

УДК 551.501.8

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТЫ И МЕСТА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ GALILEO И BEIDOU

**Сабденбекулы О., Рамазанова Б.К., Раскельдинов А.И.**

*Карагандинский государственный технический университет, Караганда,  
e-mail: erok\_botashca@mail.ru*

Данная статья посвящена интеграции Galileo и BeiDou в PPP, вместе с GPS и ГЛОНАСС. Спутниковые орбиты и время для всех систем создаются с помощью согласования сети с данными наблюдений, собранных IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX), а также от собственной опорной станции сети Fugro. Описывается стратегия обработки орбиты, и оценивается точность орбиты для Galileo и BeiDou, посредством орбитального перекрытия для различных длин дуг. Представлены кинематические результаты позиционирования после обработки мульти-GNSS. Обсуждается польза от PPP мультисистем с точки зрения расширенного доступа и позиционной точности.

**Ключевые слова:** BeiDou, Galileo, Межсистемные смещения, точное место позиционирования мультисистем.

## ORBIT DETERMINATION AND POINT POSITIONING USING GALILEO AND BEIDOU

**Sabdenbekuly O., Ramazanova B.K., Raskeldinov A.I.**

*Karaganda State Technical University, Karaganda, e-mail: erok\_botashca@mail.ru*

This paper focuses on the integration of Galileo and BeiDou in PPP, together with GPS and Glonass. Satellite orbits and clocks for all constellations are generated using a network adjustment with observation data collected by the IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX), as well as from Fugro proprietary reference station network. Describes the strategy of processing the orbit, and the estimated accuracy of the orbit for the Galileo and BeiDou, through orbital overlap for different lengths of arcs. Presented the results of kinematic positioning after processing multi-GNSS. We discuss the benefits of PPP multisystems in terms of increased access and positional accuracy.

**Keywords:** BeiDou, Galileo, Intersystem-biases, Multi-constellation Precise Point Positioning

### Введение

Техника точного позиционирования (PPP) стала наиболее значительной в приложениях высокоточного позиционирования в течение последних лет, так как она позволяет точно оценивать координаты ресивера и не требует наличия ближайшей базовой станции. PPP имеет другое интересное применение, как например синхронизация времени, характеристики ионосферы и тропосферы, или калибровка погрешности.

Международная GNSS служба (IGS) постоянно регулирует точную орбиту и временные расчеты для GPS и ГЛОНАСС с помощью плотной глобальной сети и нескольких содействующих аналитических центров. Используя эти продукты и моделирование точного наблюдения, точность статического абсолютного позиционирования может достигать 1 сантиметра в постобработке. В кинематических приложениях точность измерения достигает 10 сантиметров. Пользователи в режиме реального времени могут также получить доступ к орбите и синхронизации времени с помощью RTCM потоков, уровень точности которого достигает дециметров в режиме реального времени. Кроме того, существуют несколько коммерческих PPP сервисов по использованию

GPS и Глонасс, например, такие как G2 FUGRO или Trimble's RTX, который также поддерживает японский QZSS (Quasi-Zenith Satellite System).

Эта статья фокусируется на вкладе Galileo и BeiDou в PPP. Предпосылками этого является формирование точной спутниковой орбиты и времени для новых созвездий. Это осуществляется с помощью уравнивания по методу наименьших квадратов, используя данные наблюдений из IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX), а также от собственной сети FUGRO, которая стала доступна для данного исследования.

### Данные отслеживания

С развитием новых навигационных систем, в 2011 году IGS запустило Multi-GNSS эксперимент (MGEX), направленный на модернизацию существующей сети станций для поддержки новых созвездий. Большинство станций в кампании MGEX являются Galileo-адаптированными, и множество из них также отслеживает BeiDou. Станция Fugro управляет всемирной сетью базовых станций для поддержки своих услуг позиционирования в коммерческих целях. Что касается частотного плана для новых систем, BeiDou передает сигналы в трех диапазонах частоты: 1589,74 МГц (B1), 1207,14 МГц (B2) и 1268,52 МГц

(B3), в то время как Galileo передает открытые сигналы в диапазонах E1 (1575,42 МГц), E5a (1176,45 МГц), E5b (1207,14 МГц) и E5a + B (1195,795 МГц), а также в дополнение для будущей коммерческой эксплуатации в диапазоне E6 (1278,75 МГц).

Все станции Fugro, оснащенные Trimble NetR9 ресиверами, обеспечивают Galileo и Beidou данными на всех частотах. Для того чтобы максимизировать доступность данных с существующими наблюдениями для последующего анализа были отобраны сигналы Galileo E1 и E5a, а также BeiDou B1 и B2. Наблюдаемые сигналы обрабатываются с помощью не зависящей от ионосферы ли-

нейной комбинации, уравнений наблюдений которых детально рассмотрены в следующем разделе [1].

### Уравнения наблюдений. Орбита и расчет времени

Для этого исследования предложенные уравнения GPS наблюдений были расширены для размещения наблюдений мульти-GNSS, учитывая погрешность параметров между различными созвездиями. Результатами независимой от ионосферы линейной комбинации для каждой GNSS, для псевдодальности P и диапазона L, между станцией I и спутником J, являются:

$$P_i^{j,GPS} = \rho_i^j + v^j \Gamma_i + c(\delta t_i - \delta t^j) + \varepsilon_{P_i}^j \quad (1)$$

$$L_i^{j,GPS} = \rho_i^j + v^j \Gamma_i + c(\delta t_i - \delta t^j) + \alpha_i^j + \varepsilon_{L_i}^j \quad (2)$$

$$P_i^{j,GLO} = \rho_i^j + v^j \Gamma_i + c(\delta t_i - \delta t^j + ISB_i^{j,GLO}) + \varepsilon_{P_i}^j \quad (3)$$

$$L_i^{j,GPS} = \rho_i^j + v^j \Gamma_i + c(\delta t_i - \delta t^j + ISB_i^{j,GLO}) + \alpha_i^j + \varepsilon_{L_i}^j \quad (4)$$

$$P_i^{j,GLO} = \rho_i^j + v^j \Gamma_i + c(\delta t_i - \delta t^j + ISB_i^{GAL}) + \varepsilon_{P_i}^j \quad (5)$$

$$L_i^{j,GAL} = \rho_i^j + v^j \Gamma_i + c(\delta t_i - \delta t^j + ISB_i^{GAL}) + \alpha_i^j + \varepsilon_{L_i}^j \quad (6)$$

$$P_i^{j,BEI} = \rho_i^j + v^j \Gamma_i + c(\delta t_i - \delta t^j + ISB_i^{BEI}) + \varepsilon_{P_i}^j \quad (7)$$

$$L_i^{j,BEI} = \rho_i^j + v^j \Gamma_i + c(\delta t_i - \delta t^j + ISB_i^{BEI}) + \alpha_i^j + \varepsilon_{L_i}^j \quad (8)$$

где:

- $\rho_i^j$  – это геометрическое расстояние между станцией и спутником;
- $v^j \Gamma_i$  – влажная тропосферная задержка между станцией и спутником, где  $\Gamma_i$  – тропосферная зенитная задержка и  $v^j$  – топографическая ассоциированная функция зависимости высоты небесного тела над горизонтом;
- $\delta t_i$  и  $\delta t^j$  – компенсация ресивера и времени спутника соответственно;
- $c$  – скорость света;
- $ISB_i^{j,GLO}$  – условия межсистемной погрешности GPS-Глонасс;
- $ISB_i^{GAL}$  и  $ISB_i^{BEI}$  – это межсистемные погрешности GPS-Galileo и GPS-BeiDou соответственно;
- $\alpha_i^j$  – термин неопределенности между станцией и спутником, связанный с измерением фазы несущей частоты;
- $\varepsilon_{P_i}^j$  и  $\varepsilon_{L_i}^j$  – неучтенные эффекты, такие как тепловые шум и многолучевое распространение, для псевдодальности и фазы несущей частоты, соответственно. Следует отметить, что для измерений GNSS  $\varepsilon_{L_i}^j \ll \varepsilon_{P_i}^j$ .

Для оценки орбиты и времени был использован пакет программного обеспечения NAPEOS. Данное программное обеспечение было расширено с целью обработки Beidou на вершине существующих возможностей для GPS, ГЛОНАСС и Galileo.

Для того, чтобы получить априори орбиту для GPS и ГЛОНАСС возможно использование эфемерид трансляции. Для Galileo испытание эфемерид началось в марте 2014 года, но спутники еще не в лучшем состоянии, так как эти данные не всегда надежные. В настоящее время станции MGEX не предоставляют эфемерид для Beidou, По этим причинам, как для Galileo так и для Beidou используются двулинейные элементы (TLEs), с целью получить инициализацию априори орбиты. Точность этой априорной орбиты находится на уровне точности до километра. В первой стадии обработки выполняется оценка наименьших квадратов, используя только наблюдения псевдодальности, для того, чтобы улучшить TLE-производные орбиты и получить время априори спутника для Galileo и BeiDou. После этого шага, точность орбиты достигает одного метра, похоже на то, что

получается при GPS и ГЛОНАСС с помощью трансляции эфемерид.

На втором этапе, используются наблюдения псевдодальности и фазы несущей, с целью получить пользу от точности измерений фазы несущей. Расчетными параметрами являются векторы состояния спутников, параметры давления солнечного излучения, тропосферные задержки из-за влажности, время спутника и станции, условия межсистемного смещения и неясности фазы несущей.

Наконец, для того, чтобы получить подходящие часы для PPP при выборке за 30 секунд, выполняется процесс конечного уплотнения времени. В этом заключительном шаге, оцениваются только станция и время спутника. Все остальные параметры остаются неизменными к предыдущим оценкам [2].

#### **Моделирование для Galileo и Beidou.**

Будучи относительно новыми, системы BeiDou и Galileo имеют ряд ограничений моделирования по сравнению с более зрелыми системами, таких как GPS и Глонасс. Влияние этих ограничений будет рассмотрено в текущем разделе.

Стали доступны поправки точности фазового центра антенны GPS и ГЛОНАСС как части деятельности IGS через формат Antenna Exchange (ANTEX) для передающих и приемных антенн. Эти поправки точности пока не доступны ни для Galileo ни для BeiDou. Для спутниковых антенн MGEX project выпустила приблизительные значения для расстояния между спутниковым центром множества и фазового центра антенны. Это  $[0,2, 0, 0,6]$  м для Galileo и  $[0,6, 0, 1.1]$  м для BeiDou, XYZ с точки зрения зафиксированного тела спутника.

Ожидается, что эти значения имеют неопределенность около 10 см. Также ожидается, что на приемных антеннах смещение фазового центра и вариации зависимости от азимута и угла возвышения для частот Galileo и BeiDou будет слегка отличаться (до нескольких сантиметров) от тех, которые используются для GPS, из-за разницы частот, используемых Galileo и Beidou. На момент написания статьи нет общедоступных калибровок для антенн, используемых в станциях MGEX. Для этого исследования были использованы GPS калибровки для Galileo и Beidou, которые представляют дополнительную неопределенность ниже 10 см.

#### **Межсистемные погрешности**

При обработке наблюдений мульти-GNSS должны быть приняты во внимание межсистемные погрешности. Для Глонасс эти смещения широко проанализированы в литературе и это исследование будет в основном сосредоточено на Galileo и Beidou. Как описано в разделе 3, одного параметра

на станцию и систему (Galileo или BeiDou) достаточно для объяснения межсистемных погрешностей, как и все спутники используют один и тот же частотный носитель.

Кроме того, для того, чтобы определить исходное время, в процессе оценки орбиты и времени для каждого созвездия ко всем внутрисистемным погрешностям было применено условие со средним нулевым. Такой подход позволяет оценить относительные различия в межсистемных погрешностях между различными ресиверами в сети.

Ежедневные межсистемные погрешности для каждого созвездия изображены на рис. 1. Как правило, сильную зависимость ресивера можно наблюдать со всеми станциями с такой же моделью ресивера, показывающей подобные погрешности. Исключение было найдено в ресивере WTZZ (Javad Delta G3T), который показывает значительные различия по отношению к другим Javad ресиверам. Одно из возможных объяснений является то, что этот ресивер имеет отличную архитектуру, которая позволяет ему отслеживать также Beidou.

#### **Оценка точного места позиционирования**

Для точного места позиционирования мультисозвездий в NAPEOS был реализован новый алгоритм кинематического PPP, на основе последовательных наименьших квадратов и наблюдение уравнения, описанного в разделе 3.

Для того чтобы оценить эффект точного места позиционирования мульти-созвездия были отобраны некоторые базовые станции от сети MGEX. Это KOUR (Куру, Французская Гвиана), BRST (Брест, Франция), Nnor (Нью-Норция, Австралия) и JFNG (Jiufeng, Китай). Все станции отслеживают GPS, ГЛОНАСС, Galileo и Beidou MEO. Кроме того, JFNG и Nnor также отслеживают BeiDou IGSO и GEO спутники, благодаря своему географическому местоположению [3].

Рисунок 2 показывает результаты кинематического PPP мульти-GNSS для станции Nnor 26 августа 2014 года. Квантили 95% погрешности определения местоположения составляют 1,74, 1,16 и 3,95 см, на востоке, севере и компонентом возвышения, соответственно, после удаления первых двух часов периода конвергенции. Для того, чтобы оценить пользу от мульти-GNSS PPP были получены ежедневные результаты кинематического PPP в течение месяца августа 2014 года для всех четырех станций в различных конфигурациях: только GPS, GPS + ГЛОНАСС, GPS + ГЛОНАСС + Galileo и GPS + ГЛОНАСС + Galileo + BeiDou. Средняя ежемесячная процентилля каждодневных 95% погрешностей положения обобщены в рис. 3.

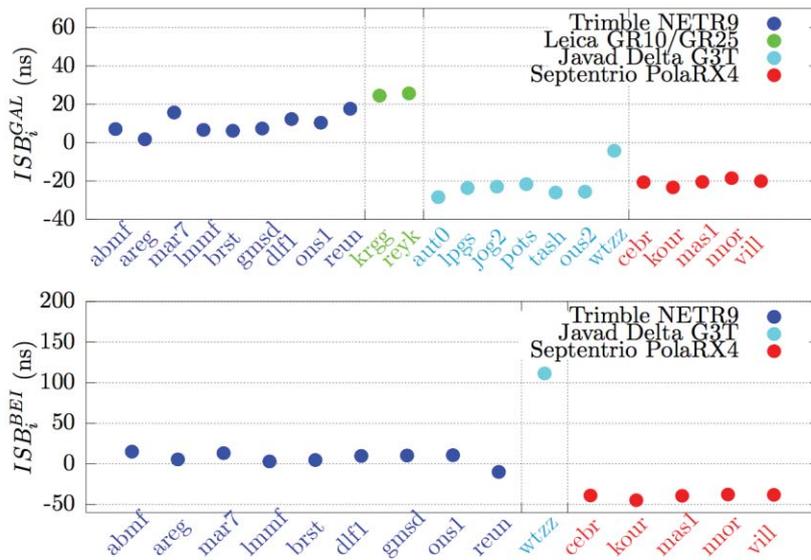


Рис. 1. Оценка межсистемных погрешностей для ряда ресиверов в сети MGEX, Galileo (вверху) и Beidou (внизу)

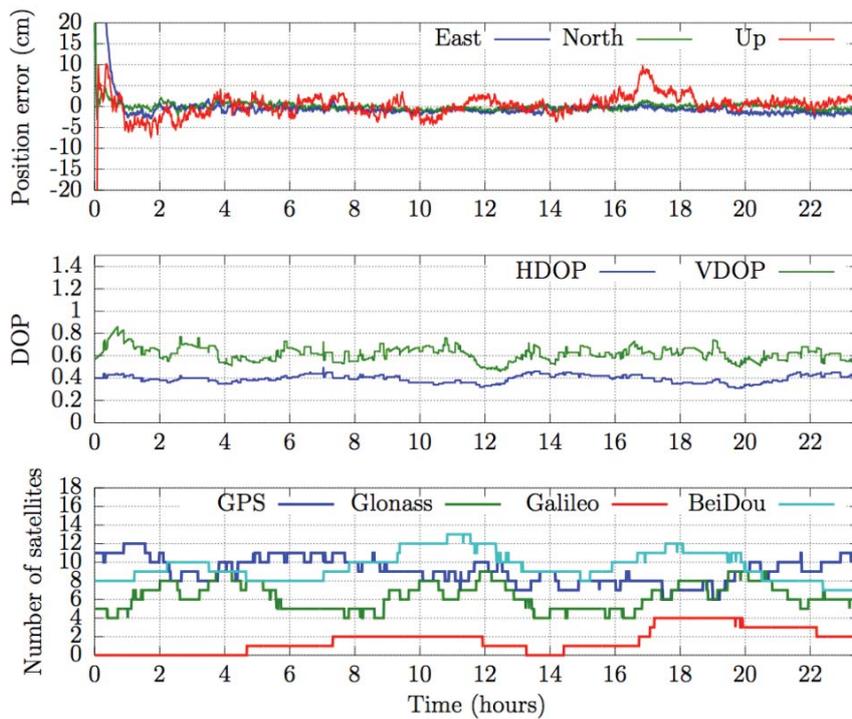


Рис. 2. Результаты кинематического PPP для станции Nnor на 26 августа 2014 г.

Далее Galileo улучшает вертикальную погрешность на 3,5% и дополнительное улучшение с Beidou на 6,7%. Вклад Galileo в верхней части GPS и Глонасс является относительно небольшим, вследствие небольшого количества доступных спутников, видимого со станции в ограниченный период времени в день. Вклад Beidou немного более важен,

особенно в JFNG и Nnor, где IGSO и GEO также способствуют разрешению позиционирования в этих местах. PPP мульти-созвездия особенно подходит в ситуациях с пониженной видимостью неба, где увеличенное количество спутников позволяет чтобы получить значительно высокую доступность и точность по сравнению с автономной GPS.

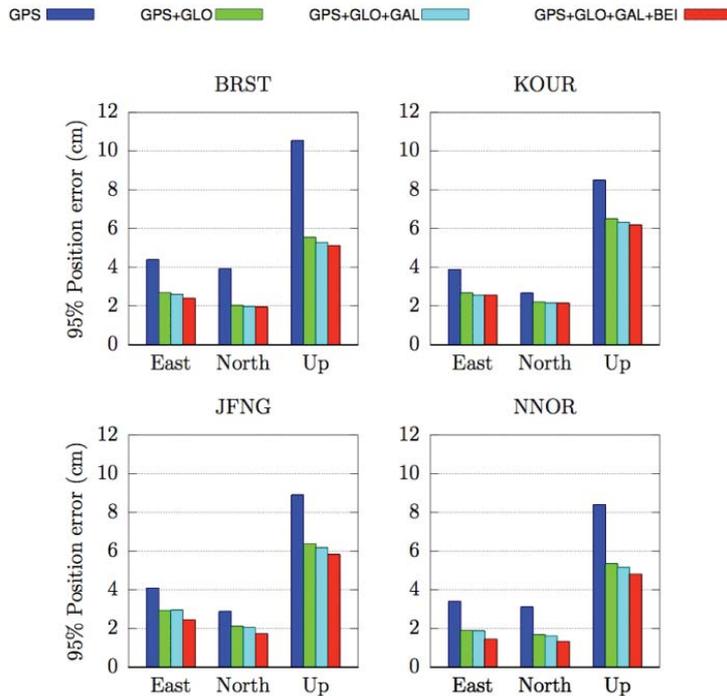


Рис. 3. Статистика кинематического позиционирования мульти-созвездий для нескольких станции в MGEX

Для того чтобы смоделировать этот сценарий, двигатель PPP был запущен с несколькими отсечениями углов высоты от 0 (полная видимость неба) до 35 (снижение

видимости неба) градусов. Результаты для станции Nnor изображены на рис. 4, с точки зрения точности позиционирования и средней ухудшения точности.

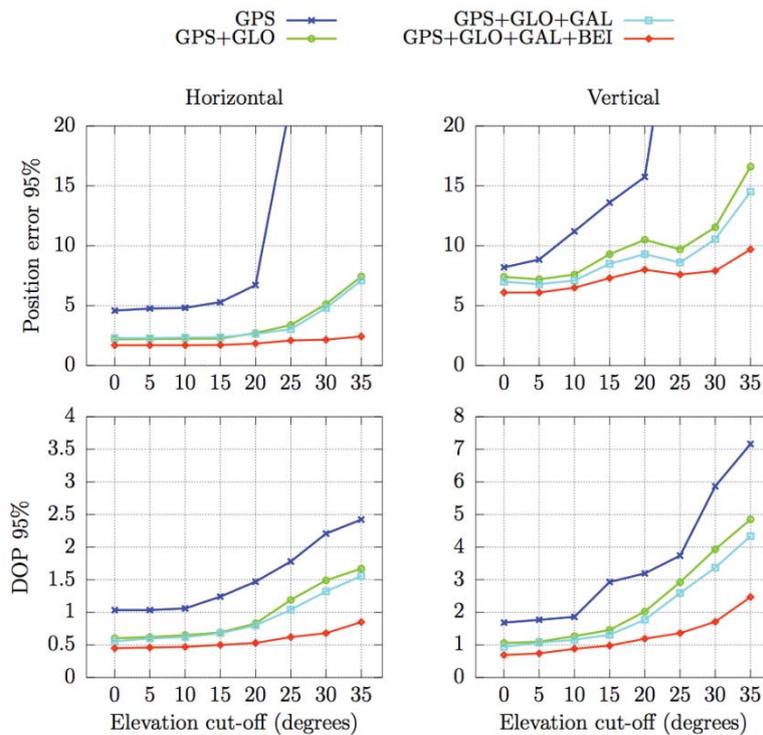


Рис. 4. Статика позиционирование и ухудшения точности (DOP), для ряда станций и отсеченных углов, для станции Nnor 26 августа, 2014 г.

Можно наблюдать, как точность разрешения единственного GPS быстро деградирует с частичной видимостью неба. Разрешение мульти-GNSS ведет себя значительно лучше в этом состоянии, в частности со всеми четырьмя созвездиями, где точность до дециметра все же можно получить даже при сценарии в 35 градусного отсечения, в основном благодаря увеличению числа спутников видимых для Beidou на вершине GPS, ГЛОНАСС и Galileo. В этом случае, Galileo улучшает точность по вертикали на 12,6%, и BeiDou приносит дополнительное улучшение на 33,1% [4].

### Выводы

GNSS landscape стремительно развивается, с добавлением возникающих спутниковых систем на вершине GPS и ГЛОНАСС. В этом исследовании результаты оценки точной орбиты были представлены Galileo и Beidou. Достигнутая точность орбиты, как правило, на дециметровом уровне для Galileo и BeiDou MEO и IGSO спутников. Оценка орбиты GEO спутников является сложной задачей из-за отсутствия изменения геометрии по сети опорной станции, и точность оценки достигает уровня 10 см. Спутниковое моделирование оставляет место для дальнейших исследований, с точки зрения корректировки фазового центра антенны и моделирования точной позиции.

Значительные различия межсистемных погрешностей были обнаружены между

различными брендами ресиверов, которыми нельзя пренебречь для точных приложений. Были представлены уравнения расширенного наблюдения с учетом этих погрешностей, как в настройке сети, так и в разрешениях PPP. Кинематические результаты PPP мульти-GNSS показывают повышенную точность при использовании всех четырех спутниковых систем вместе. Однако, улучшение точности относительно невелико по сравнению с GPS + ГЛОНАСС в случае хорошей видимости на небе. Улучшение становится более существенным при условиях пониженной видимости, где увеличение числа спутников позволяет получить значительно более высокую точность и доступность для определения местоположения. Можно ожидать, что этот уровень производительности будет распространен по всему миру с дальнейшим развертыванием Galileo и Beidou в течение этого десятилетия.

### Список литературы

1. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. – М.: Картгеоцентр, 2004. – 355 с.
2. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 268 с.
3. Reussner N., Wanninger L. GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution // Proc. of the Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. – 2011. – P. 712-716.
4. Wanninger L. Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers // J Geod. – 2012. – P. 139-148.