

УЧЁТ «WIND-UP»-ЭФФЕКТА В ЗАДАЧАХ ВЫСОКОТОЧНОГО GPS-ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Введение

В настоящее время при выполнении геодезических работ требуется, как правило, сантиметровая и даже миллиметровая точность координатных определений (позиционирования). Классическим эффективным методом повышения точности GPS-позиционирования является применение дифференциального режима [1]. Дифференциальный режим предполагает использование одного или более базовых приёмников (станций), размещённых в точках с известными координатами, которые одновременно с приёмником потребителя (подвижным, «роверным» приёмником) осуществляют приём сигналов одних и тех же спутников. Повышение точности навигационных определений достигается за счёт того, что погрешности измерения навигационных параметров «роверного» приемника и базовой станции являются сильно коррелированными. При формировании разностей измеряемых параметров большая часть систематических погрешностей компенсируется. Недостатки и ограничения дифференциального режима вытекают из самого принципа измерений. Во-первых, для проведения измерений необходимо наличие одной или более дополнительных базовых станций, что значительно удорожает съёмку и не всегда может быть осуществимо. Во-вторых, точность определений зависит от степени коррелированности погрешностей измерений, которая уменьшается при увеличении расстояния между роверным приемником и базовой станцией. Таким образом, применение дифференциального режима предполагает наличие развитой инфраструктуры сети опорных GPS-станций. В связи с тем, что действующие в настоящее время на территории Украины сети базовых станций являются разреженными, во многих практических случаях достижение требуемой точности с приемлемыми затратами в большинстве регионов Украины становится проблематичным. В этих условиях альтернативой является относительно недавно появившийся и набирающий популярность метод точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning) [2, 3]. Важнейшей особенностью метода PPP является то, что он не требует наличия и использования базовых станций. Для компенсации основных погрешностей данный метод предполагает использование высокоточных оценок орбит и часов спутников, оценок тропосферных и ионосферных параметров, межчастотных задержек в радиотрактах спутников. Данную информацию формируют и предоставляют для массового бесплатного использования в международных сервисных центрах обработки GPS/GNSS наблюдений, таких как IGS, EPN, BKG, JPL и др.

При реализации метода PPP принципиальное значение приобретает учёт (компенсация) влияния ряда специфических источников погрешностей. В частности, речь идет о геодинамических эффектах и о вкладе дополнительного фазового набега («накрутки» фазы несущей), который в англоязычной литературе получил название «wind-up»-эффекта, обусловленного изменением взаимной ориентации (вращением) антенн спутника и приёмника [4]. Фазовые набеги из-за этого эффекта могут достигать значительных величин, что приводит к необходимости их точного учета. Например, в случае вращения спутника вокруг его продольной оси в ходе коррекции ориентации его солнечных батарей фазовые набеги несущих могут достигать одного цикла. Этот эффект обычно не принимают во внимание при дифференциальных определениях, так как в значительной мере он компенсируется при формировании разностей фазовых наблюдений.

Фазовые набеги из-за «wind-up»-эффекта, обусловленного возможным вращением приемной антенны при движении объекта, достигают величин $\Delta\phi = 2\pi k + \phi_0$, где k – количество полных оборотов, а ϕ_0 – доля оборота антенны на заданном интервале наблюдения. Этот вид «wind-up»-эффекта полностью компенсируется путем формирования разностей фазовых наблюдений между спутниками и поэтому здесь не рассматривается.

В данной работе рассмотрен известный алгоритм учета (компенсации) «wind-up»-эффекта, обусловленного вращением передающих антенн спутников GPS, представлены результаты оценки и анализа фазовых погрешностей, вызванных эволюциями угловой ориентации различных GPS спутников, а также представлены рекомендации по расчёту и вводу соответствующих коррекций в результаты фазовых наблюдений в задачах высокоточного PPP-позиционирования.

Сущность «wind-up»-эффекта, алгоритм расчёта поправок

Рассмотрим более детально сущность «wind-up»-эффекта. Спутники GPS передают радиосигналы с правой круговой поляризацией, следовательно, наблюдаемая фаза несущей зависит от взаимной ориентации антенн спутника и приёмника [4, 5]. Например, осуществление одного оборота любой из антенн – спутника или приёмника – вокруг ее оси приведет к изменению фазы несущей на величину одного цикла (одной длины волны). Это явление и называется эффектом накрутки фазы несущей («wind-up»-эффект) [4]. Положим, что антенна приёмника не вращается и остаётся ориентированной в фиксированном направлении. Для поддержки энергии питания бортовой аппаратуры спутников их солнечные панели должны быть всегда ориентированы в сторону Солнца (ось X на рис.1), в то время как передающая антенна спутника направлена в центр Земли (ось Z). Поэтому для получения максимальной энергии бортовые системы управления спутников медленно вращают спутники, а, значит, и антенны, вокруг продольной оси (т.е., относительно наземного приемника) в соответствии с изменением геометрии «спутник–Солнце».

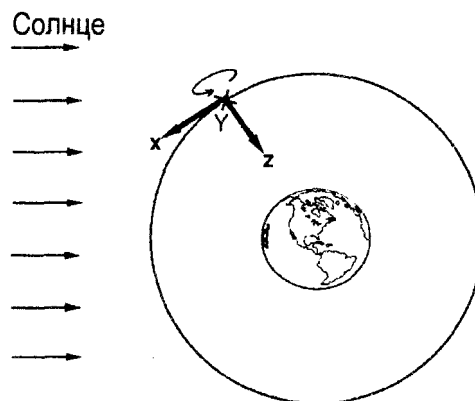


Рис. 1

В случае, когда спутник пересекает воображаемую линию, соединяющую Солнце и Землю, наблюдается периоды более быстрого вращения спутника, так называемые «полуденный» (когда спутник расположен между Солнцем и Землей) и «полуночный» (когда спутник расположен в тени Земли) развороты. При этом антенна спутника менее чем за полчаса делает разворот на 180° , что приводит к резкому изменению фазы наблюдаемых сигналов на половину длины волны.

Согласно [4], коррекция фазы (в радианах) может быть вычислена из скалярного (\cdot) и векторного (\times) произведения:

$$\Delta\phi = \text{sign}(\zeta) \text{Cos}^{-1}(\mathbf{D}' \cdot \mathbf{D} / D' \|D\|), \quad (1)$$

Где $\zeta = \bar{k} \cdot (\mathbf{D}' \times \mathbf{D})$, \bar{k} – единичный вектор спутник-приёмник и \mathbf{D}' , \mathbf{D} – эффективные дипольные вектора спутника и приёмника, вычисленные по текущему единичному вектору положения корпуса спутника $(\bar{x}', \bar{y}', \bar{z}')$ и местному единичному вектору приёмника, обозначенному $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$:

$$\mathbf{D}' = \bar{x}' - k(k \cdot \bar{x}') - \bar{k} \times \bar{y}',$$

$$\mathbf{D} = \bar{x} - k(k \cdot \bar{x}) - k \times \bar{y}.$$

Непрерывность между соседними наблюдениями фазы должна обеспечиваться добавлением члена $\pm 2\pi$.

Результаты исследований и их анализ. Рекомендации по учету «wind-up»-эффекта в результатах фазовых наблюдений

Для проведения исследований был разработан специализированный программно-алгоритмический комплекс, включающий все необходимые функции для расчетов параметров движения и параметров угловой ориентации GPS спутников. Для оценки величин и поведения «wind-up»-эффекта из-за эволюций различных спутников были выполнены необходимые для последующего анализа и выработки рекомендаций расчеты. Так, на рис. 2 изображена зависимость «wind-up»-эффекта для частоты L1 GPS от времени для всех спутников рабочего созвездия, рассчитанная по соотношению (1) для станции, расположенной в г. Харьков на 11 декабря 2008г.

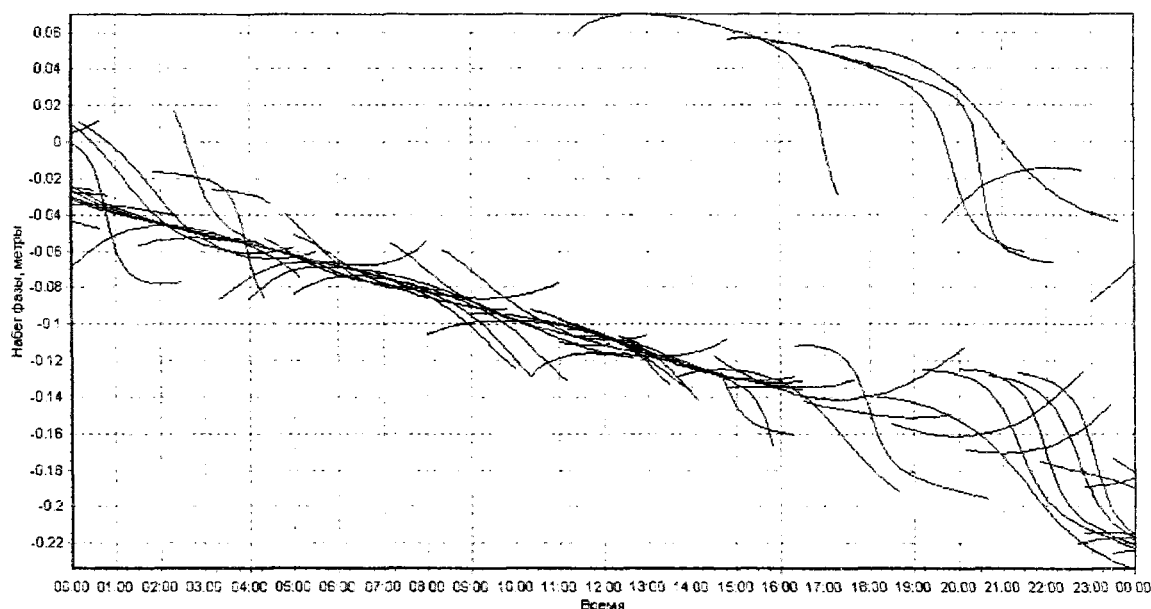


Рис. 2

Как следует из анализа кривых на рис. 2, в течение интервалов наблюдения спутников наблюдаются значительные (до 10 см) изменения фазы, вызванные изменением ориентации передающей антенны спутника. Отчётливо видны периоды разворотов спутников, вызывающие быстрое изменение фазы несущей за относительно короткий интервал времени.

Для позиционирования в дифференциальном режиме с расстояниями между станциями до несколько сотен километров поправкой, вызванной «wind-up»-эффектом, можно пренебречь. Однако при обработке фазовых наблюдений на больших базовых расстояниях разность поправок может достигать значительных величин и обязательно должна учитываться. На рис. 3 изображена разность набегов фаз за счёт wind-up – эффекта для двух станций, находящихся на расстоянии 4000 км друг от друга. Данные выводы хорошо согласуются с результатами, представленными в работах [3, 4].

Важно отметить, что при реализации PPP-позиционирования необходимо учитывать различное поведение спутников при нахождении их в тени Земли [6]. На рис. 4 изображены интервалы времени, когда спутники GPS находятся в тени Земли (по данным 11 декабря 2008 г.).

Солнечные батареи спутников GPS BLOCK IIR всегда ориентированы в сторону Солнца, независимо от того, освещён спутник или находится в тени Земли, поэтому положение спутника, а значит, и «wind-up»-эффект, могут быть легко рассчитаны.

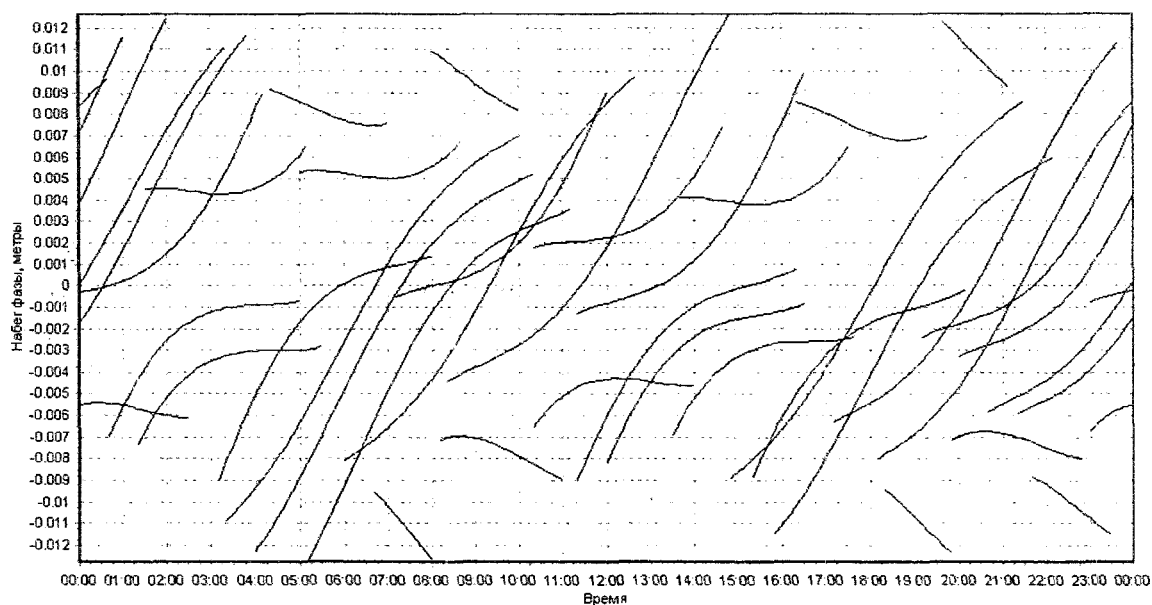


Рис. 3

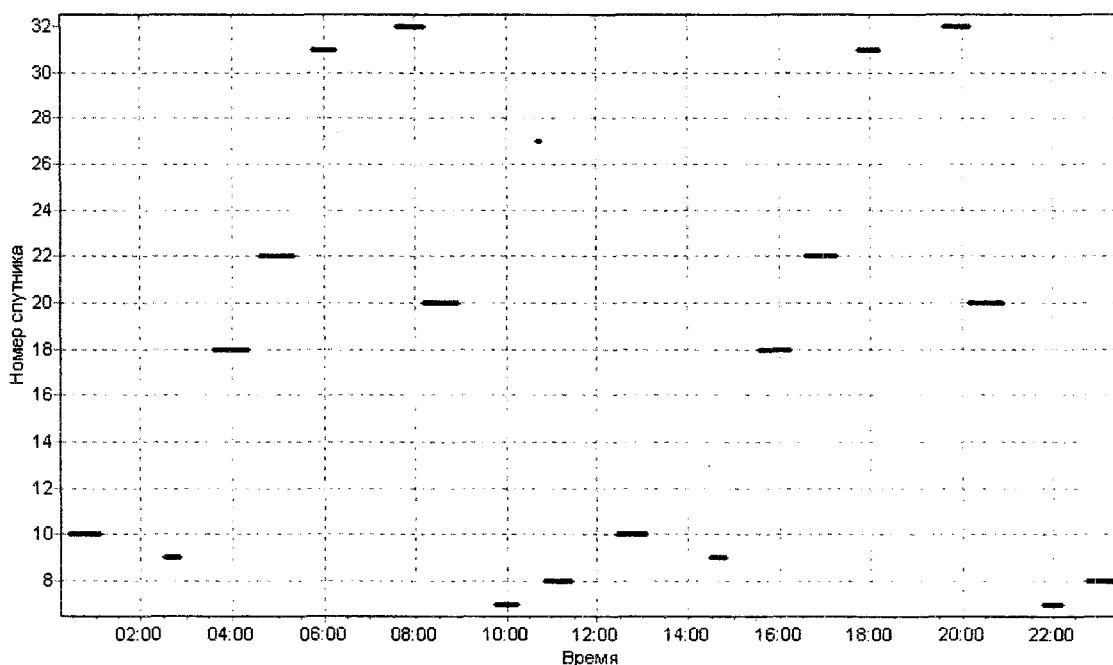


Рис. 4

Поведение спутников GPS BLOCK II/IIA является более сложным. Если спутник освещён, его солнечные батареи направлены в сторону Солнца. При заходе спутника в тень Земли солнечные датчики уже не могут контролировать положение спутника и начинается рыскание оси X спутника вокруг оси Z. Рыскание производится по сложному закону, моделирование которого затруднено. Спутник может находиться в тени до 60 мин (см. рис. 4). После выхода спутника из тени начинается процесс восстановления ориентации спутника, в результате чего солнечные батареи снова будут направлены в сторону Солнца. Этот период может длиться до 30 мин. Таким образом, при наблюдениях спутников GPS BLOCK II/IIA имеются участки продолжительностью до 90 мин, на которых положение спутника, а значит, и «wind-up»-эффект, не могут быть рассчитаны. Кроме того, поскольку центр масс спутника и фазовый центр передающей антенны не совпадают, на этих участках наблюдаются увели-

ченные погрешности определения координат фазового центра антенны и расхождения шкал времени спутника и системного времени GPS. Это может привести к значительному снижению точности позиционирования в режиме PPP, поэтому данные участки должны быть исключены из обработки. В настоящее время группировка GPS содержит 11 спутников BLOCK II/IIA и этот фактор обязательно должен быть учтен в математическом и программном обеспечении обработки GPS наблюдений, чтобы исключить появление аномальных результатов координатных определений.

Выводы

1) Рассмотрена задача учета (компенсации) дополнительного фазового набега из-за воздействия «wind-up»-эффекта, обусловленного эволюциями угловой ориентации (вращением) GPS спутников, представлены результаты оценки и анализа соответствующих фазовых погрешностей, а также рекомендации по расчёту и вводу коррекций в результаты фазовых наблюдений в задачах высокоточного PPP-позиционирования. Для проведения исследований разработан специализированный программно-алгоритмический комплекс, включающий все необходимые функции для расчетов параметров движения и параметров угловой ориентации GPS спутников.

2) Как следует из представленных результатов и их анализа, фазовые набеги из-за воздействия «wind-up»-эффекта могут достигать значимых величин (до 10 см), которые необходимо учитывать в задачах точного PPP-позиционирования. Кроме того, и в дифференциальном режиме координатных определений на больших базовых расстояниях (1000 км и более) разности фазовых набегов из-за воздействия «wind-up»-эффекта могут достигать нескольких сантиметров, что также требует коррекции наблюдений.

3) В задачах высокоточного GPS-позиционирования необходимо учитывать особенности поведения различных типов GPS спутников при нахождении их в тени Земли и выходе из тени. Целесообразно в ходе обработки исключать участки наблюдений спутников BLOCK II/IIA в периоды, когда они находятся в тени и 30 мин после выхода их из тени. Это обусловлено тем, что на этих участках эфемериды, уходы часов и коррекции влияния «wind-up»-эффекта не могут быть оценены с достаточной точностью, что, в свою очередь, может привести к заметному ухудшению точности координатных определений в режиме PPP, в частности, в тех случаях, когда текущее созвездие содержит спутники BLOCK II/IIA GPS.

Список литературы: 1. Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Лихтнеггер, Д. Коллинз. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика. Пер. з англ. 3-го вид. за ред. Я.С. Яцківа. – Київ: Наук. думка, 1995. – 380 с. 2. Mohamed Abdel-Salam, Yang Gao, and Xiaobing Shen. Analyzing the Performance Characteristics of a Precise Point Positioning System. – Portland. ION GPS 2007. – P. 1893-1899. 3. Y. Gao and K. Chen. Precise Positioning with Undifferenced Data – The European Navigation Conference, 2004. – pp. 1-9. 4. J.T. Wu, S.C. Wu, G.A. Hajj, W.I. Bertiger, and S.M. Lichten. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase – Man. Geodetica 18, pp. 91-98, 1993. 5. J.Couba. A guide to using International GNSS service (IGS) products – <http://www.igs.org/igs/scb/resource-/pubs/UsingIGSProducts-Ver21.-pdf>, 2009. 6. BaoCheng Zhang, JiKun Ou, YunBin Yuan and ShiMing Zhong. Yaw attitude of eclipsing GPS satellites and its impact on solutions from precise point positioning // Chinese Science Bulletin Volume 55, Number 32, 3687-3693.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 14.03.2011