

С. В. ДОЛИН

УЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ КОДОВЫХ ЗАДЕРЖЕК МНОГОСИСТЕМНЫХ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ МЕТОДОМ PRECISE POINT POSITIONING

В статье экспериментально доказана значимость учета дифференциальных кодовых задержек (ДКЗ) (Differential Code Bias) при определении координат методом Precise Point Positioning (PPP) по данным многосистемных ГНСС-измерений (GPS, ГЛОНАСС, Galileo). Благодаря учету ДКЗ существенно сокращается время сходимости навигационного решения. Описаны потребовавшиеся для проведения эксперимента изменения в программном обеспечении RTKLIB, позволяющие учитывать ДКЗ в реальном времени.

Ключевые слова: навигация, ГНСС, мульти-ГНСС, мультисистемные измерения, дифференциальные кодовые задержки, Precise Point Positioning, RTKLIB.

Введение

При выполнении измерений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в аппаратуре спутников и приемников возникают групповые задержки, отличающиеся по величине в зависимости от типа сигнала. На практике это проявляется в систематических смещениях кодовых псевдодальностей, измеренных по разным сигналам от одного спутника и называемых дифференциальными кодовыми задержками (ДКЗ). ДКЗ можно разделить на два типа – внутрочастотные (intra-frequency) и межчастотные (inter-frequency) [1].

Внутрочастотные задержки используются при измерениях C1/P2 и C2/P1, в которых необходимо исправлять задержки между P1-C1 и P2-C2 измерениями. В течение дня параметры ДКЗ для спутника и приемника считаются постоянными, шум измерений и погрешности, связанные с многолучевостью, имеют нулевое среднее значение за одни сутки, следовательно, комбинированные внутрочастотные задержки для каждой пары сигналов (спутник-плюс-приемник – satellite-plus-rover) [2] могут быть определены из среднего значения:

$$SPR_{s1-s2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (P_{s1,k} - P_{s2,k}), \quad (1)$$

где $P_{s1,k}$, $P_{s2,k}$ – псевдодальности, полученные одновременно путем измерений на одной частоте по двум сигналам $s1$ и $s2$, в эпоху k ; N – общее количество эпох.

Начиная с 2000 года Европейский центр определения орбит CODE предоставляет модели задержек для P1-C1, которые применяются Международной службой ГНСС

Долин Сергей Владимирович. Аспирант, ассистент кафедры космической и физической геодезии, Сибирский государственный университет геосистем и технологий; инженер, НИИ Стратегического развития (Новосибирск).

(International GNSS Service – IGS) для анализа поправок часов, публикуемых международной службой ГНСС [3].

Межчастотными называются задержки между кодовыми наблюдениями на двух разных частотах. Для получения межчастотных задержек необходимы оценки полного содержания электронов в ионосфере, вычисленные из сырых мультисистемных ГНСС-измерений, локальные модели ионосферы и значения внутрочастотных задержек для конкретного спутника и приемника. Безыоносферные комбинации двухчастотных измерений могут использоваться для оценки межчастотных задержек, но на них серьезно влияют эффекты шума и многолучевости.

Оценки ДКЗ могут быть выделены в процессе оценивания параметров состояния ионосферы. В институте геодезии и геофизики (Institute of Geodesy and Geophysics) Китайской академии наук (CAS) в Ухане разработан метод оценки ДКЗ – IGGDCB [4], позволяющий использовать локальную ионосферную информацию, генерируемую на основе всех доступных наблюдений спутников на каждой станции, что дает возможность компенсировать нехватку современных станций слежения ГНСС для глобального моделирования ионосферы.

Рабочая группа IGS по смещениям и калибровке (Bias and Calibration Working Group) еще не выработала общих рекомендаций для выбора задержек с использованием нескольких ГНСС. Теоретически если имеется N типов кодовых измерений, то необходимы только $N-1$ типов внутри- и межчастотных задержек, но получить такой набор ДКЗ на практике сложно по двум причинам. Во-первых, в стандарте RINEX4 предусмотрено не более 15 различных сигналов на каждую ГНСС, которая может образовывать большее количество возможных пар сигналов и связанных с ними ДКЗ. Во-вторых, приемники не всегда поддерживают отслеживание соответствующих сигналов, которые использовались для заранее определенного типа ДКЗ.

На сайте информационной системы данных динамики земной коры NASA (Crustal Dynamics Data Information System) в разделе по ДКЗ опубликован архив с файлами ДКЗ от двух аналитических групп – Института геодезии и геофизики CAS и Немецкого института аэрокосмических исследований (Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt – DLR) [5]. Задержки на спутниках и станциях MGEX, рассчитанные Институтом геодезии и геофизики, публикуются с интервалом в 2-3 дня и доступны в виде суточных файлов в формате BSX. Продукт DLR обновляется каждые 3 месяца и содержит недельные средние значения кодовых задержек на спутниках. Кроме того, для справочных целей и анализа регрессионных моделей предоставляется полный набор ежедневных кодовых задержек для спутников и станций MGEX. В табл. 1 представлены типы сигналов [6], анализируемые рабочими группами из Китая и Германии.

В настоящее время еще отсутствует общепринятый механизм учета ДКЗ в многосистемных ГНСС-измерениях, но существует ряд исследований [7–9], показывающих эффективность применения ДКЗ в уравнениях измерений, выполненных методом PPP.

Кроме того, общедоступное свободное программное обеспечение для обработки спутниковых измерений, такое как RTKLIB, не поддерживает учет ДКЗ для систем Galileo и BeiDou в новых форматах.

В то же время попытки реализовать метод PPP с использованием многосистемных ГНСС-измерений без учета достаточного набора ДКЗ демонстрируют результаты, уступающие по точности односистемному варианту с использованием лишь GPS-измерений.

Таблица 1

Коды сигналов ГНСС, анализируемые рабочими группами CAS и DLR

ГНСС	DLR	CAS
GPS	C1C, C1W, C2L, C2S, C2X, C2W, C5Q, C5X	
ГЛОНАСС	C1C, C1P, C2C, C2P	
Galileo	C1C, C1X, C5Q, C5X, C7Q, C7X, C8Q, C8X, C6C	C1C, C1X, C5Q, C5X, C7Q, C7X, C8Q, C8X
BeiDou-2	C2I, C6I, C7I	
BeiDou-3	C1X, C1P, C1D, C2I, C5X, C5P, C5D, C6I, C7Z, C8X	
QZSS	C1C, C1X, C2L, C2X, C5X, C5Q	

В классической односистемной реализации метода PPP учет ДКЗ не предполагался. Исходная модель GPS-измерений в методе PPP, предложенная в 1997 г. [10] и применяемая до сих пор во многих программных продуктах на основе ионосферно-свободной линейной комбинации (ИСЛК), не включает ДКЗ:

$$\begin{cases} P_{r_{IF}}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \epsilon_{P_{IF}}^s \\ \Phi_{r_{IF}}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda_{IF} A_{IF} + \lambda_{IF} \Phi_{pw}^s + \epsilon_{\Phi_{IF}}^s \end{cases}, \quad (2)$$

где s – номер спутника;
 $P_{r_{IF}}^s$ и $\Phi_{r_{IF}}^s$ – ИСЛК кодовых и фазовых измерений, которые определяются как
 $P_{r_{IF}}^s = C_i P_{r_i}^s + C_j P_{r_j}^s, \Phi_{r_{IF}}^s = C_i \Phi_{r_i}^s + C_j \Phi_{r_j}^s, C_i = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2}$ и $C_j = \frac{-f_j^2}{f_i^2 - f_j^2}$;
 ρ_r^s – геометрическая дальность $\|\mathbf{x}^s - \mathbf{x}_r\|$ между положением фазового центра антенны спутника $\mathbf{x}^s = (x^s, y^s, z^s)^T$ в момент отправки сигнала на эпоху t_E и положением фазового центра антенны приемника $\mathbf{x}_r = (x_r, y_r, z_r)^T$ 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 (ИСЛК целочисленных неоднозначностей фаз на частотах f_i, f_j и нецелочисленных начальных значений фазы);
 Φ_{pw}^s – набег фазы несущей;
 $\epsilon_{P_{IF}}^s$ и $\epsilon_{\Phi_{IF}}^s$ – составляющие шума измерений.

Дифференциальные кодовые задержки вносят существенные погрешности при обработке ГНСС-измерений методом PPP. С появлением Galileo и BeiDou, а также модернизацией GPS и ГЛОНАСС оценка ДКЗ с использованием нескольких ГНСС стала одной из ключевых задач для международного геодезического сообщества [11]. Появление новых ГНСС и их модернизация приведет к тому, что пользователи будут сталкиваться с постоянно растущим множеством сигналов, режимов измерений и связанных с ними погрешностей.

В настоящей работе представлен сравнительный анализ оценки точности результатов измерений, полученных методами PPP без учета ДКЗ и с ДКЗ. Автором статьи модифицирована библиотека RTKLIV для выполнения измерений методом PPP с ДКЗ, а также разработан алгоритм по оценке точности на основе работы [12].

Модификация библиотеки RTKLIV

RTKLIV – это программная библиотека с открытым исходным кодом для стандартного и высокоточного позиционирования с помощью ГНСС. RTKLIV состоит непосредственно из библиотеки программ и использующих ее нескольких прикладных программ [13].

В целях автоматизации эксперимента была применена консольная версия программы «rtknavi» под названием «rtkrcv». Так как компоненты библиотеки RTKLIV не были подготовлены к использованию ДКЗ, была выполнена модификация исходного кода для реализации многосистемных ГНСС-измерений методом PPP в реальном времени.

Были внесены следующие изменения:

- 1) чтение данных из файлов ДКЗ в версии формата Bias SINEX (BSX);
- 2) модифицирован алгоритм для выполнения мультисистемных ГНСС-измерений с помощью ДКЗ как из потока SSR-поправок, так и из BSX-файла.

В результате модификации в уравнения многосистемных ГНСС-измерений ИСЛК для кода включены задержки в аппаратуре спутников систем GPS (G), ГЛОНАСС (R), Galileo (E):

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

где W – индекс системы GPS (G), ГЛОНАСС (R), Galileo (E);

$b_{P_{IF}}^{s,W}$ – ДКЗ;

$ISB_r^G = 0, ISB_r^Y = dt_r^Y - dt_r^G, Y = R, E$ – межсистемное смещение (Inter-System Bias – ISB).

Исходный код модифицированной автором версии программного обеспечения RTKLIV доступен под свободной лицензией BSD 2-Clause [14] в онлайн-репозитории [15].

Условия экспериментов

Цель эксперимента – оценить влияние учета ДКЗ на результаты определения координат методом PPP по многосистемным ГНСС-измерениям с помощью модифицированной автором библиотеки RTKLIV.

В эксперименте использовались данные сети станций, развернутой в рамках инициативы MGEX IGS [16]. Станции этой сети принимают сигналы всех доступных глобальных и региональных навигационных спутниковых систем, включая последнее поколение спутников GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo, QZSS и NAVIC, и любых дифференциальных спутниковых дополнений (Satellite Based Augmentation System), см. рис. 1.



Рис. 1. Карта расположения пунктов системы IGS Multi-GNSS (MGEX), используемых в эксперименте (синий – IGS, красный – EUREF)

В табл. 2 приведены задействованные станции, приемники и принимаемые ими сигналы, запись измерений происходила с частотой 1 Гц.

Таблица 2

Пункты, участвующие в эксперименте, и принимаемые ими сигналы

№	Сеть	Название станции	Приемник	GPS	ГЛОНАСС	Galileo
1	IGS	ABMF	SEPT POLARX5	1C, 2W, 5Q	1C,2P	1C, 7Q, 5Q, 6C, 8Q
2	IGS	ALGO	SEPT POLARX5	1C, 2W, 5Q	1C,2P	1C, 7Q, 5Q, 6C, 8Q
3	IGS	NRC1	JAVAD TRE_G3TH DELTA	1C, 2W, 5X	1C,2P	1X,7X,5X
4	IGS	LMMF	TRIMBLE ALLOY	1C, 2W, 5X	1C,2P	1X, 7X, 5X, 6X, 8X
5	IGS	POVE	TRIMBLE NETR9	1C, 2W, 5X	1C,2P	1X, 7X, 5X, 8X
6	IGS	SALU	TRIMBLE NETR9	1C, 2W, 5X	1C,2P	1X, 7X, 5X, 8X
7	IGS	SAMO	TRIMBLE NETR9	1C, 2W, 5X	1C,2P	1X, 7X, 5X, 8X
8	EUREF	HELG	JAVAD TRE_3 DELTA	1C, 2W, 5X	1C,2P	1X, 7X, 5X
9	EUREF	TERS	SEPT POLARX5	1C, 2W, 5Q	1C,2P	1C, 7Q, 5Q, 6C, 8Q
10	EUREF	ZIM2	TRIMBLE NETR9	1C, 2W, 5X	1C,2P	1X, 7X, 5X, 8X
11	EUREF	WSRT	SEPT POLARX5	1C, 2W, 5Q	1C,2P	1C, 7Q, 5Q, 6C, 8Q
12	EUREF	KARL	JAVAD TRE_3 DELTA	1C, 2W, 5X	1C,2P	1X, 7X, 5X

В течение суток выполнялось позиционирование пунктов в статическом и кинематическом режиме в реальном времени методом PPP: координаты неподвижного пункта уточнялись по мере поступления измерений. Для решений в статическом и кинематическом режимах использовались данные на разных интервалах времени.

При отсутствии искусственных ограничений на углы восхождения видимых спутников количество задействованных спутников в течение суток варьировалось от 17 до 29 (GPS, ГЛОНАСС, Galileo), а значения горизонтального и вертикального геометрических факторов HDOP и VDOP составили от 0,46 до 0,79 и 0,7 до 1,39 соответственно [17].

При реализации метода PPP в режиме реального времени использовался SSR-поток [18], содержащий ДКЗ. Таким образом, потребителю поступают актуальные ДКЗ в реальном времени. В табл. 3 представлены наименования оцениваемых ДКЗ для каждой ГНСС.

Таблица 3

Наименования ДКЗ сигналов ГНСС, передаваемые потоком SSRA00CNE1

ГНСС	ДКЗ
GPS	C1C, C1P, C1W, C2S, C2L, C2W, C5Q
ГЛОНАСС	C1C, C1P, C2C, C2P
Galileo	C1C, C5Q, C7Q, C6C
BeiDou-2	C2I, C6I, C7I
BeiDou-3	C1P, C2I, C5P, C6I

В результате обработки измерений вычислялись средние значения погрешностей и среднеквадратические погрешности (СКП) оценок координат:

$$\text{среднее}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \Delta_{i,j}}{n_j}, \text{СКП}_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} \Delta_{i,j}^2}{n_j}}, \tag{4}$$

где $j = 0, 1, 2, \dots$ – момент времени; $i = 1, \dots, n_j$ – порядковый номер станции; $\Delta_{i,j}$ – разность между эталонными и вычисленными координатами станции. Оценки получены синхронно с помощью исходной и модифицированной версий программного обеспечения по одним и тем же измерениям. Эталонные координаты извлекались из каталога координат пунктов системы ITRF2014 [19] на дату получения измерений. Погрешности координат пересчитывались на географические оси для эллипсоида GRS80: северную N , восточную E и вертикальную U .

Результаты оценки точности по данным экспериментов

На рис. 2–5 приведены результаты для маски углов возвышения спутников в 10° в статическом и кинематическом режимах. Результаты представлены для интервала времени 600–86400 с, отсчитываемого от начала решения (0 на горизонтальной оси соответствует 600 с от начала решения). Из графиков видно, что добавление в систему уравнений (3) ДКЗ позволило сократить время сходимости решения.

В статическом режиме время сходимости PPP-решения до СКП < 10 см для вертикальной координаты слабо зависит от учета ДКЗ, хотя СКП этой координаты с учетом ДКЗ после 600 с от начала решения уменьшается быстрее. Для горизонтальных координат время сходимости до СКП < 10 см с учетом ДКЗ составляет 4 мин, без него – 27 мин.

В кинематическом режиме время сходимости PPP-решения до СКП < 10 см с учетом ДКЗ по всем координатам составило 18 ч, без учета ДКЗ это условие не выполняется. Для горизонтальных координат время сходимости решения до СКП < 10 см с учетом ДКЗ заняло 13 мин, без него – 40 мин.

В этом режиме эффект от учета ДКЗ во многом нивелируется переходными процессами, связанными с оцениванием новых фазовых неоднозначностей.

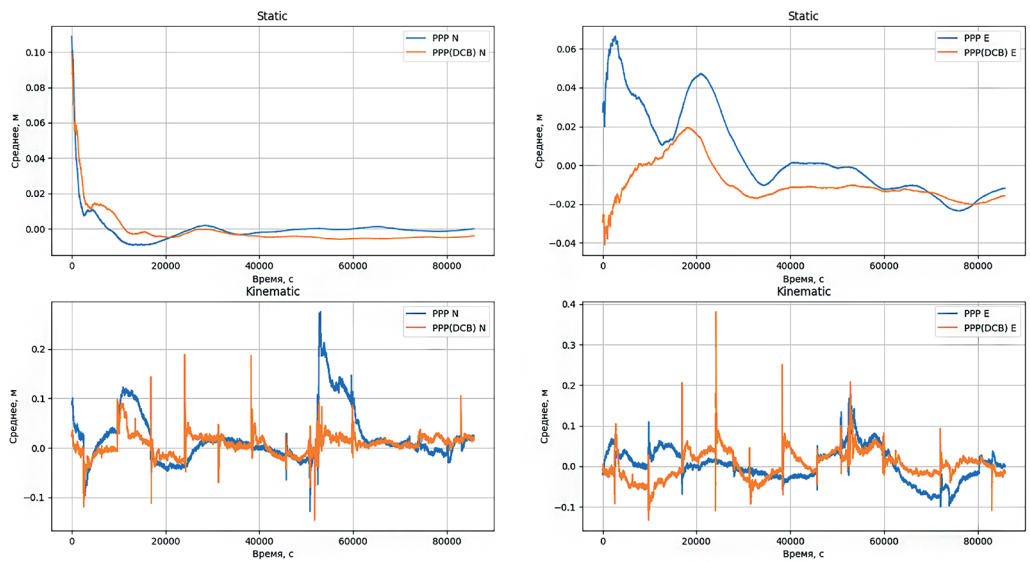


Рис. 2. Среднее значение погрешности по осям *N* и *E*

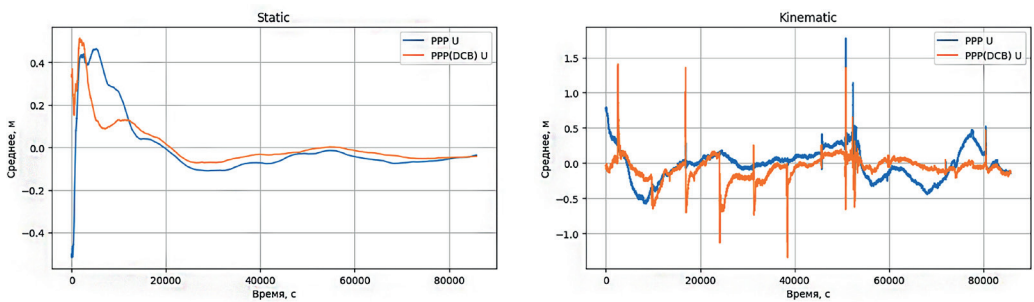


Рис. 3. Среднее значение погрешности по оси *U*

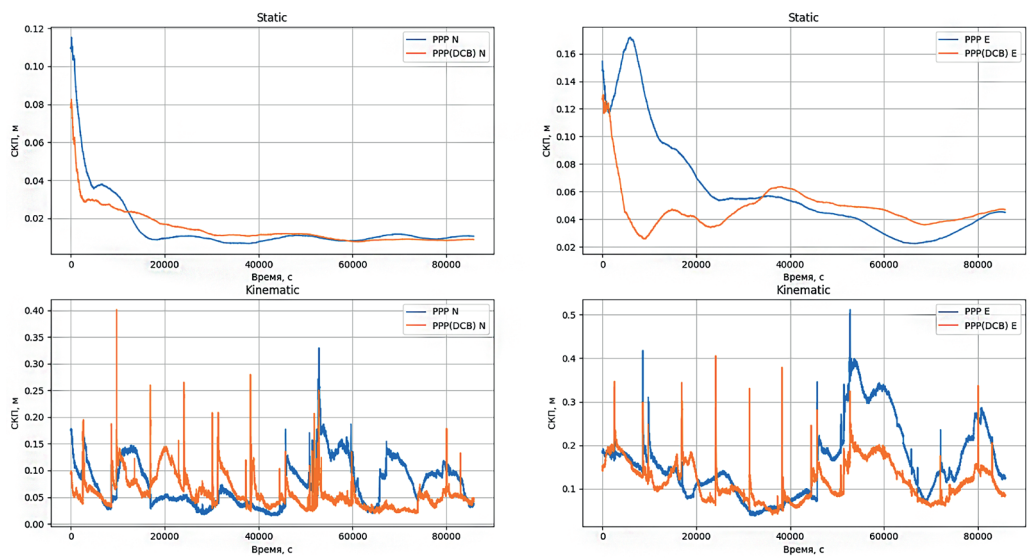


Рис. 4. СКП по осям *N* и *E*

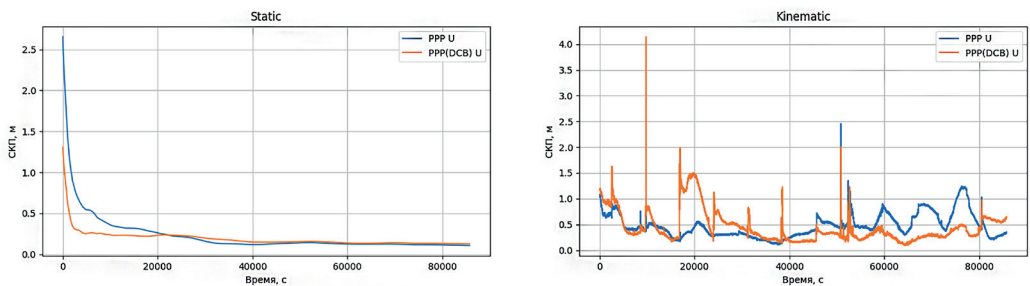


Рис. 5. СКП по оси *U*

Таким же образом были определены СКП решений без учета и с учетом ДКЗ на суточном интервале при маске углов восхождения 10°, 25°, 40°. Первые 10 мин решения (переходный процесс) не учитывались. При маске углов восхождения 40° количество используемых спутников находится в диапазоне от 5 до 13 спутников, HDOP – от 1,25 до 12,79, VDOP – от 2,41 до 19,25. Значения СКП представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

СКП без учета и с учетом ДКЗ при ограниченной видимости спутников, м

Режим		Статика			Кинематика		
Маска углов восх., град		10	25	40	10	25	40
Координаты	E	0,22 / 0,20	0,29 / 0,26	0,35 / 0,22	0,37 / 0,31	0,27 / 0,24	1,31 / 0,73
	N	0,11 / 0,11	0,14 / 0,12	0,14 / 0,11	0,25 / 0,22	0,23 / 0,2	1,1 / 0,69
	U	0,44 / 0,4	0,49 / 0,44	0,71 / 0,59	0,63 / 0,61	0,58 / 0,51	3,36 / 2,16

Видно, что эффективность применения ДКЗ выше в более стесненных условиях видимости спутников. Особенно эффект заметен для маски возвышения в 40° в кинематическом режиме. В этом случае СКП горизонтальных координат, полученных с учетом ДКЗ, на 0,5 м меньше, чем без учета ДКЗ, тогда как СКП вертикальной координаты с учетом ДКЗ оказывается меньше на 1,2 м.

З а к л ю ч е н и е

Благодаря службе IGS и эксперименту MGEX удалось оценить эффективность применения оценок ДКЗ по данным CNES для позиционирования в реальном времени при помощи метода PPP. Модифицировано программное обеспечение «rtkrcv», входящее в состав библиотеки RTKLIB. Модификация позволяет за счет применения потока SSR-поправок или BSX файлов исключить влияние ДКЗ в многосистемных измерениях с использованием GPS, ГЛОНАСС и Galileo. Исходный код программы находится в онлайн-репозитории [15]. Показано, что учет ДКЗ заметно сокращает время сходимости решения в статическом режиме. По мере ухудшения видимости спутников эффект от применения ДКЗ в статическом и кинематическом режимах повышается.

Следующим шагом исследования станет использование дифференциальных фазовых задержек в реальном времени в модели некалиброванных фазовых задержек / дробных смещений цикла (Uncalibrated Phase Delay / Fractional Cycle Bias) для разрешения неоднозначностей в методе PPP.

Работа выполнена при поддержке СЧ НИР «ГЕОТЕХ-Квант» 121111600209-4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang, N., Yuan, Y., Li, Z., Montenbruck, O., Tan, B., Determination of differential code biases with multi-GNSS observations, *J. Geod.*, 2016, vol. 90, no. 3, pp. 209–228.
2. Montenbruck, O., Hauschild, A., Steigenberger, P., Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps: Multit-GNSS DCB Estimation, *Navigation*, 2014, vol. 61, no. 3, pp. 191–201.
3. Schaer, S., SINEX BIAS – Solution (Software/technique) Independent Exchange Format for GNSS Biases Version 1.00, *IGS Workshop on GNSS Biases*, 2015, Bern, Switzerland, 52 p.
4. Li, Z., Yuan, Y., Li, H., Ou, J., Huo, X., Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites, *J. Geod.*, 2012, vol. 86, no. 11, pp. 1059–1076.
5. GNSS Differential Code Bias Product [Электронный ресурс]. URL: <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/bias/>.
6. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format. Version 4.00, 2021.
7. Bahadur, B., Nohutcu, M., Comparative analysis of MGEX products for post-processing multi-GNSS PPP, *Measurement*, 2019, vol. 145, pp. 361–369.
8. Kiliszek, D., Kroszczyński, K., Performance of the precise point positioning method along with the development of GPS, GLONASS and Galileo systems, *Measurement*, 2020, vol. 164, p. 108009.
9. Xu, Y., Yang, Y., Li, J., Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b precise point positioning service, *GPS Solut.*, 2021, vol. 25, no. 4, p. 142.
10. 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.
11. Wang, N., Li, Z., Duan, B., Hugentobler, U., Wang, L., GPS and GLONASS observable-specific code bias estimation: comparison of solutions from the IGS and MGEX networks, *J. Geod.*, 2020, vol. 94, no. 8, p. 74.
12. Антонович К.М., Липатников Л.А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования по результатам ГНСС-измерений (Precise Point Positioning) // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 4/С. С. 44–47.
13. Takasu, T., RTKLIB, ver. 2.4.2, Manual, 2013.
14. BSD-2-Clause [Электронный ресурс]. URL: <https://opensource.org/licenses/BSD-2-Clause>.
15. Dolin, S.W., RTKLIB 2.4.3 b34 with support differential code biases for GPS, GLONASS, Galileo (fork) [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/SergeyDolin/RTKLIB/tree/rtklib_2.4.3.
16. Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, F., Romero, I., Noll, C., Stürze, A., Weber, G., Schmid, R., MacLeod, K., Schaer, S., The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges, *Adv. Space Res.*, 2017, vol. 59, no. 7, pp. 1671–1697.
17. Trimble GNSS planning online [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gnssplanning.com/>.
18. Wübbena, G., Wübbena, J., Wübbena, T., Schmitz, M., SSR Technology for Scalable Real-Time GNSS Applications, *IGS Workshop*, 2017, 20 p.
19. The International Terrestrial Reference Frame (ITRF) [Электронный ресурс]. URL: <http://itrf.ensg.ign.fr/> (accessed: 01.03.2015).

Dolin, S.V. (Siberian State University of Geosystems and Technologies; Research Institute of Strategic Development, Novosibirsk, Russia)

Consideration for Differential Code Biases in Multi-GNSS Measurements in Real-Time Precise Point Positioning, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 4 (119), pp. 142–151.

Abstract. The article experimentally proves the importance of applying Differential Code Biases (DCB) when determining coordinates by Precise Point Positioning (PPP) based on multi-GNSS measurements (GPS, GLONASS, Galileo). The application of DCB significantly reduces the convergence time of the navigation solution. Modifications to RTKLIB software required for the experiment are described, which allow applying the DCB in real time.

Key words: navigation, GNSS, multi-GNSS, multi-frequency measurements, differential code bias, Precise Point Positioning, RTKLIB.

Материал поступил 01.08.2022