

Результаты

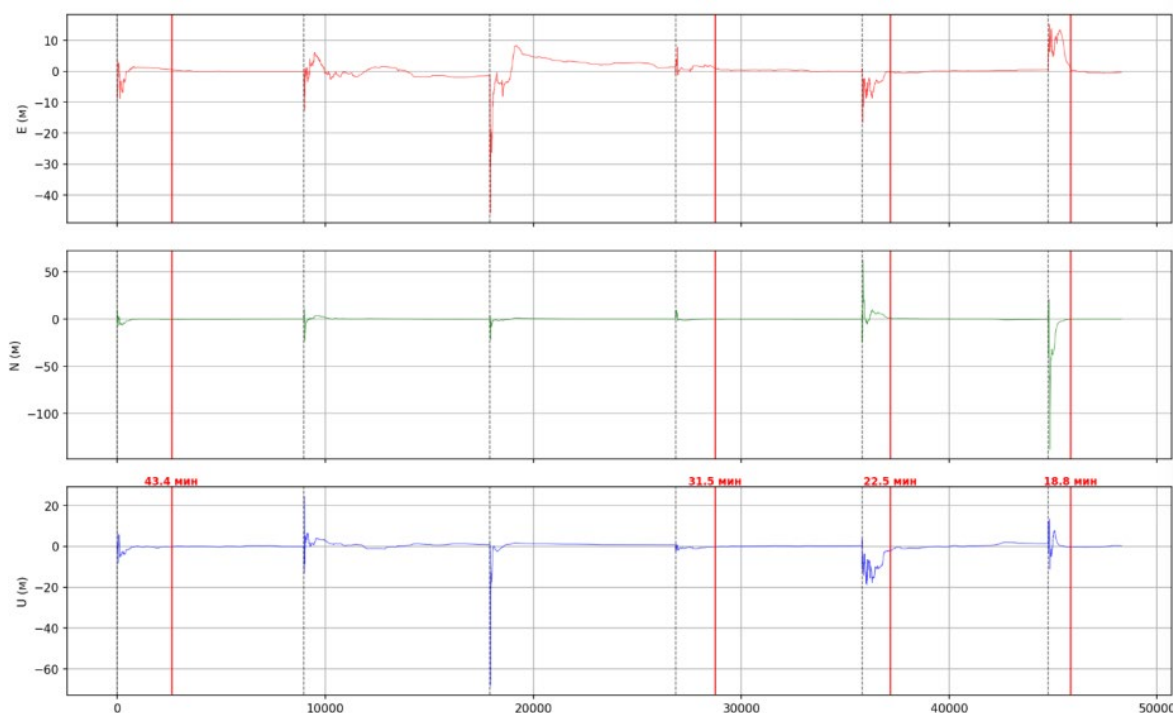
В рамках исследования разработана программа, позволяющая получить оценки ионосферно-свободной и широкополосной неоднозначности из «плавающего» решения PPP в программе RTKLIV [4]. Также было задействовано программное обеспечение с открытым исходным кодом GREAT-UPD, разработанное в Уханьском Университете [5]. GREAT-UPD применяется для оценки некалиброванных фазовых задержек, в том числе широкополосных, узкополосных и экстра-широкополосных, которые могут быть использованы в трехчастотных методах для подавления шума и фиксации «грубой» неоднозначности на начальных этапах.

С помощью указанных программ удалось успешно оценить широкополосную и ионосферно-свободную неоднозначность. Было обработано шесть полуторачасовых сеансов наблюдений со смартфона Huawei P40 Pro на пункте с известными координатами NSKE. Обработка в статическом режиме по методу PPP с использованием GPS и Galileo была выполнена дважды: сначала без алгоритма разрешения неоднозначности, затем – с ним. При обработке применялась единая маска угла возвышения спутников 10° . Вся эфемеридно-временная информация представлена Центром определения орбиты в Европе (CODE), использовались быстрые оценки (rapid solution). Далее представлены временные ряды координат: без разрешения неоднозначности (рис. 1) и с разрешением неоднозначности (рис. 2), где вертикальная красная линия обозначает сходимости (менее 2 дм).



Красная линия – западная координата (E); зеленая линия – северная координата (N); синяя линия – направление вверх (U)

Рис. 1. Совмещенные решения GPS+Galileo, без разрешения неоднозначности



Красная линия – западная координата (E); зеленая линия – северная координата (N); синяя линия – направление вверх (U)

Рис. 2. Совмещенные решения GPS+Galileo, с разрешением неоднозначности

При реализации алгоритма разрешения неоднозначности, решения стали намного стабильнее, что выражается общим снижением СКО, табл. 1.

Таблица 1

СКО для решений с системами GPS+Galileo

Метод	СКО (без первых 15 минут)		
	E , м	N , м	U , м
PPP	1,102	1,112	1,245
PPP-AR	0,005	0,040	0,108

Обсуждение

Реализация алгоритма разрешения неоднозначности позволила кратно сократить значения СКО, даже в тех решениях, где не было достигнуто разрешение неоднозначности. Для пятого сеанса, время сходимости было сокращено с 2 часов до 20 минут и в среднем составило 29 минут.

В табл. 2 приведена сводная статистика по всем конфигурациям, включающая СКО только для тех решений PPP, которые сошлись до уровня менее 2 дм, и тех решений PPP-AR, которые имели фиксированное решение до конца сеанса.

Сводная таблица

Метод	СКО			Сред. % фикс. ре- шений	Сред. время сходимости, мин	Кол-во решений
	E , м	N , м	U , м			
PPP	0,397	0,041	0,057	—	49	4 из 6
PPP-AR	0,097	0,021	0,008	76	29	4 из 6

Ключевым фактором, определяющим качество решения, является разрешение фазовых неоднозначностей. Оно позволяет получить решения с сантиметровой точностью, что ранее считалось недостижимым для устройств потребительского класса.

Конечной целью исследования является надежное разрешение неоднозначности на смартфоне с учетом некалиброванных фазовых задержек. Особую перспективу представляет создание отечественного онлайн-сервиса апостериорной обработки ГНСС-измерений, основанного на методе PPP с разрешением фазовых неоднозначностей.

Благодарности

Исследование выполняется в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ-3» – Разработка и исследование прорывных технологий в области физической и релятивистской геодезии в интересах развития фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Высокоточное ГНСС-позиционирование при использовании смартфона с учетом смещения фазового центра его антенны / С. В. Долин, А. О. Маликов, Н. С. Чухлеб, В. С. Бессонов // Гирокоспия и навигация. – 2025. – Т. 33, № 3(130). – С. 20-32. – EDN HGPYBF
2. Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M. *et al.* Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *J Geod* 82, 389–399 (2008). <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4>
3. Schaer, S., Villiger, A., Arnold, D. *et al.* The CODE ambiguity-fixed clock and phase bias analysis products: generation, properties, and performance. *J Geod* 95, 81 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01521-9>
4. RTKLIB / An Open Source Program Package for GNSS Positioning Electronic program [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.rtklib.com/>
5. Li, X., Han, X., Li, X. *et al.* GREAT-UPD: An open-source software for uncalibrated phase delay estimation based on multi-GNSS and multi-frequency observations. *GPS Solut* 25, 66 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01070-2>

© А. О. Маликов, С. В. Долин, 2026