

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИЙ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ PPP-МЕТОДОМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БОРТОВЫХ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ

### Введение

Оборудование низкоорбитальных космических аппаратов (НКА) 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 частности, изучение атмосферы Земли связано с возможностью обеспечения приема навигационных сигналов ГНСС на борту НКА не только из верхней, но и частично из нижней полусферы обзора пространства, когда сигналы от навигационных спутников пронизывают значимую часть слоя атмосферы (ионосферы и тропосферы) Земли. С помощью двухчастотных измерений разностей фаз несущих навигационных сигналов могут быть реализованы методы радиозатменных (Radio Occultation) спутниковых измерений для трехмерного моделирования распределения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы и существенно улучшено моделирование ионосферы за счет совместной обработки бортовых и наземных ГНСС-наблюдений.

В настоящей работе, выполненной в рамках Целевой комплексной программы Национальной академии наук Украины по научным космическим исследованиям в 2015 г., описаны результаты создания и экспериментальной отработки отечественных технологий определения параметров траекторий низкоорбитальных космических аппаратов (НКА) методом PPP (Precise Point Positioning) (см., например, [1, 2]) по результатам двухчастотных наблюдений сигналов ГНСС, которые получены на борту НКА и переданы в наземные центры сбора и обработки измерений. Решение указанной задачи позволяет также оценить с высокой точностью ионосферные задержки навигационных сигналов для последующего моделирования ПЭС ионосферы. 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 IGS центров обработки наблюдений глобальной и региональных ГНСС-сетей перманентных станций. Задача заключалась в создании алгоритмических и программных средств определения параметров траекторий НКА с сантиметровой/субдециметровой точностью по результатам бортовых двухчастотных ГНСС-наблюдений кинематическим (геометрическим) методом, без использования динамических моделей движения НКА. Существенная проблема, которую нужно было решить в ходе выполнения исследований, заключалась в поиске, теоретическом обосновании и алгоритмической реализации оптимальной обработки фазовых ГНСС наблюдений, в частности в задачах устранения фазовых циклических скачков и разрешения фазовой неоднозначности (РФН) в условиях высокой динамики движения НКА и относительно коротких интервалов радиовидимости среднеорбитальных спутников ГНСС.

Для целей тестирования экспериментального программного обеспечения выполнены сбор и анализ бортовых GPS-наблюдений специализированных зарубежных НКА COSMIC/FORMASAT-3. Получены результаты координатно-временных 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. На основе сравнения полученных результатов обработки бортовых GPS-измерений с эталонными координатами НКА FORMASAT-3 показано достижение точности определения текущих координат на уровне  $\sim 0,05-0,10$  м при реализации дискретного/целочисленного метода разрешения фазовой неоднозначности (РФН).

## **Метод обработки наблюдений и использованный инструментарий**

Для условий высокой динамики (скорости) движения НКА были решены традиционные при реализации точного позиционирования задачи – устранения фазовых скачков и разрешения фазовой неоднозначности. Наличие однозначных фазовых наблюдений и их линейных комбинаций (на трассах «GPS спутники – НКА») дает возможность выполнить точные траекторные определения НКА и использовать методы [4, 5] радиозатменных измерений для моделирования высотного распределения ПЭС ионосферы по высокоточным фазовым наблюдениям, выявлять пространственно-временные изменения в ионосфере, как среды, чувствительной к внешним воздействиям.

Обработка спутниковых наблюдений методом PPP (оригинальная авторская реализация метода) выполнялась с использованием модифицированных к задачам обработки бортовых GPS-наблюдений НКА предыдущих собственных разработок [6 – 11] – 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, 10]. Предложенное решение задачи РФН состоит из четырех этапов. На первом этапе выполняется сглаживание кодовых наблюдений и расчет текущих координат «роверного» GPS приемника, которые затем используются как априорные значения при выполнении РФН линейной комбинации разностной частоты «Wide-Lane» (WL). Второй этап заключается в выполнении РФН линейной комбинации WL с учетом опыта многих зарубежных исследований, в частности описанного в работах [1, 2]. Целочисленное РФН линейных комбинаций WL выполняется: а) с использованием кодовых и фазовых коррекций аппаратных задержек сигналов спутников ГНСС (была использована вспомогательная информация центра CNES); б) с использованием известной линейной комбинации кодовых и фазовых наблюдений Melbourne-Wübbena. После определения начальных фазовых неоднозначностей WL-наблюдений осуществляется соответствующая их коррекция и координатное решение уточняется. После этого становится возможным выполнить РФН для наблюдений первой несущей частоты L1 (а затем и L2), используя т.н. «безионосферную» комбинацию «Ionosphere-Free» (IF), в чем и заключается третий этап обработки. Полученное целочисленное решение должно быть подвергнуто обязательной процедуре верификации (четвертый этап), т.е. подтверждению правильности оценки дискретных/целочисленных параметров неоднозначности на основе выбранных статистик и критериев. После полного выполнения РФН и введения коррекций в фазовые наблюдения становится возможным определение финальных, наиболее точных, координат приемника.

Для целей координатно-временных определений НКА и моделирования ионосферных задержек с использованием реальных GPS-наблюдений использована собственная отечественная разработка – прототип программно-математического обеспечения «ОСТАВА». Комплекс «ОСТАВА» позволяет осуществлять обработку статических и кинематических GPS-наблюдений и выполнять традиционное и сетевое позиционирование сантиметрового уровня точности в одночастотном и двухчастотных режимах. Для реализации метода PPP была выполнена соответствующая модернизация ряда программных модулей и формирование новых.

## **Исходные данные для тестирования алгоритмических и программных средств**

Для отработки программно-математического обеспечения были использованы GPS-наблюдения группировки НКА 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. Кроме данных бортовых GPS-наблюдений НКА использовалась дополнительная информация о параметрах бортовых измерительных системах НКА, параметрах ориентации и положения приемных антенн и самих космических аппаратов.

## Определение параметров движения НКА

Ниже приводятся результаты оценки точности координатных решений методом PPP для НКА COSMIC/FM1. В качестве эталонных значений при апостериорной оценке точности были использованы оценки координат НКА (с погрешностями на уровне  $\sim 5$  см), полученные исполнителями космической программы COSMIC путем комбинированной обработки бортовых GPS-наблюдений кинематическим и динамическим методами.

На рис.1 приведена иллюстрация результатов кодово-фазового PPP-решения по GPS-наблюдением НКА COSMIC на интервале времени  $\sim 2$  часа от начала суток 10 января 2013 г. – невязки (в метрах) кодово-фазового PPP-решения по отношению к эталону после процедуры «leveling» и дополнительной обработки, позволяющей уменьшить остаточные погрешности процедуры сглаживания. Вертикальными линиями выделен интервал ( $\sim 37$  минут), на котором на последующих этапах обработки наблюдений были получены PPP WL- и финальные IF-решения. На рис. 2 приведены геометрические факторы текущего рабочего созвездия спутников GPS для выделенного интервала оценивания, характеризующие ухудшение точности решения (по отношению к точности GPS-наблюдений) из-за влияния взаимного положения НКА и спутников GPS.

На рис. 3 и 4 показаны невязки IF-решений: «плавающего» (float) PPP-решения (рис.3), и целочисленного (fixed) PPP-решения (рис. 4). Среднеквадратичные погрешности float-решения относительно эталона на интервале накопления  $\sim 37$  минут составили  $\sim 0,04-0,09$  м (RMS) при уровне МНК-остатков  $\sim 0,01$  м. Последнее свидетельствует о хорошей внутренней сходимости решения на уровне погрешностей фазовых измерений. Сравнение погрешностей «float» и «fixed» IF-решений показывает, что целочисленное решение заметно точнее «плавающего» – предельные погрешности лежат в пределах  $\sim 0,05-0,10$  м при несколько большем уровне МНК-остатков. В обоих случаях (float и fixed решения) определение текущих координат НКА было выполнено геометрическим методом (без использования динамической модели движения). Погрешности определения расхождений шкал времени GPS и бортового (НКА) приемника составили десятые доли наносекунды.

Сходимость float PPP-решения (зависимость изменения уровня погрешностей определенных от интервала наблюдения) характеризуют данные в табл.1.

Таблица 1

Интервал наблюдения / количество оцениваемых фазовых констант	10 мин. / 6	20 мин. / 9	37 мин. / 12
Априорная информация о координатах X,Y,Z отсутствует; используются только фазовые IF-наблюдения; СКП (IF-наблюдений) = 0.01 м			
СКП (X), м	1.46	0.29	0.20
СКП (Y), м	1.53	0.42	0.24
СКП (Z), м	0.92	0.14	0.08
Априорная информация (WL-решение) о координатах X,Y,Z используется вместе с фазовыми IF-наблюдениями; СКП (координат X,Y,Z)=0.1 м; СКП (IF-наблюдений) = 0.01 м			
СКП (X), м	0.08	0.07	0.09
СКП (Y), м	0.11	0.09	0.06
СКП (Z), м	0.06	0.05	0.04

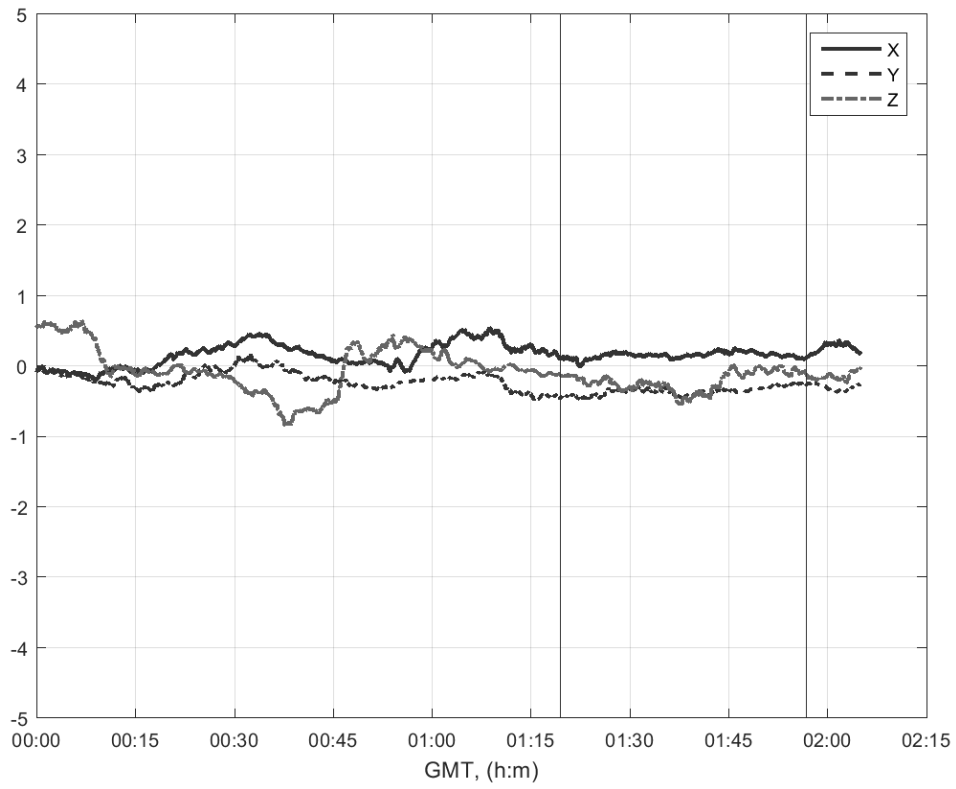


Рис. 1

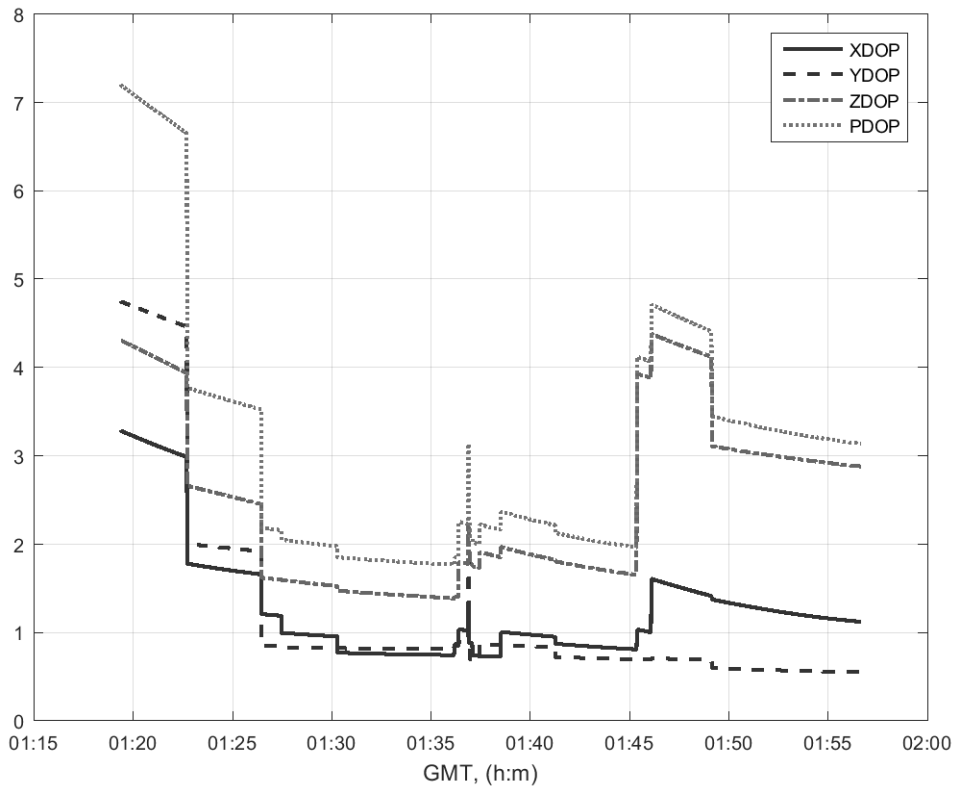


Рис. 2

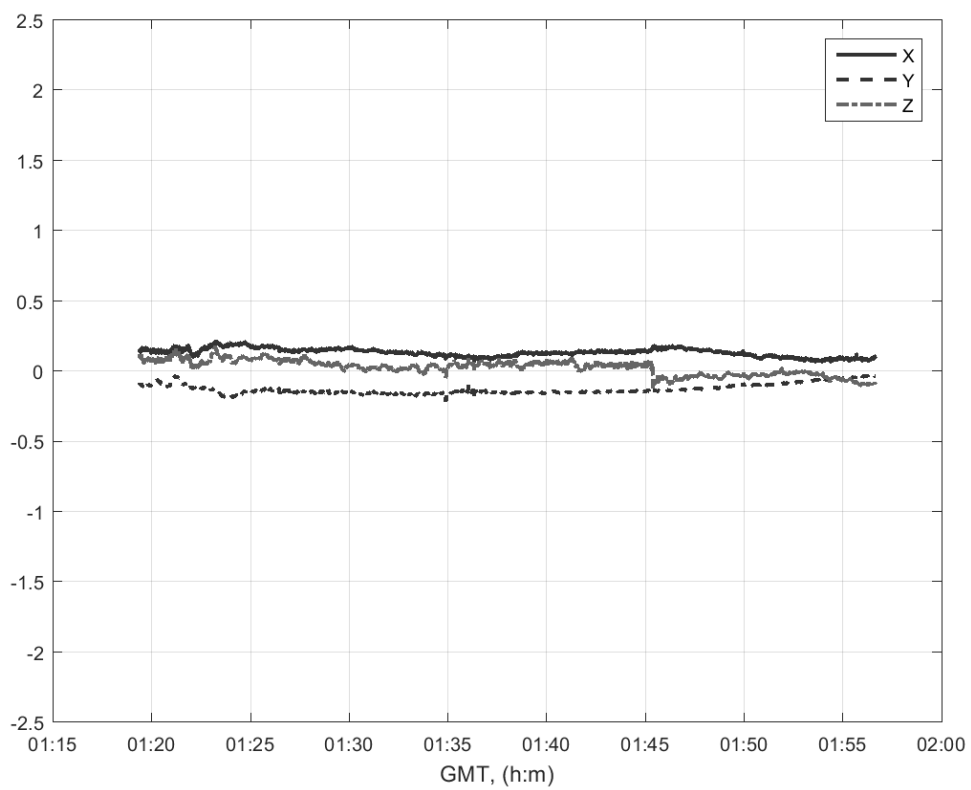


Рис. 3

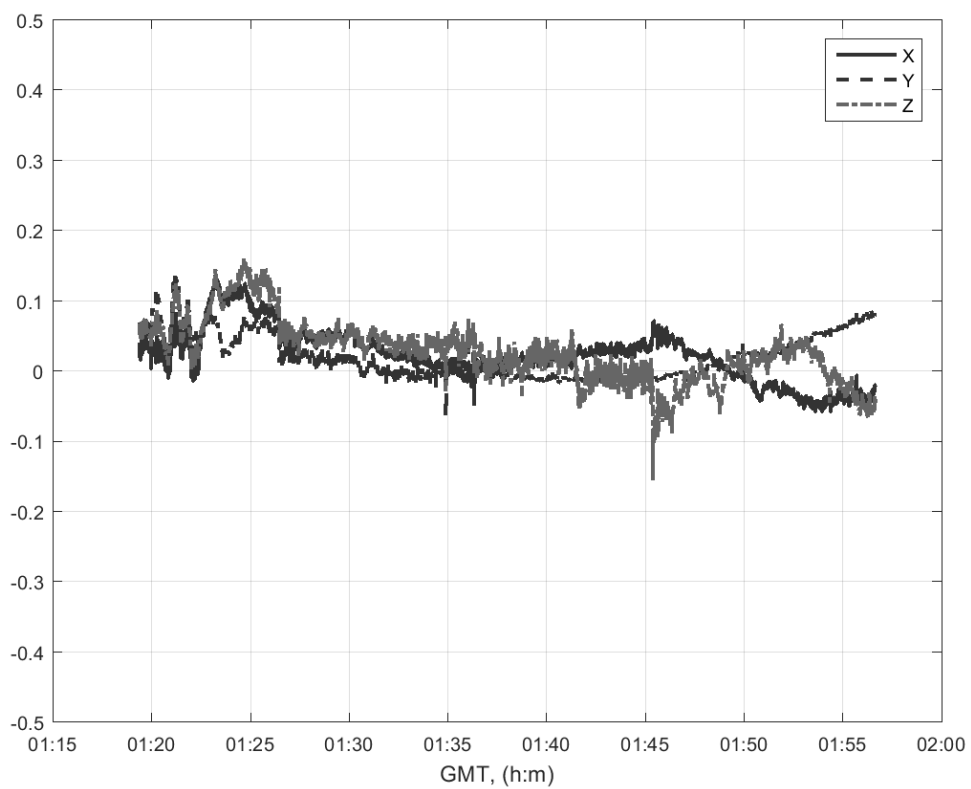


Рис. 4

После выполнения целочисленного разрешения фазовой неоднозначности возможно формирование фазовых ионосферных комбинаций бортовых GPS-наблюдений НКА для моделирования ПЭС ионосферы с миллиметровой точностью.

## Выводы

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

2. На основе сравнения полученных результатов траекторных GPS-измерений с эталонными координатами показано достижение сантиметровой точности позиционирования низкоорбитальных космических аппаратов кинематическим методом.

3. Разработка при ее промышленной реализации может быть использована:

– для осуществления систематического контроля ПЭС ионосферы и его возмущений, поддержки научно-прикладных проектов в таких областях, как геодезия, геофизика, климатология, орбитография, метеорология;

– высокоточной координатно-временной поддержки современных SAR (Synthetic Aperture Radar) и INSAR (Interferometric SAR) технологий для обнаружения загрязнений, исследования эрозионных процессов, оценки ущерба при чрезвычайных ситуациях, мониторинга нефтегазовых месторождений и др.

**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, Vol.56, No.2, pp.135-149. 2. Bisnath S., Collins P. Recent developments in Precise Point Positioning. *Geomatica*, Vol. 66, No.2, 2012. pp.375-385. 3. *Космический проект «Ионосат-Микро»*; под общ. ред. С.А. Засухи, О.П. Федорова. – Киев : Академперіодика, 2013. – 218с. 4. Яковлев О. И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. – М. : Книжный дом «Либроком», 2010. – 208 с. 5. Андреевский С.Е., Кузнецов В.Д., Синельников В.М. Радиозатменные измерения электронной концентрации ионосферы с помощью спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС/Galileo // *Космический проект «Ионосат-Микро»*; под общ. ред. С.А Засухи, О.П. Федорова. – К. : Академперіодика, 2013. – С. 69-80. 6. Жалило А.А. Разработка и тестирование новых эффективных методов и алгоритмов обнаружения и устранения фазовых скачков статических и кинематических ГНСС-наблюдений // *Радиотехника*. – 2012. – № 171. – С. 340–371. 7. Жалило А.А., Дицкий И.В. Усовершенствованный метод разрешения фазовой неоднозначности двухчастотных дифференциальных фазовых ГНСС-наблюдений // *Радиотехника*. – 2012. – № 169. – С. 277-301. 8. Яковченко А.И. Основные источники и составляющие погрешностей ГНСС-наблюдений и их моделирование при реализации метода точного позиционирования PPP // *Радиотехника*. – 2012. – № 169. – С. 315-330. 9. Жалило А.А., Желанов А.А., Бессонов Е.А., Дицкий И.В. Экспериментальная отработка программно-математического инструментария обработки наблюдений сети наземных перманентных референциальных ГНСС станций Украины для оценки и моделирования полного электронного содержания ионосферы в рамках международного проекта «Ионосат-Микро» // *Космический проект «Ионосат-Микро»*; под общ. ред. С.А Засухи, О.П. Федорова. – К. : Академперіодика, 2013. – С. 200-209. 10. Дицкий И.В. Разрешение фазовой неоднозначности двухчастотных дифференциальных фазовых ГНСС-наблюдений и высокоточное позиционирование на базовых удаленностях до 1000 км // *Радиотехника*. – 2014. – № 179. – С. 99-106. 11. Жалило А.А., Дицкий И.В., Бессонов Е.А., Желанов А.А. Основные результаты разработок ХНУРЭ в области высокоточного ГНСС-позиционирования // *Труды 5-го Междунар. радиоэлектрон. форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития»*, 14-17 октября 2014 г. : тезисы докл. – Харьков, Украина. – Т.1, ч.2. – С. 62–65.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.02.2016