

А.А. Жалило, А.И. Яковченко

Харьковский национальный университет радиозлектроники, Харьков, Украина

## РЕАЛИЗАЦИЯ PPP-МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БОРТОВЫХ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ

*The results of development and testing of the domestic realization of PPP method (Precise Point Positioning) for high-precision determination of Low Earth Orbit satellites (LEOS) movement parameters using the results of on-board GPS-observations and the kinematic (geometric) positioning mode only without LEOS dynamic movement models are presented. The features of the proposed variant of the PPP method of processing the GPS-observations with using of precise ephemerides and clock estimates of GPS satellites, as well as other information from the IGS international service and the French space agency CNES are described. The components of the observation error model and the technique of “a priori” and “a posteriori” estimates of the accuracy of coordinate determinations are described. Using the example of the processing of the on-board GPS-observations from specialized foreign LEOS COSMIC it is indicated that for observation intervals of 30–40 minutes and more there can be achieved sub-decimeter accuracy of LEOS positioning. The results of comparison of the convergence of “float” and discrete/integer methods of carrier-phase ambiguity resolution are presented.*

**Ключевые слова:** глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС/GPS), кодовые и фазовые наблюдения, метод точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning).

### Введение

Оборудование низкоорбитальных искусственных спутников Земли (НИСЗ) приемниками сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) открывает уникальные возможности научных исследований в таких областях, как геодезия, геодинамика, уточнение фигуры геоида, мониторинг космической погоды, метеорология и др. В настоящей работе, выполненной в рамках Целевой комплексной программы Национальной академии наук Украины по научным космическим исследованиям в 2015 г., кратко описаны результаты создания отечественной технологии определения параметров траекторий НИСЗ методом PPP (Precise Point Positioning) [1, 2] по результатам двухчастотных наблюдений сигналов ГНСС, которые получены на борту НИСЗ и переданы в наземные центры сбора и обработки измерений. Рассматриваемая тематика отвечает программе проведения международного научного космического эксперимента “Ионосат-Микро” [3].

Упомянутый недифференциальный (автономный) метод PPP для точных координатных определений использует вспомогательную информацию (высокоточные орбиты и точные значения бортовых часов спутников ГНСС, другие необходимые параметры) из международных центров обработки наблюдений глобальной и региональных ГНСС-сетей перманентных станций [1, 2, 4]. Задача заключалась в создании алгоритмических и программных средств определения параметров траекторий НИСЗ с сантиметровой или субдециметровой точностью по результатам бортовых

двухчастотных ГНСС-наблюдений кинематическим (геометрическим) методом, без использования динамических моделей движения НИСЗ.

Существенная проблема, которую нужно было решить в ходе выполнения исследований, заключалась в поиске, теоретическом обосновании нового, более эффективного (по сравнению с зарубежными аналогами [1, 2]) способа обработки фазовых ГНСС-наблюдений, в частности, в задачах устранения фазовых циклических скачков и разрешения фазовой неоднозначности (РФН) [5] в условиях высокой динамики движения НИСЗ.

Для целей тестирования экспериментального программного обеспечения выполнены сбор и анализ бортовых GPS-наблюдений специализированных зарубежных НИСЗ COSMIC/FORMASAT-3. Получены результаты траекторных определений кинематическим PPP-методом с использованием точных (финальных) оценок эфемерид, часов спутников GPS и другой вспомогательной информации от международной службы IGS и французского космического агентства CNES.

### Определение параметров движения НИСЗ и оценка их точности

Для условий высокой динамики движения НИСЗ в ходе разработки были решены традиционные при реализации точного позиционирования задачи — устранения фазовых скачков [5, 6] и разрешения фазовой неоднозначности [5, 7]. Наличие однозначных фазовых наблюдений и их линейных комбинаций

(на трассах “GPS спутники — НИСЗ”) дает возможность выполнить точные траекторные определения НИСЗ. Обработка спутниковых наблюдений методом PPP (оригинальная авторская реализация метода) выполнялась с использованием модифицированных к задачам обработки бортовых GPS-наблюдений предыдущих собственных разработок [5–7] — методов, алгоритмов и программно-математического инструментария. При построении решения задачи РФН использовалась авторская универсальная статистически корректная методика совместного оценивания информационных и неинформационных “мешающих” параметров [7]. Предложенное решение задачи РФН состоит из трех этапов. На первом этапе выполняются кодовое P1-решение (с учетом двухчастотных ионосферных коррекций) и сглаженное кодово-фазовое решение для текущего положения фазового центра бортовой приемной антенны спутника, которые затем используются как априорная информация при выполнении РФН. Второй этап заключается в выполнении целочисленного РФН фазовой комбинации разностной частоты “Wide-Lane” (WL) с использованием линейной комбинации кодовых и фазовых наблюдений Melbourne-Wübbena [1, 2]. При этом использовались кодовые и фазовые коррекции аппаратных задержек сигналов спутников GPS (вспомогательная информация CNES). После определения начальных фазовых неоднозначностей WL-наблюдений осуществляется их верификация с использованием известного принципа замыканий неоднозначностей по контурам, образуемым созвездиями спутников ГНСС. После этого становится возможным выполнить дискретное/целочисленное РФН для наблюдений первой несущей частоты L1 (а затем и L2), используя т. н. “безионосферную”

комбинацию “Iono-Free” (IF), в чем и заключается третий этап обработки. Для реализации РФН авторами предложено использовать дискретный перебор (поиск наилучшей комбинации) фазовых неоднозначностей относительно начального приближения, оцененного с помощью “плавающего” (float) решения [6], с дискретой перебора, равной не циклу, а полуциклу несущей L1. Это позволяет парировать влияние остаточных эфемеридно-временных погрешностей коррекций, предоставляемых сервисными центрами (например, CNES), которые могут достигать, согласно проведенному анализу, ~5–10 см. Полученное дискретное/целочисленное РФН-решение подвергается процедуре верификации, то есть подтверждению правильности оценки параметров неоднозначности на основе выбранных статистик и критериев. После полного выполнения РФН и введения коррекций в фазовые наблюдения становится возможным определение финальных, наиболее точных, текущих координат бортового приемника НИСЗ и расхождений шкал времени приемника НИСЗ и GPS.

Для целей координатно-временных определений НИСЗ использована собственная отечественная разработка — прототип программно-математического обеспечения “ОСТАВА” [5]. Комплекс “ОСТАВА” позволяет выполнять традиционное и сетевое позиционирование сантиметрового уровня точности в одночастотном и двухчастотном режимах. Для реализации метода PPP была выполнена соответствующая модернизация ряда программных модулей и формирование новых модулей. Предложенная обобщенная схема реализации методов и алгоритмов обработки бортовых наблюдений НКА и точного PPP-позиционирования представлена на рис. 1.

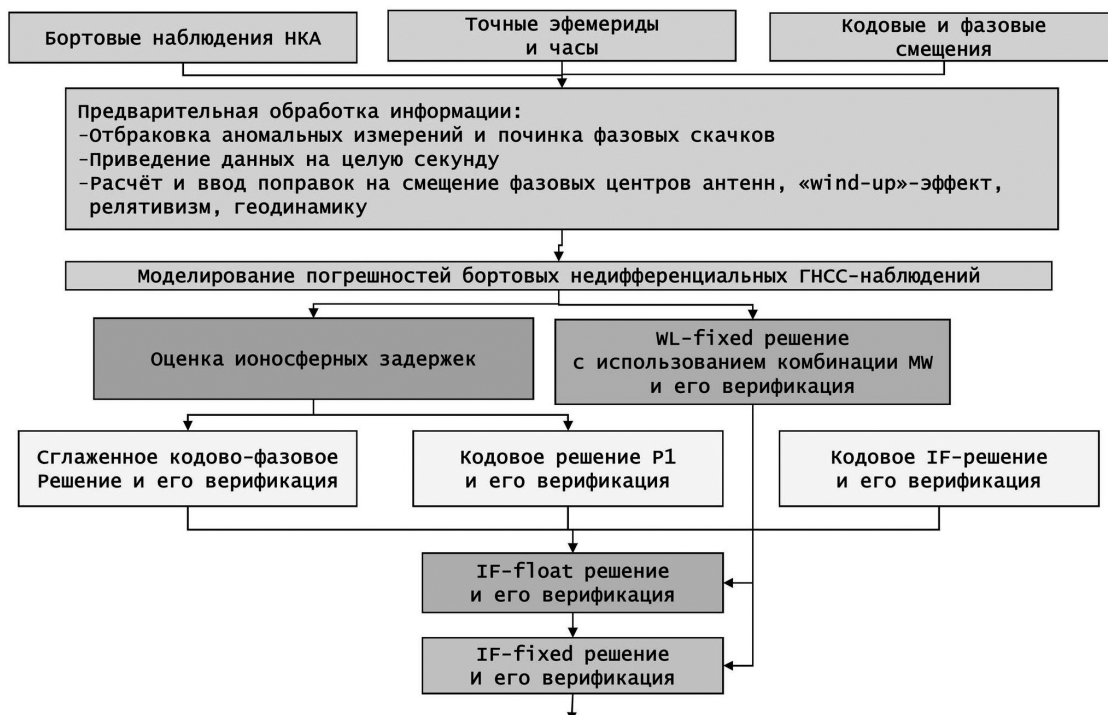


Рис. 1. Предложенная схема реализации методов и алгоритмов точного PPP-позиционирования

Для отработки программно-математического обеспечения были использованы GPS-наблюдения группировки НИСЗ COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate). Выбранные наблюдения прошли предварительную обработку (контроль качества данных, устранение циклических фазовых скачков и др.). Дальнейшая обработка выполнялась в режиме позиционирования PPP. Для пересчета эталонных траекторий центров масс НИСЗ (представлены вместе с GPS-наблюдениями в архиве данных тайваньского COSMIC-центра) на текущее местоположение фазовых центров приемных GPS-антен использовалась дополнительная информация о параметрах ориентации и положения приемных антенн и самих космических аппаратов.

Ниже (рис. 2–5) приведены иллюстрации результатов координатных определений методом PPP и оценки их точности для НИСЗ COSMIC/FM1. В качестве эталонных значений при апостериорной оценке точности были использованы оценки координат НИСЗ (с декларируемыми погрешностями на уровне ~5 см), полученные исполнителями космической программы COSMIC путем комбинированной обработки бортовых GPS-наблюдений кинематическим и динамическим методами.

На рис. 2 приведены зоны радиовидимости спутников GPS с борта НИСЗ COSMIC/FM1 на интервале времени ~ 2 часа (примерно 1 виток НИСЗ вокруг Земли) от начала суток 10 января 2013 г. На рис. 3 приведены геометрические факторы текущего рабочего созвездия спутников GPS для выделенного интервала оценивания, характеризующие ухудшение точности решения (по отношению к точности GPS-наблюдений).

На рис. 4 и рис. 5 показаны невязки (в метрах) ИФ-решений: “плавающего” (float) PPP-решения (рис. 4) и дискретного/целочисленного (fixed) PPP-решения (рис. 5) по отношению к эталону.

Среднеквадратичные погрешности (СКП) (апостериорная оценка точности) float-решения относительно эталона составили ~0,06–0,11 м при уровне МНК-остатков ~1–2 см. Последнее свидетельствует о хорошей внутренней сходимости решения на уровне погрешностей фазовых измерений.

СКП (апостериорная оценка точности) дискретного fixed-решения относительно эталона составили ~0,03–0,04 м, что значительно точнее “плавающего” решения. Предельные погрешности дискретного решения лежат в пределах ~0,05–0,10 м. В обоих случаях (float и fixed решения) определение текущих координат НИСЗ было выполнено геометрическим методом (без использования динамической модели движения). Погрешности определения расхождений шкал времени GPS и бортового (НИСЗ) приемника составили десятые доли наносекунды.

В ходе исследований значительное внимание также было уделено разработке и тестированию

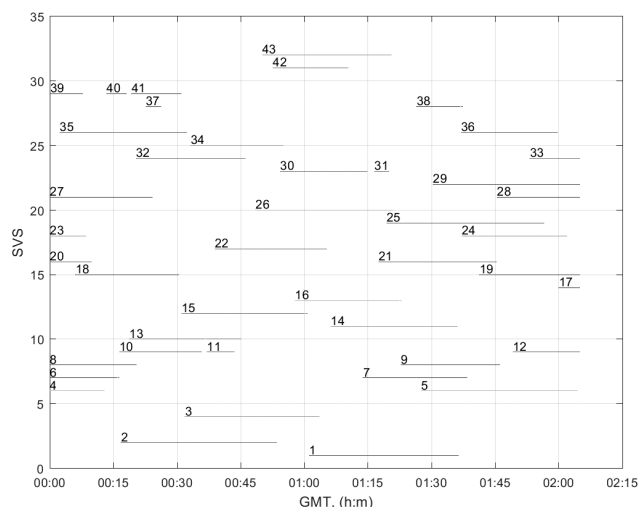


Рис. 2. Зоны радиовидимости спутников GPS

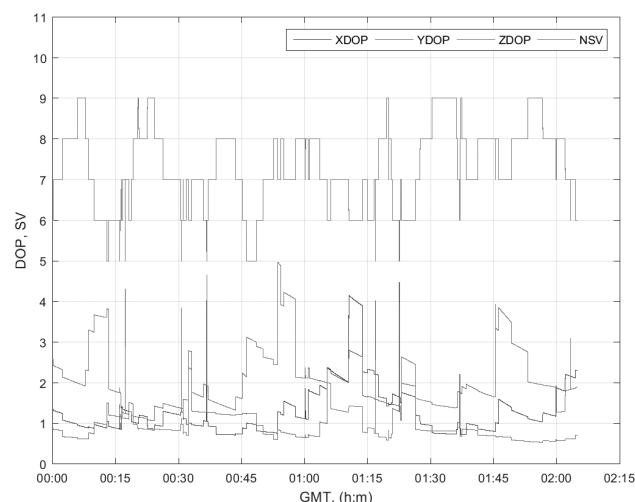


Рис. 3. Геометрические факторы текущего рабочего созвездия спутников GPS

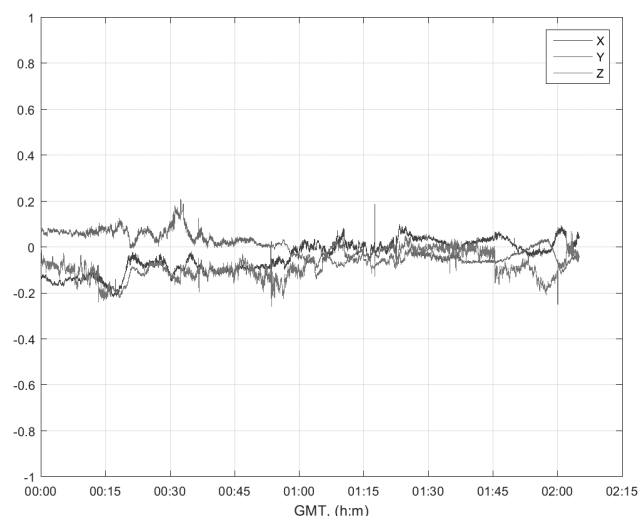


Рис. 4. Невязки (в метрах) “плавающего” (float) ИФ-решения относительно эталона

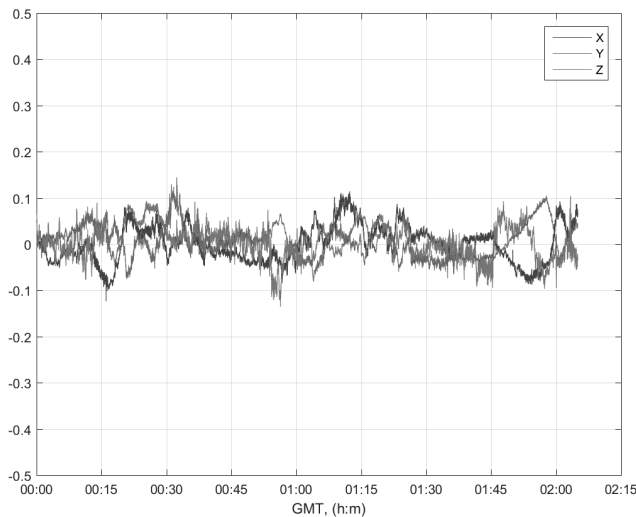


Рис. 5. Невязки (в метрах) дискретного (fixed) IF-решения относительно эталона

модели погрешностей GPS-наблюдений и координатных определений, а также эвристическому уточнению составляющих этой модели. Такие модели, в сочетании с апостериорной оценкой точности (в случае доступности независимого источника надежной эталонной информации) позволяют не только прогнозировать точность планируемых траекторных определений НИСЗ, но и играют первостепенную роль при определении области поиска дискретного фазового решения в ходе РФН для достижения наибольшей точности позиционирования. Детальное рассмотрение всех значимых источников и составляющих погрешностей недифференциальных GPS-наблюдений представлено в работе [4]. На данном же этапе исследований для float и fixed решений были уточнены следующие уровни (СКП) составляющие погрешностей IF-наблюдений:

- флуктуационные погрешности  $\sim 1,7$  см;
- погрешности часов GPS-спутников  $\sim 4$  см;
- погрешности эфемерид GPS-спутников  $\sim 2$  см;
- погрешности эталонной траектории  $\sim 1,7$  см;
- систематические погрешности априорных

координат (кодвое решение) рассчитываются по отдельной эмпирической формуле.

Использование указанных составляющих при вычислениях корреляционных матриц погрешностей координатных определений (float и fixed решений) показало приемлемое согласие полученных апостериорных и априорных оценок точности.

Сравнение достижимой сходимости “плавающего” и дискретного/целочисленного способов разрешения фазовой неоднозначности бортовых фазовых GPS-наблюдений при определении параметров траекторий НИСЗ показало, что дискретное/целочисленное РФН позволяет определять текущие координаты НИСЗ с предельными погрешностями  $\sim 5 \div 10$  см на интервалах наблюдений  $\sim 30 \div 40$  минут, в то время как “плавающее” (float) решение обе-

спечивает определение координат с погрешностями  $\sim 20$  см на интервалах  $\sim 2$  часа и более.

Дальнейшие исследования выполняются в направлениях:

- адаптации разработанных методов и алгоритмов PPP для работы в условиях мультисистемности (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo) в целях повышения надежности и точности траекторных определений;
- адаптации разработанных методов и алгоритмов точного PPP-позиционирования наземных/приземных потребителей;
- адаптации разработанных методов и алгоритмов PPP для работы в условиях реального времени.

## Выводы

1. Разработаны алгоритмические и программные средства обработки и анализа бортовых космических кодовых и фазовых GPS-наблюдений НИСЗ для целей точного позиционирования кинематическим методом без использования динамических моделей движения НИСЗ. Экспериментальное программно-алгоритмическое обеспечение (прототип) включает адаптированные для условий высокой динамики НИСЗ модули предварительной обработки GPS-наблюдений, решения задачи РФН, определений текущих координат НИСЗ по результатам фазовых измерений.

2. На основе сравнения полученных результатов обработки бортовых GPS-измерений с эталонными координатами НИСЗ FORMASAT-3 показано достижение точности определения текущих координат на уровне  $\sim 0,05-0,10$  м при реализации дискретного/целочисленного метода разрешения фазовой неоднозначности на интервалах наблюдений 30–40 мин и более.

3. Описаны составляющие модели погрешностей наблюдений и выполнены априорная и апостериорная оценки точности координатных определений НИСЗ.

4. Выполненная разработка при ее промышленной реализации может быть использована для высокоточной координатно-временной поддержки современных спутниковых технологий для обнаружения загрязнений, исследования эрозионных процессов, поддержки научно-прикладных проектов в таких областях, как геодезия, геофизика, климатология, орбитография, метеорология. Результаты исследований могут быть использованы и при решении задач маневрирования, сближения и стыковки НИСЗ.

## Список литературы

- [1] Laurichesse D., F. Mercier, J-P. Berthias, P. Broca and L. Cerri. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its

- Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination. *Navigation*. — 2009. — V. 56, No. 2. — P. 135–149.
- [2] Bisnath S., Collins P. Recent developments in Precise Point Positioning. *Geomatica*. — 2012. — V. 66, No. 2. — P. 375–385.
- [3] Космический проект «Ионосат-Микро»: монография / Под общ. ред. С.А. Засухи, О.П. Фёдорова. — Киев: Академперіодика, 2013. — 218 с.
- [4] Яковченко А.И. Основные источники и составляющие погрешностей ГНСС-наблюдений и их моделирование при реализации метода точного позиционирования PPP // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». — 2012. — № 169. — С. 315–330.
- [5] Жалило А.А., Дицкий И.В., Бессонов Е.А., Желанов А.А. Основные результаты разработок ХНУРЭ в области высокоточного ГНСС-позиционирования // Труды 5-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», 14–17 октября 2014 г.: тезисы докл. — г. Харьков, Украина. — Т. 1 ч. 2. — С. 62–65.
- [6] Жалило А.А. Разработка и тестирование новых эффективных методов и алгоритмов обнаружения и устранения фазовых скачков статических и кинематических ГНСС-наблюдений // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». — 2012. — № 171. — С. 340–371.
- [7] Жалило А.А., Дицкий И.В. Усовершенствованный метод разрешения фазовой неоднозначности двухчастотных дифференциальных фазовых ГНСС-наблюдений // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». — 2012. — № 169. — С. 277–301.