

## ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ И СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ PPP

### Введение

При применении глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для определения местоположения (позиционирования) с дециметровой/сантиметровой точностью в задачах геодезии, землеустройства, геодинамики, мониторинга объектов и сооружений, ГИС, аэрофотосъемки и др. в большинстве случаев используется дифференциальный метод, при котором наблюдения подвижного («роверного») приемника потребителя комбинируются с наблюдениями одной или нескольких референционных станций [1]. Разновидностью дифференциального метода определений является высокопроизводительный режим кинематики в реальном времени (RTK – Real Time Kinematic). В то же время дифференциальный метод определений обладает и рядом недостатков. В реальности существует множество условий, при которых реализация дифференциального метода становится либо невозможной, либо нецелесообразной (например, референционные станции отсутствуют или находятся на значительном удалении от места проведения съемки, информация референционных станций недоступна вследствие нарушения средств коммуникации при природных катаклизмах и техногенных катастрофах и т.д.). В последнее время точность информационных продуктов (точные эфемериды и параметры часов, параметров вращения Земли и т.д.), формируемых и распространяемых, например международной службой IGS [1 – 4], значительно возросла, что позволяет достичь высокой точности позиционирования при использовании наблюдений единственного приемника без использования информации референционных станций. Такой метод получил название метода точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning) [2, 3]. Для компенсации основных погрешностей данный метод предполагает использование высокоточных оценок орбит и часов спутников, оценок тропосферных и ионосферных параметров, межчастотных задержек сигналов в аналоговых трактах спутников, которые 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, в отличие от дифференциального метода, приобретает учет (компенсация) влияния ряда специфических источников погрешностей, таких, как геодинамические (приливные и др.) эффекты, эффекты дополнительного фазового набега, обусловленного вращением антенн спутника и приемника («wind-up»-эффекта), неравномерности фазовых характеристик антенн спутников и приемников, погрешностей эфемеридно-временного обеспечения и т.д.

В данной работе рассмотрены алгоритмы учета таких погрешностей, а также представлены рекомендации по расчету и вводу соответствующих коррекций в результаты фазовых наблюдений в задачах высокоточного позиционирования. Важными источниками погрешностей PPP-определений, так же, как и для дифференциального метода, являются ионосферная и тропосферная составляющие погрешностей наблюдений, которые в данной работе детально не рассматриваются, т.к. требуют отдельного расширенного анализа и определения подходов по их оценке и парированию с учетом особенностей позиционирования, что будет предметом дальнейшего изучения. Исследования выполнены с целью разработки отечественных методов и алгоритмов PPP-позиционирования.

### Источники погрешностей наблюдений, состав оцениваемых параметров

Уравнения кодовых и фазовых наблюдений можно записать в следующем виде [2]:

$$\begin{aligned}
S_{1,2}^j(t_k) &= R^j(t_k) + \left[ \Delta^{GNSS} - \Delta^{j,GNSS} \right] + I^j(t_k) + Tr^j(t_k) + (b_{c1,2} - B_{c1,2}^j) + \\
&\Delta\rho_{pcv1,2}(t_k) + \delta GEO + \delta S_{c1,2}^j(t_k) \\
L_{1,2}^j(t_k) &= R^j(t_k) + \left[ \Delta^{GNSS} - \Delta^{j,GNSS} \right] - \mu_{1,2} \cdot I^j(t_k) + Tr^j(t_k) + (b_{\phi 1,2} - B_{\phi 1,2}^j) + N_{1,2}^j \cdot \lambda_{1,2} + \\
&\Delta\rho_{pcv1,2}(t_k) + \Delta\Phi_{wup} \cdot \lambda_{1,2} + \delta GEO + \delta L_{1,2}^j(t_k)
\end{aligned}$$

где  $t_k$  – эпоха наблюдений;  $j$  – индекс спутника;  $S_{1,2}^j(t_k), L_{1,2}^j(t_k)$  – кодовые ( $S$ ) и фазовые ( $L$ ) псевдодальности на частотах L1 и L2;  $R^j(t_k)$  – геометрическая дальность;  $\Delta^{GNSS}$  – расхождение шкалы времени приемника и шкалы времени ГНСС;  $\Delta^{j,GNSS}$  – расхождение шкалы времени спутника и шкалы времени ГНСС;  $I^j(t_k)$  – ионосферная задержка сигнала;  $\mu_1 = 1, \mu_2 = \gamma^2, \gamma^2 = \lambda_2^2 / \lambda_1^2, \lambda_{1,2}$  – длины волн несущих колебаний на частотах L1 и L2;  $Tr^j(t_k)$  – тропосферная задержка сигнала;  $b_{c1,2}, B_{c1,2}, b_{\phi 1,2}, B_{\phi 1,2}$  – кодовые (C1,C2) и фазовые ( $\Phi_1, \Phi_2$ ) инструментальные (аппаратные) задержки в тракте приемников ( $b$ ) и спутников ( $B$ );  $N_{1,2}^j$  – начальные фазовые неоднозначности – неизвестные целые числа длин волн на частотах L1 и L2;  $\Delta\rho_{pcv1,2}(t_k)$  – вариации фазового центра приемной антенны на частотах L1 и L2;  $\delta GEO$  – погрешности, обусловленные геодинамическими эффектами;  $\delta GEO = \delta_{solidtide} + \delta_{oceantide} + \delta_{poletide}$ ;  $\delta_{solidtide}$  – поправка на земные приливы;  $\delta_{oceantide}$  – поправка на океанические приливы;  $\delta_{poletide}$  – полярные приливы;  $\Delta\Phi_{wup}$  – «wind-up» эффект;  $\delta S_c^j(t_k), \delta L_{1,2}^j(t_k)$  – погрешности многолучевости и шумов кодовых ( $S$ ) и фазовых ( $L$ ) наблюдений.

Составляющие уравнений наблюдений условно можно разделить на три группы:

- 1) *Оцениваемые параметры.* К ним относятся координаты приемника и расхождение шкал приемника и ГНСС. Также к оцениваемым параметрам в режиме PPP, как правило, относят тропосферную задержку.
- 2) *Моделируемые параметры.* Это те параметры, которые не оцениваются и рассчитываются по известным моделям. К этим параметрам относят вариации фазовых центров антенн спутников и приемников, аппаратурные задержки, поправки, вызванные геодинамическими эффектами и «wind-up»-эффектом.
- 3) *Шумы и вклад из-за многолучевости наблюдений,* которые не могут быть смоделированы, оценены и скомпенсированы.

Ионосферную задержку в двухчастотной аппаратуре обычно компенсируют путем комбинирования наблюдений на разных частотах (использованием т.н. «безионосферной» комбинации наблюдений) [1]. В одночастотной аппаратуре ее либо рассчитывают по известной модели (модели Клобушара), либо используют так называемые ионосферные карты, распространяемые Центром определения орбит в Европе CODE [5].

При реализации дифференциального режима определений повышение точности навигационных определений достигается за счет того, что погрешности наблюдения навигационных параметров «роверного» приемника и референционной станции являются коррелированными. При формировании разностей измеряемых параметров «роверного» приемника и референционной станции большая часть медленноменяющихся погрешностей компенсируется. Так, например, при дифференциальном режиме обычно не вводят поправки на геодинамические

эффекты, «wind-up»-эффект, аппаратные задержки, вариации фазовых центров спутников и приемников. Применяются упрощенные модели, не требующие особой точности, используются бортовые эфемериды и параметры часов, для расчета тропосферной задержки используются известные модели.

При PPP разности наблюдений между разнесенными приемниками не формируются, поэтому перечисленные геодинамические и др. погрешности не компенсируются и вносят свой вклад в измеряемые параметры и, следовательно, в погрешности позиционирования. Они не могут быть оценены в ходе обработки наблюдений, и для получения высокой точности позиционирования должны быть рассчитаны и учтены как можно точнее. Кроме того, для метода PPP точности моделирования тропосферной задержки оказывается недостаточно, поэтому зенитную тропосферную задержку обычно включают в число оцениваемых параметров.

Ниже рассмотрены перечисленные выше источники и составляющие погрешностей.

### Погрешности эфемеридно-временного обеспечения

Для повышения точности позиционирования в режиме PPP используются точные эфемериды. Точные эфемериды – это продукт постобработки ГНСС-наблюдений, распространяемые службой IGS в виде суточных файлов в формате SP3 [6]. Файлы содержат координаты центра масс спутников и расхождения бортовых шкал времени спутников и системной шкалы времени ГНСС, рассчитанные с интервалом 15 мин. Координаты центра масс спутника на любое время в пределах суток могут быть получены путем интерполирования данных, записанных в файле, с использованием полиномов Лагранжа.

Пусть на моменты времени  $t_i$  имеются значения функции  $f(t_i)$ . Тогда значение функции в точке  $t$  вычисляется по формуле

$$F(t) = \sum_{i=1}^n L_i(t) f_i(t_i), \text{ где } L_i = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{t-t_j}{t_i-t_j}; \quad (1)$$

$n$  – степень сглаживающего полинома Лагранжа.

В качестве значений функции  $f(t_i)$  используются координаты или расхождения бортовой шкалы времени и шкалы времени системы. Исследования показали, что для обеспечения миллиметровой точности расчета координат (методическая погрешность) необходимо использовать полином не ниже 9-й степени [1]. Для интерполяции расхождения бортовой шкалы времени необходимо использовать полином Лагранжа не ниже 3-й степени.

При использовании точных эфемерид в формате SP3 получаются хорошие результаты определения координат спутника, но расхождения шкал времени спутника и шкалы времени системы определяются хуже, т.к. расхождения шкал времени не являются гладкой функцией и труднее поддаются интерполяции. Для повышения точности определения расхождений бортовых шкал времени спутников и системной шкалы времени используются файлы часов (\*.clk) в формате RINEX. В отличие от файла точных эфемерид в формате SP3, где данные записываются с интервалом 15 мин в файле (\*.clk) интервал записи составляет 5 мин или даже 30 с, что позволяет получить гораздо более точные результаты. При этом используется тот же алгоритм интерполяции по методу Лагранжа.

При использовании точных эфемерид необходимо учитывать тот факт, что в файле точных эфемерид приводятся координаты центра масс спутника, в то время как в математической модели ГНСС-наблюдений используются координаты фазового центра антенн. Поэтому координаты центра масс спутника должны быть пересчитаны в координаты фазового центра антенны.

На рис.1 изображена ориентация спутника в пространстве и бортовая система координат спутника.

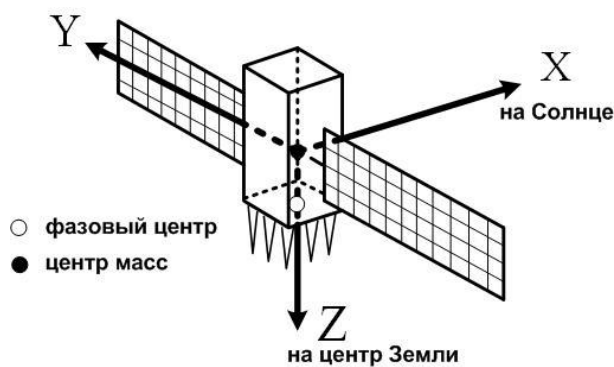


Рис. 1

Ось Z системы координат спутника направлена к центру масс Земли, ось Y направлена вдоль оси вращения солнечных панелей и совпадает с векторным произведением оси Z и направления на Солнце. Ось X направлена на Солнце и дополняет систему до правой.

Величины смещений фазового центра антенн для всех спутников систем ГЛОНАСС и GPS могут быть получены из файлов IGS в формате ANTEX. При учете смещения фазового центра антенны спутника вычисляется коррекция, которая равна проекции вектора смещения фазового центра на направление от спутника к приемнику. Таким образом, для расчета величины смещения необходимо знать координаты Солнца на момент излучения. Кроме того, при реализации PPP-позиционирования необходимо учитывать различное поведение спутников при нахождении их в тени Земли [4, 7]. На рис. 2 изображены интервалы времени, когда спутники GPS находятся в тени Земли (по данным 11 декабря 2008 г.).

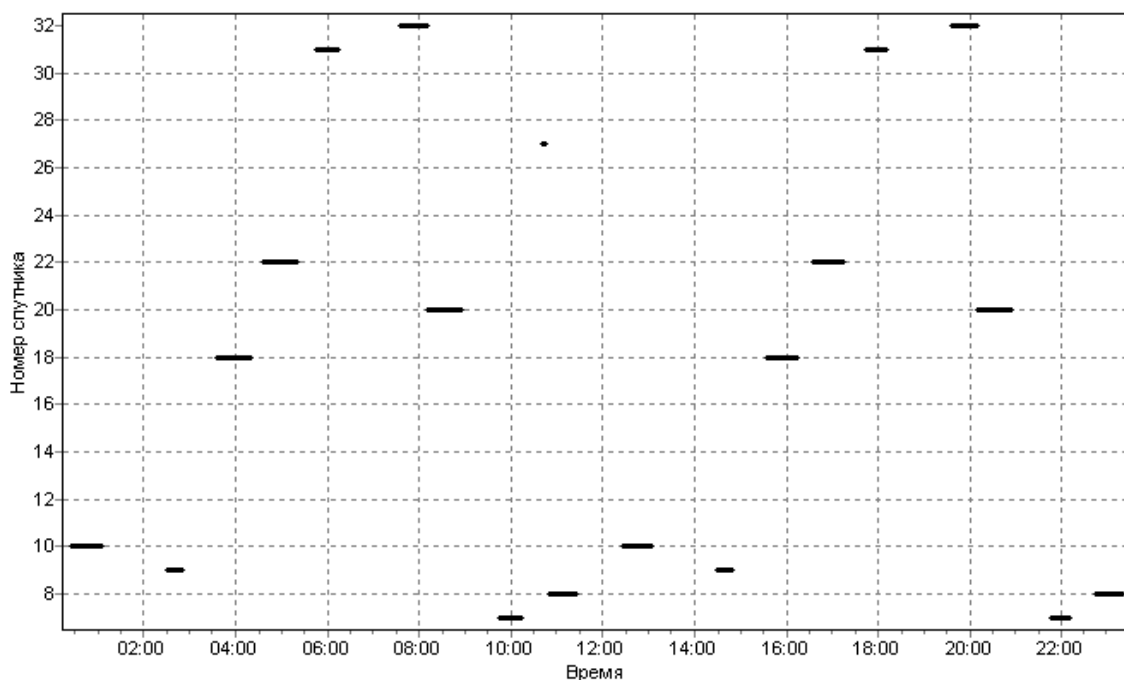


Рис. 2

Солнечные батареи спутников GPS BLOCK IIR всегда ориентированы в сторону Солнца, независимо от того, освещен спутник или находится в тени Земли, поэтому координаты фазового центра антенны могут быть рассчитаны.

Поведение спутников GPS BLOCK II/IIA является более сложным. Если спутник освещен, 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 весьма затруднено. Спутник может находиться в тени до 60 мин (см. рис. 2). 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 поворот спутника, а значит, и положение фазового центра, не могут быть точно рассчитаны. На этих участках наблюдаются увеличенные погрешности определения координат фазового центра антенны и расхождения шкал времени спутника и системного времени. 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 ГНСС наблюдений, чтобы исключить появление аномальных результатов координатных определений.

На рис.3 изображены составляющие разности дальностей до спутников GPS для станции KНAR (г. Харьков), рассчитанные по бортовым и точным эфемеридам на 11 ноября 2011 г.

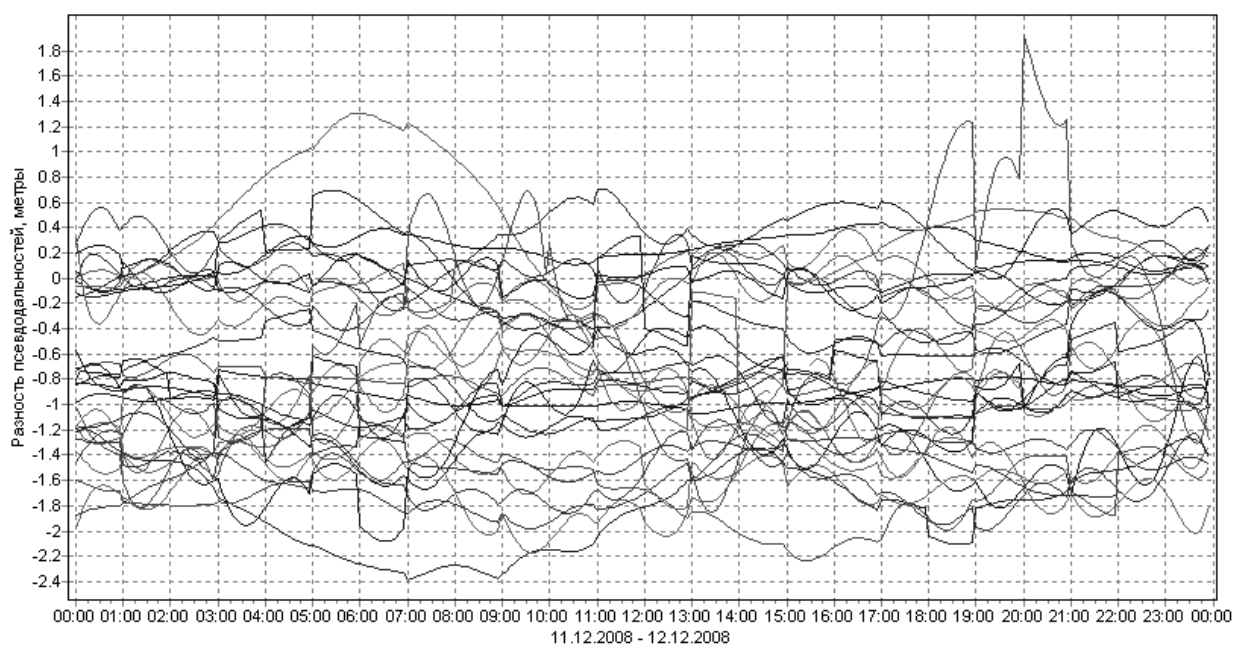


Рис. 3

При расчетах учитывались смещения фазового центра антенн от центра масс. Как следует из рисунка, погрешность псевдодальности, обусловленная неточным знанием координат спутника, достигает величины 2,5 м.

#### «Wind-up»-эффект

Спутники GPS передают радиосигналы с правой круговой поляризацией, следовательно, наблюдаемая фаза несущей зависит от взаимной ориентации антенн спутника и приемника [4, 8]. Например, осуществление одного оборота любой из антенн – спутника или приемника – 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) [8]. Положим, что антенна приемника не вращается и остается 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.4), 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».

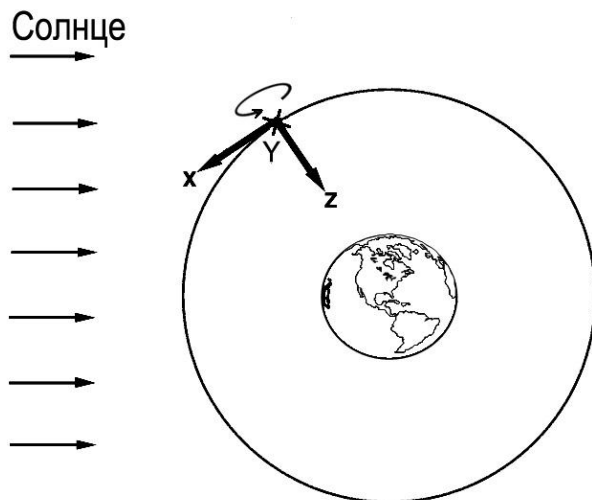


Рис. 4

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  $180^\circ$ , что приводит к резкому изменению фазы наблюдаемых сигналов на половину длины волны.

Согласно [8], коррекция фазы (в радианах) может быть вычислена из скалярного ( $\cdot$ ) и векторного ( $\times$ ) произведения:

$$\Delta\phi = \text{sign}(\zeta) \text{Cos}^{-1}(D' \cdot D / |D'| |D|), \quad (2)$$

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

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

$$D = \hat{x} - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}) + \hat{k} \times \hat{y}.$$

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

На рис.5 изображена зависимость «wind-up»-эффекта для частоты L1 GPS от времени для всех спутников рабочего созвездия, рассчитанная по соотношению (2) для станции, расположенной в г. Харьков, на 11 декабря 2008 г.

Как следует из анализа кривых на рис. 5, в течение интервалов наблюдения спутников наблюдаются значительные (до 10 см) изменения фазы, вызванные изменением ориентации передающей антенны спутника. Отчетливо 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. 6 изображена разность набегов фаз за счет «wind-up»-эффекта для двух станций, находящихся на расстоянии 4000 км друг от друга. Данные выводы хорошо согласуются с результатами, представленными в работах [4, 8].

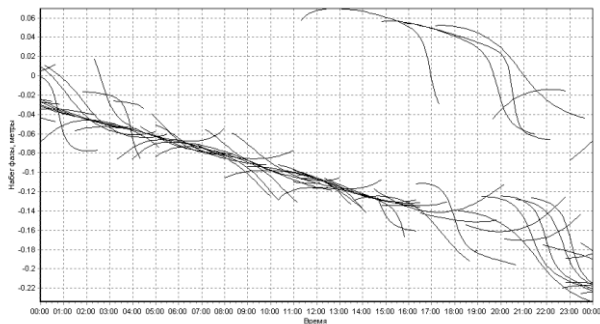


Рис. 5

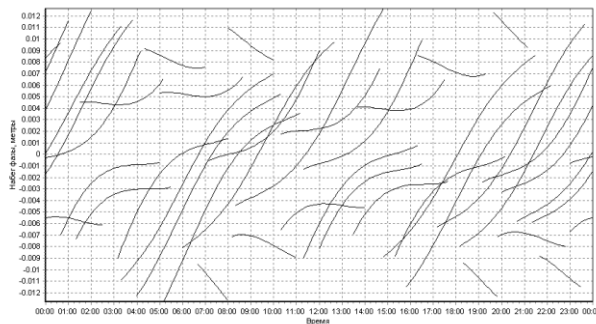


Рис. 6

При реализации PPP-позиционирования необходимо учитывать описанное выше разное поведение спутников при нахождении их в тени Земли и выходе из тени. Положение спутников GPS BLOCK IIR, а значит, и «wind-up»-эффект, могут быть легко рассчитаны, в то время как при наблюдениях спутников GPS BLOCK II/IIA имеются участки продолжительностью до 90 мин, на «wind-up»-эффект не может быть рассчитан. По возможности при обработке наблюдений в режиме PPP такие участки измерительной информации должны быть исключены из обработки.

### Земные приливы

«Твердая» Земля на самом деле является достаточно гибкой для того, чтобы реагировать на те же гравитационные силы, которые вызывают океанские приливы. Периодические вертикальные и горизонтальные смещения, вызванные приливами, представлены сферическими гармониками степени и порядка  $(n,m)$ , характеризуемыми числами Лява и Шида [9]. Эффективные значения этих чисел слабо зависят от широты и частоты приливов и должны учитываться, если нужно получить точность позиционирования 1 мм. Однако для 5-миллиметровой точности необходимо применение только членов коррекции приливов и высоты второго порядка [9]. При этом смещение приемника, вызванное земными приливами, в картезианских координатах  $\Delta\vec{r}^T = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]$  может быть рассчитано по формуле [4]:

$$\Delta\vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \frac{r^4}{R_j^3} \left\{ [3l_2(\vec{R}_j \cdot \vec{r})] \vec{R}_j + \left[ 3\left(\frac{h_2}{2} - l_2\right)(\vec{R}_j \cdot \vec{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \vec{r} \right\} + [(-0.025m \cdot \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot \cos(\Theta_g + \lambda))] \cdot \vec{r} \quad (3)$$

где  $GM, GM_j$  – гравитационные параметры Земли, Луны ( $j=2$ ) и Солнца ( $j=3$ );  $r, R_j$  – геоцентрические вектора состояния станции, Луны и Солнца с соответствующими единичными векторами  $\vec{r}, \vec{R}_j$  соответственно,  $l_2$  и  $h_2$  – номинальные безразмерные числа Лява и Шилда второго порядка (около 0.609 и 0.085);  $\phi, \lambda$  – широта и долгота места, положительная на восток, и  $\Theta_g$  – гринвичское звездное время. Приливная коррекция (3) может достигать величины 30 см в радиальном направлении и 5 см в горизонтальном. Она состоит из постоянного смещения, зависящего от широты, и периодической части с преимущественно полусуточным и суточным изменениями амплитуды. Периодическая часть в основном усредняется для статического позиционирования в течение 24-часового периода. Тем не менее, постоянная часть, которая достигает 12 см в средних широтах (в радиальном направлении), остается в таком положении и при 24-часовом усреднении. Постоянные приливные искажения, в соответствии с принятым ITRF соглашением, также должны учитываться [9], т.е. должна приме-

няться полная коррекция (4), которая включает как постоянные, так и периодические приливные смещения, чтобы быть совместимым с ITRF (так называемой «Tide-free») референцной системой. Даже при усреднении в течение длительного периода времени пренебрежение приливной коррекцией (4) при абсолютном позиционировании может привести к систематическим ошибкам до 12 и 5 см в радиальном и северном направлении соответственно. Смещения в направлении на север, восток и по вертикали могут быть легко получены умножением равенства (3) на соответствующие единичные векторы.

На рис.7 изображено смещение станции КНАР (г. Харьков, Украина), вызванное приливами земной поверхности в направлении на север, восток и по высоте, рассчитанные по формуле (3) на 1 июня 2011 г.

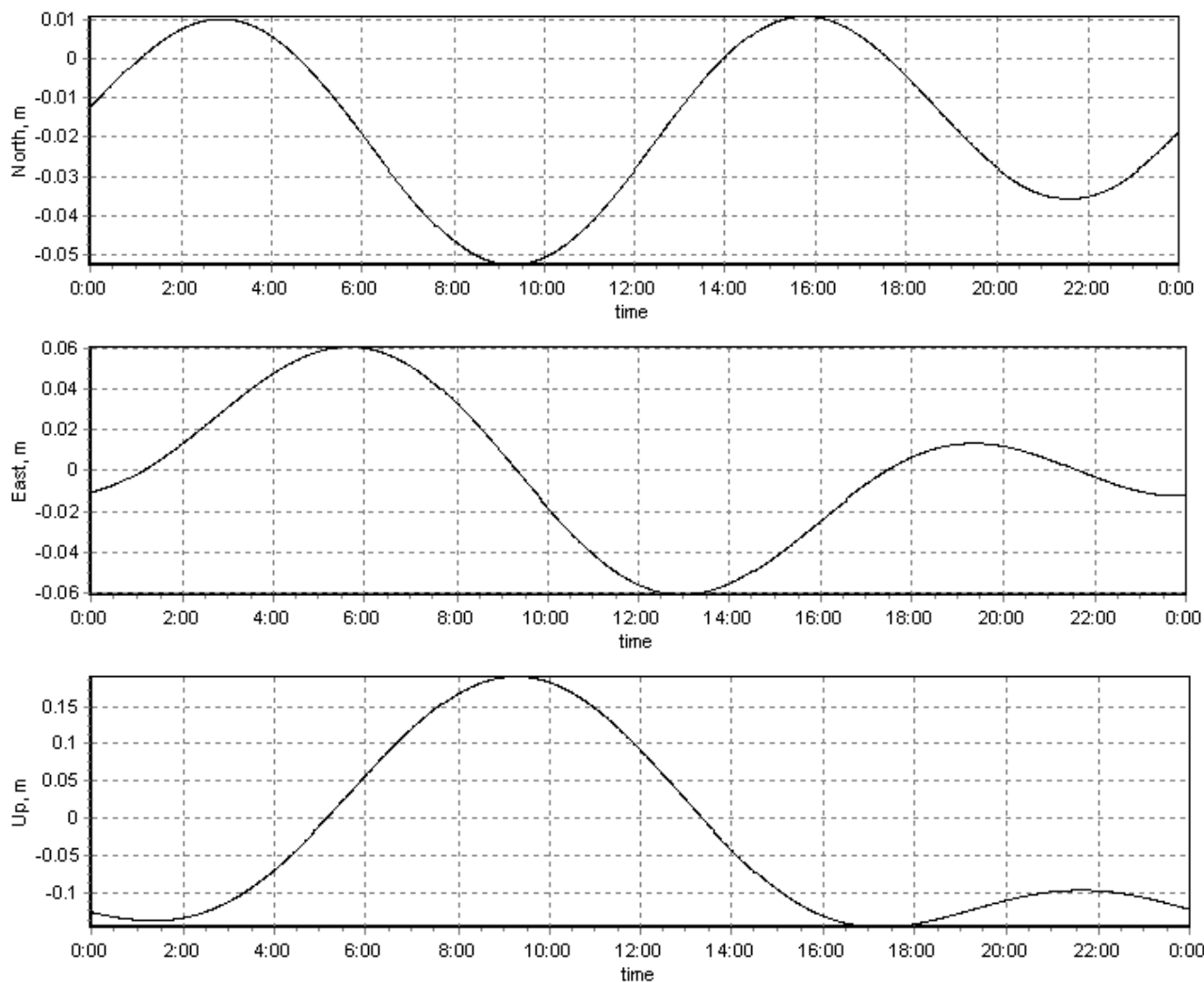


Рис. 7

При использовании дифференциального режима на коротких базовых линиях (до 100 км), станции имеют почти идентичные приливные смещения, поэтому приливами земной поверхности можно пренебречь.

### Океанические приливы

Океанические приливы – это деформации поверхности Земли под воздействием приливных масс океанов. Во время приливов океанов происходит движение больших масс воды, которые вызывают периодическое перераспределение нагрузки на дно океана. Так как Земля не является жесткой, она деформируется под воздействием такой нагрузки. Это приводит к наклону и смещению станции в вертикальной и горизонтальной плоскости. Океанические



приливы вызываются гравитационным притяжением Луны и Солнца, и поскольку их движение несинхронно, морские приливы могут быть описаны как сумма нескольких приливных волн, каждая из которых имеет свой собственный период. Для расчетов используются 11 периодов (гармоник) с наибольшей амплитудой [9].

Океанические приливы похожи на приливы земной поверхности, в них преобладают суточные и полусуточные периоды, и они не имеют постоянной части. Смещения, вызванные океаническими приливами, на порядок меньше, чем смещения приливов земной поверхности, и они более локализованы. Наиболее сильно океанические приливы проявляются на участках земной коры, расположенных в непосредственной близости от океана. Для станций, расположенных внутри материков, вдали от океанов, при длительных интервалах наблюдения (больше 24 ч) океаническими приливами можно пренебречь. Но для точного кинематического позиционирования или точного статического позиционирования в прибрежных районах с короткими интервалами наблюдений (значительно меньше 24 ч) эти эффекты необходимо принимать во внимание. Кроме того, данные эффекты должны учитываться при оценке зенитной тропосферной задержки и в приложениях, где требуется точная оценка часов, даже если станция находится вдали от океана (дальше 1000 км) и при длительных интервалах наблюдения, иначе данные погрешности войдут в оценку зенитной тропосферной задержки и параметров часов.

Океанические приливы могут быть рассчитаны по следующей формуле [9]:

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{c_j} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{c_j}), \quad (4)$$

где  $f_j$  и  $u_j$  – коэффициенты, зависящие от широты и долготы лунного узла. С погрешностью 1 – 3 мм можно положить  $f_j = 1$  и  $u_j = 0$ . Суммирование по  $j$  представляет собой 11 приливных волн, обозначаемых  $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f, M_m$  и  $S_{SA}$ ;  $\omega_j$  и  $\chi_j$  – угловые скорости и астрономический аргумент на время  $t = 0^+$ , соответствующие  $j$ -й компоненте приливной волны.

Аргументы  $\chi_j$  приведены в [9]. Амплитуды и фазы  $A_{c_j}$  и  $\Phi_{c_j}$  для конкретных станций в радиальном направлении, направлении на север и восток, были получены с использованием глобальной модели приливов океанов, а также базы данных береговых линий. Таблица амплитуд и фаз  $A_{c_j}$  и  $\Phi_{c_j}$  станций ITRF приведена в [10]. Значения амплитуд и фаз  $A_{c_j}$  и  $\Phi_{c_j}$  для любой станции могут быть получены с помощью on-line сервиса [11].

На рис.8 и 9 представлены смещения, вызванные океаническими приливами, рассчитанные по формуле (4) с использованием таблиц для станций KSMV (Kashima, префектура IBARAKI, Япония) и GLSV (г. Киев, Украина). Как следует из рисунков, смещения, вызванные океаническими приливами для станции KSMV, расположенной на берегу океана, могут достигать значительной величины – 50 мм. Смещения станции GLSV гораздо меньше – до 10 мм. Смещения станций, расположенных вдали от океанов, сильно коррелированы даже для станций, далеко расположенных друг от друга. Таким образом, для расчетов смещений таких станций достаточно использовать данные амплитуд и фаз  $A_{c_j}$  и  $\Phi_{c_j}$  для ближайшей перманентной станции из таблицы [10]. В случае, когда ближайшая станция расположена на значительном удалении, особенно в прибрежных районах, необходимо рассчитать индивидуальные данные амплитуд и фаз  $A_{c_j}$  и  $\Phi_{c_j}$ , зная приближенное местоположение станции, с помощью on-line сервиса [11] и воспользоваться ими для расчета смещений. При обработке в дифференциальном режиме смещения, вызванные океаническими приливами,

практически полностью компенсируются, и поправка на океанические приливы может не учитываться.

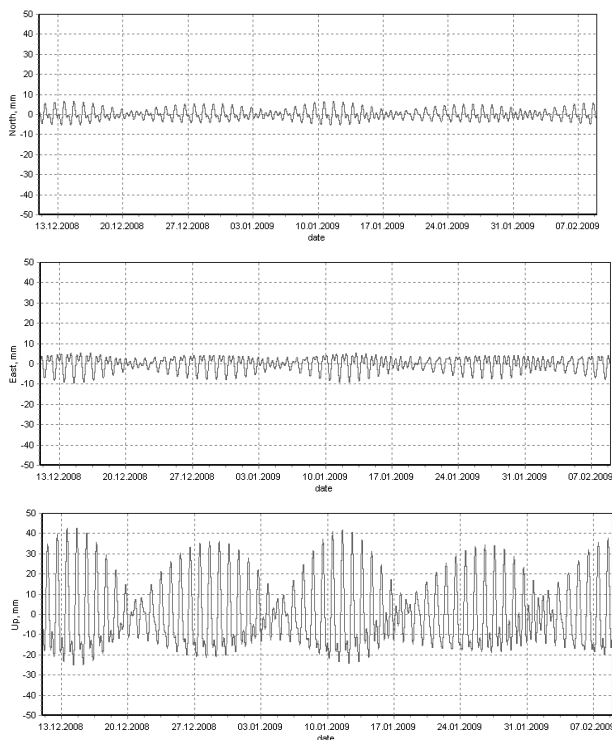


Рис. 8

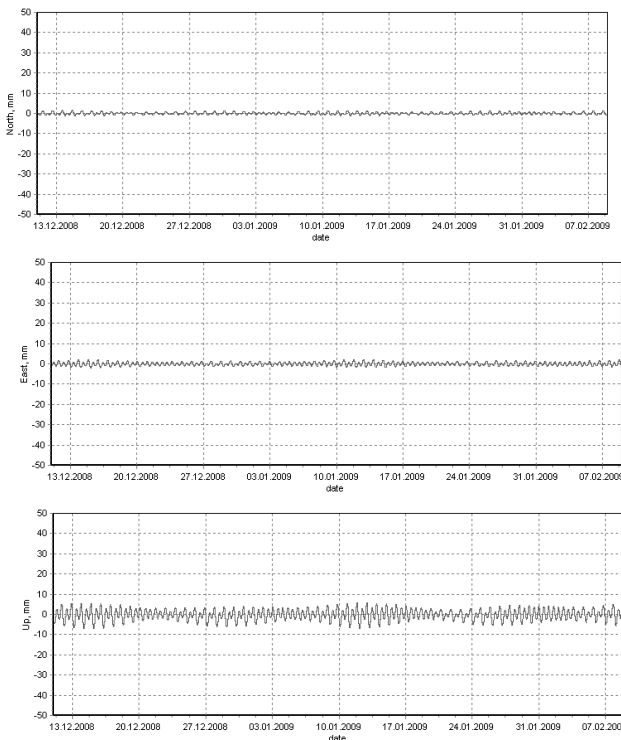


Рис. 9

### Полярные приливы

Полярные приливы – это периодические смещения оси вращения Земли, вызванные изменениями гравитационного потенциала Земли под воздействием Солнца и Луны. Поправки по широте, долготе и высоте (в миллиметрах), вызванные полярными приливами, можно приблизительно рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= -9\text{Cos}2\phi \left[ (X_p - \bar{X}_p)\text{Cos}\lambda - (Y_p - \bar{Y}_p)\text{Sin}\lambda \right] \\ \Delta\lambda &= 9\text{Sin}\phi \left[ (X_p - \bar{X}_p)\text{Sin}\lambda - (Y_p - \bar{Y}_p)\text{Cos}\lambda \right] \\ \Delta h &= -33\text{Sin}2\phi \left[ (X_p - \bar{X}_p)\text{Cos}\lambda - (Y_p - \bar{Y}_p)\text{Sin}\lambda \right] \end{aligned} \quad (5)$$

где  $(X_p - \bar{X}_p)$  и  $(Y_p - \bar{Y}_p)$  – отклонения координат полюса от среднего значения  $(\bar{X}_p, \bar{Y}_p)$  в секундах дуги (средние значения полюса приведены в [9]). В отличие от земных приливов и океанических приливов, среднее значение полярных приливов не равно нулю на интервале 24 ч. Они постепенно меняются в зависимости от движения полюса и имеют преимущественно сезонный и Чендлеровский (~ 430 дней) периоды. Поскольку движение полюса может достигать 0,8 с дуги, максимальное смещение за счет полярных приливов может достигать около 25 мм в высоту и около 7 мм в горизонтальном направлении.

Для расчета поправок, обусловленных полярными приливами, необходимо знать положение полюса на эпоху наблюдений. Эти данные могут быть получены из файлов данных вращения Земли (\*.egr), которые формируются вместе с файлами точных эфемерид SP3.

На рис.10 и 11 представлены смещения, вызванные полярными приливами, рассчитанными по формуле (5), для станций GLSV (г. Киев, Украина) и UZHL (г. Ужгород, Украина). Из рисунков следует, что смещения станций GLSV и UZHL, обусловленные полярными приливами, достигают 10 мм по высоте и 2 мм в плане, поэтому должны учитываться при обработке в режиме PPP. В то же время, разность смещений для данных станций достигает

4 мм по высоте и 1 мм в плане, поэтому при высокоточных большебазовых относительных определениях данные поправки также необходимо учитывать. Смещения, обусловленные полярными приливами, являются медленноменяющейся функцией – за сутки изменение происходит на доли миллиметра, поэтому они не могут быть усреднены на суточном интервале наблюдений.

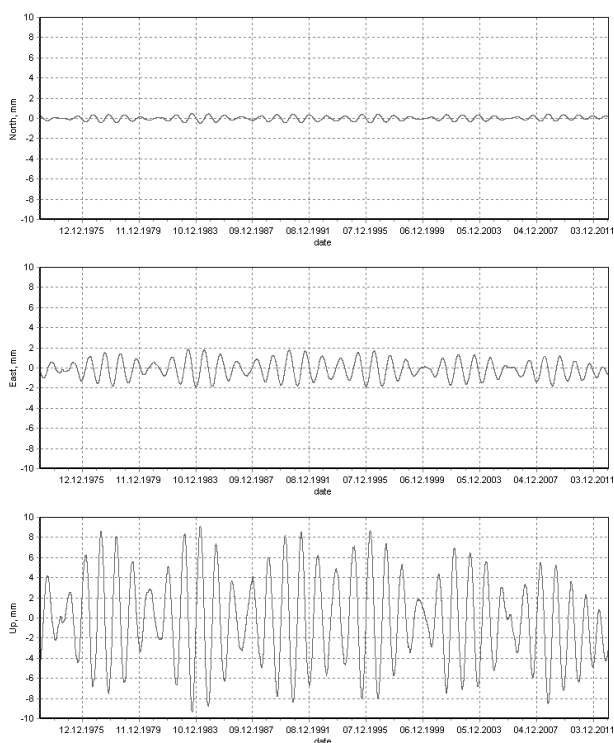


Рис. 10

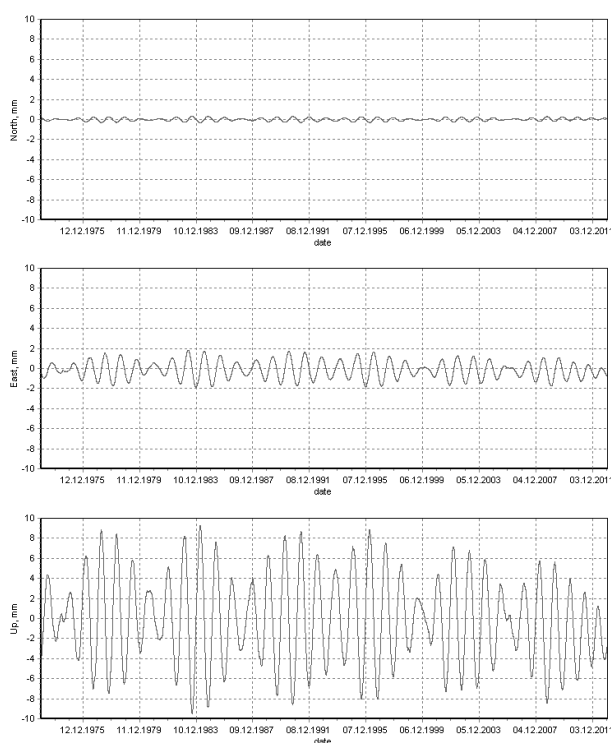


Рис. 11

### Учет неравномерности фазовых характеристик антенн

Фазовая диаграмма направленности антенн спутников и приемников неравномерна и зависит от углов, под которыми излучаются сигналы (в антенне спутника) и принимаются (в антенне приемника). Фазовые диаграммы направленности получают в результате калибровки антенн. Результаты калибровки антенн приводятся в файле ANTEX [12]. Файл регулярно обновляется и содержит данные всех антенн спутников за весь период наблюдений.

Наряду со смещением фазового центра антенны спутника относительно центра масс, описанного в разделе 3, в файле ANTEX приводятся результаты вариаций фазового центра антенн спутников GPS и ГЛОНАСС, полученные в результате калибровки. Зависимостью неравномерности диаграммы направленности от азимута пренебрегают и приводятся результаты калибровки только в зависимости от надирного угла (надирный угол – это угол между направлением «спутник – центр Земли» и направлением «спутник – приемник»). Результаты калибровки для частот L1 и L2 в файле совпадают как для спутников GPS, так и для спутников ГЛОНАСС.

Ниже приводятся результаты исследований неравномерности фазовой диаграммы направленности антенн для сеанса наблюдений 11 декабря 2008 г., проведенного на станции GLSV (г. Киев).

На рис.12 и 13 приведены результаты расчетов надирного угла для спутников GPS и ГЛОНАСС соответственно.

Как следует из рисунков, при условии, что спутники наблюдаются под минимальным углом места  $0^\circ$ , надирный угол изменяется в диапазоне  $0 - 14^\circ$  для спутников GPS и  $0 - 14,5^\circ$  для спутников ГЛОНАСС.

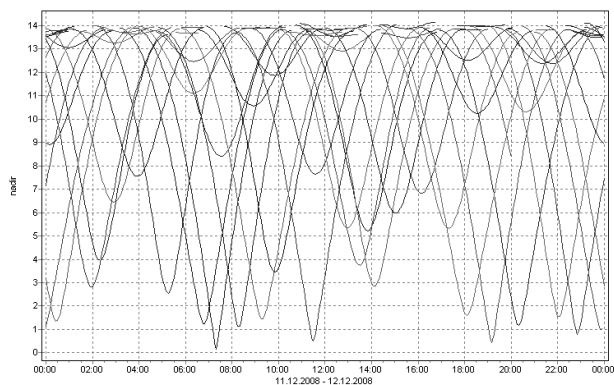


Рис. 12

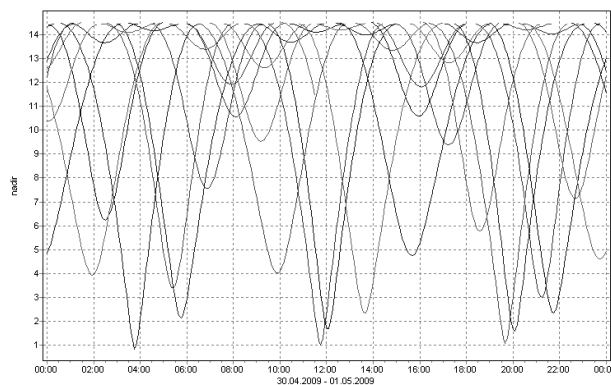


Рис. 13

На рис.14 и 15 приведены поправки в псевдодальность (в метрах), обусловленные неравномерностью фазовой диаграммы направленности антенн спутников GPS и ГЛОНАСС соответственно.

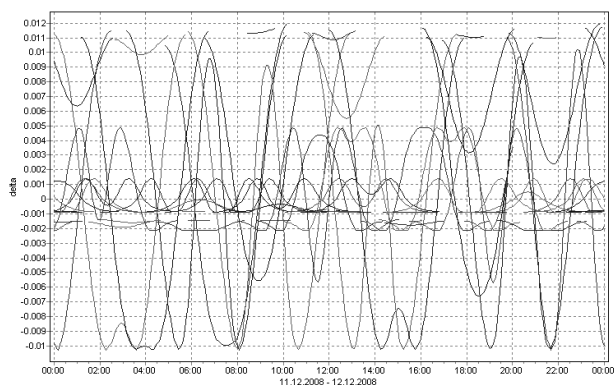


Рис. 14

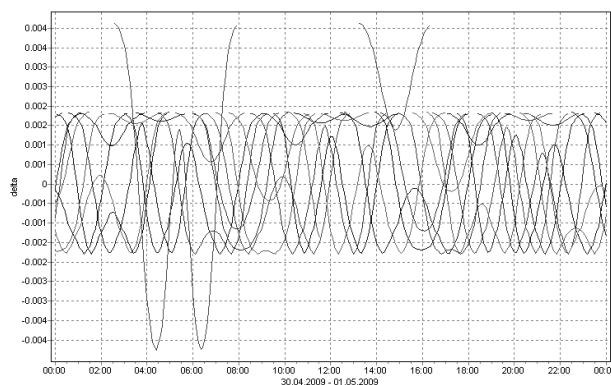


Рис. 15

Анализ полученных результатов показывает, что поправка в псевдодальность, обусловленная неравномерностью фазовой диаграммы направленности антенн спутников, может меняться в пределах нескольких сантиметров и должна учитываться в программах обработки ГНСС-наблюдений в режиме PPP. Поскольку поправка зависит только от надирного угла, который для близко лежащих станций отличается очень незначительно, при дифференциальных определениях данный вид погрешностей практически полностью компенсируется.

Так как по данным файла ANTEX результаты калибровки антенн спутников для частот L1 и L2 совпадают, поправки в псевдодальность будут компенсироваться при формировании комбинаций наблюдений на частотах L1 и L2. Поправки в псевдодальность, обусловленные неравномерностью фазовой диаграммы направленности антенн спутников ГЛОНАСС, имеют меньшую величину, чем поправка для спутников GPS.

Антенны GPS-приемников имеют специальную метку, которая должна быть ориентирована на север. При установке перманентных станций это правило выполняется, но для антенн «роверных» приемников, особенно подвижных, антенна по азимуту может быть ориентирована в произвольном направлении, поэтому зависимостью от азимута можно пренебречь.

Результаты калибровки антенн приемников приводятся в файле ANTEX. В файле приводятся два вида зависимости диаграммы направленности: зависимость только от угла места и зависимость как от угла места, так и от азимута. Результаты приводятся отдельно для частот L1 и L2 (для двухчастотных антенн) и отдельно для GPS и ГЛОНАСС (для двухсистемных антенн).

Кроме того, в файле приводятся смещения фазовых центров антенн на частотах L1 и L2 отдельно для GPS и ГЛОНАСС относительно референционной точки антенны (Antenna Reference Point, ARP).

На рис. 16 приведен пример зависимости вариаций фазового центра антенны, полученный по данным, приведенным в файле ANTEX.

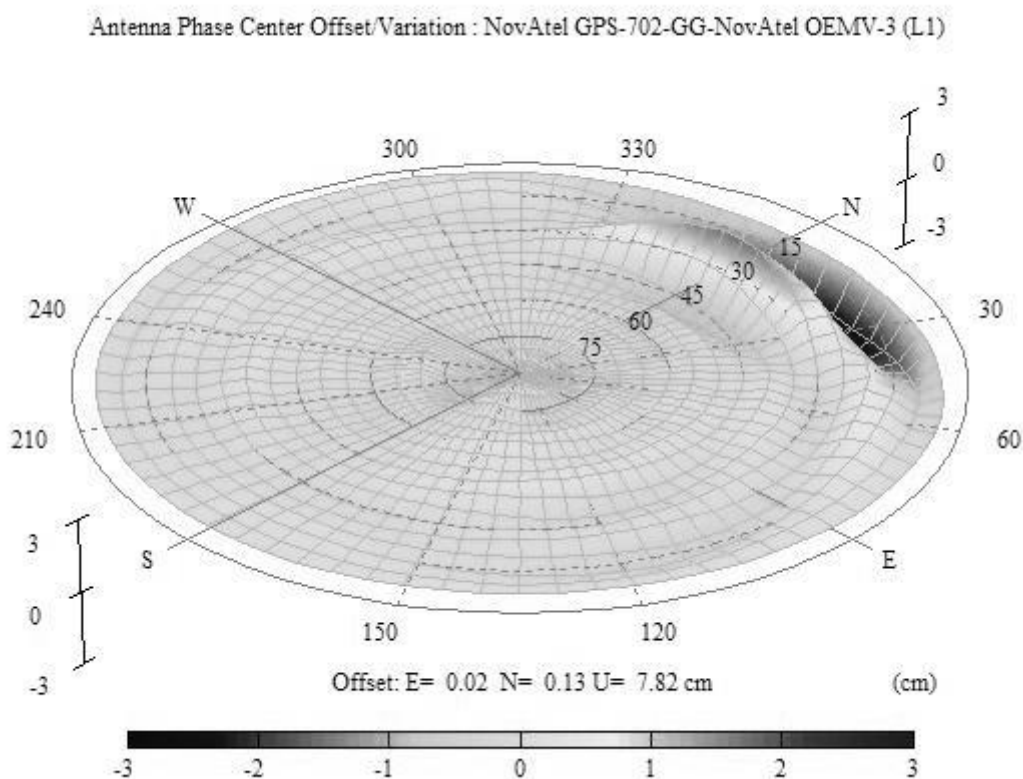


Рис. 16

Расчет поправок на неравномерность фазовой характеристики антенн приемников аналогичен расчету поправок на неравномерность фазовой характеристики антенн спутников.

### Результаты анализа погрешностей

Ниже представлены сводные результаты анализа погрешностей ГНСС-наблюдений в недифференциальном и дифференциальном режимах наблюдений. В табл. 1 приведены максимальные значения погрешности псевдодальностей в режиме PPP. В табл. 2 приведены максимальные смещения станции по высоте и в плоскости горизонта в режиме PPP. В табл. 3 приведены максимальные значения погрешностей разностей псевдодальностей в дифференциальном режиме в зависимости от длины базы. В табл. 4 приведены максимальные разности смещений координат станций по высоте  $\Delta h$  и в плоскости горизонта  $\Delta R$  в дифференциальном режиме в зависимости от длины базы.

Таблица 1

| Источник погрешности   | Максимальная погрешность псевдодальности, мм |
|--|--|
| Погрешности эфемеридного обеспечения (при использовании бортовых эфемерид) | 2500   |
| Погрешности эфемеридного обеспечения (при использовании точных эфемерид)   | 70   |
| «Wind-up»-эффект (для частоты L1 GPS)                                      | 190  |
| Неравномерность фазовых характеристик антенн спутника                      | 12   |
| Неравномерность фазовых характеристик антенн приемника                     | 30   |

Таблица 2

| Источник погрешности | Максимальное смещение станции |                           |
|----------------------|-------------------------------|---------------------------|
|                      | по высоте, мм                 | в плоскости горизонта, мм |
| Земные приливы       | 300                           | 70                        |
| Океанические приливы | 50                            | 10                        |
| Полярные приливы     | 25                            | 7                         |

Таблица 3

| Источник погрешности   | База, км                                   |      |      |      |
|--|--|------|------|------|
|  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
|  | Максимальная разность псевдодальностей, мм |      |      |      |
| Погрешности эфемеридного обеспечения (при использовании бортовых эфемерид) | 57   | 115  | 230  | 460  |
| Погрешности эфемеридного обеспечения (при использовании точных эфемерид)   | 1,5  | 3    | 6    | 12   |
| «Wind-up»-эффект (для частоты L1 GPS)                                      | 4  | 8    | 16   | 32   |
| Неравномерность фазовых характеристик антенн спутника                      | 5  | 11   | 19   | 39   |
| Неравномерность фазовых характеристик антенн приемника                     | 6  | 13   | 25   | 43   |

Таблица 4

| Источник погрешности | База, км        |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                      | 500             |                 | 1000            |                 | 2000            |                 | 4000            |                 |
|                      | $\Delta h$ , мм | $\Delta R$ , мм | $\Delta h$ , мм | $\Delta R$ , мм | $\Delta h$ , мм | $\Delta R$ , мм | $\Delta h$ , мм | $\Delta R$ , мм |
| Земные приливы       | 33              | 13              | 66              | 25              | 130             | 50              | 240             | 90              |
| Океанические приливы | 1               | 0,5             | 2,5             | 1               | 7               | 4               | 13              | 6               |
| Полярные приливы     | 0,6             | 0,4             | 2               | 0,6             | 4,5             | 1               | 8               | 2,2             |

«Wind-up»-эффект в табл. 1 и 3 рассчитывался для частоты L1 GPS.

Погрешности, обусловленные неравномерностью фазовой характеристики антенн приемников, зависят от типа антенны. Значение в табл. 1 рассчитано для антенны NovAtel GPS-702GG.

Погрешности, обусловленные неравномерностью фазовой характеристики антенн приемников для дифференциального режима наблюдений (табл. 3), рассчитывались в предположении, что и на «роверном» приемнике, и на референционной станции установлены одинаковые антенны NovAtel GPS-702GG, ориентированные одинаково.

Величина океанических приливов зависит от удаленности станции от океанов. Разность смещений координат станций в дифференциальном режиме зависит не столько от расстояния, сколько от разности амплитуд и фаз приливных волн, поэтому для станций, расположенных вблизи океанов, разность смещений координат будет больше, чем для станций, расположенных в глубине материков. Данные в табл. 4 получены для станций, расположенных в середине Евразийского континента.

Как следует из приведенных результатов, рассмотренные погрешности достигают значительных величин и для достижения сантиметровой точности в режиме PPP должны обязательно учитываться. В дифференциальном режиме погрешности в значительной мере компенсируются, однако при увеличении базовых расстояний они значительно увеличиваются и должны учитываться. В первую очередь это касается погрешностей эфемеридно-временного обеспечения и земных приливов.

Опыт зарубежных исследований и практическое подтверждение возможностей PPP показали, что после ввода описанных поправок остаточная погрешность не превышает нескольких миллиметров.

### **Программная реализация**

Для расчета и ввода поправок в ГНСС-наблюдения разработан программно-алгоритмический комплекс, представляющий собой набор программных модулей, осуществляющий чтение данных наблюдений и файлов исходных данных, расчет поправок и ввод их в наблюдаемые параметры. Комплекс реализован на языке программирования Delphi и в дальнейшем будет переведен на Matlab.

### **Планы дальнейших исследований**

В результате проведенных исследований разработаны алгоритмы и программы предварительной обработки (препроцессинга) данных наблюдений. В настоящее время ведутся работы по подготовке реальных исходных данных с целью разработки и исследования методов и алгоритмов режима точного позиционирования PPP. Предполагается реализация многосистемного (GPS + ГЛОНАСС) одночастотного и двухчастотного режима PPP как в статическом, так и в кинематическом режимах наблюдений.

### **Выводы**

1) В настоящей работе рассмотрена задача учета (компенсации) погрешностей, вызванных погрешностями эфемеридно-временного обеспечения, приливными эффектами, эффектами дополнительного фазового набега, обусловленного вращением антенн спутника и приемника («wind-up»-эффекта), неравномерностями фазовых характеристик антенн спутников и приемников. Представлены результаты оценки и анализа соответствующих фазовых погрешностей, а также рекомендации по расчету и вводу коррекций в результаты фазовых наблюдений в задачах высокоточного позиционирования.

2) Как следует из представленных результатов и их анализа, погрешности могут достигать значимых величин (от миллиметров до нескольких метров), поэтому их необходимо учитывать в задачах точного позиционирования в режиме PPP. Кроме того, и в дифференциальном режиме координатных определений на больших базовых расстояниях (1000 км и более) разности кодовых и фазовых псевдодальностей могут достигать нескольких сантиметров, что также требует коррекции наблюдений. После ввода рассчитанных поправок по приведенным алгоритмам остаточная погрешность не превышает нескольких миллиметров.

3) Для проведения исследований разработан специализированный программно-алгоритмический комплекс, включающий все необходимые функции для расчетов коррекций и их ввода в результаты наблюдений. Данный комплекс используется для отработки методов и алгоритмов точного позиционирования. Одновременно он будет использоваться для точных дифференциальных определений на длинных базах (500 – 2000 км).

**Список литературы:** 1. Гофманн-Велленгоф, Б., Лихтнеггер, Г., Коллинз, Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / пер. з англ. 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. – pp. 1893-1899. 3. Gao, Y.

and Chen, K. Precise Positioning with Undifferenced Data – The European Navigation Conference, 2004. – pp. 1-9. 4. Couba, J. A guide to using International GNSS service (IGS) products – <http://www.igs.org/igs/scb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>, 2009. 5. Stefan Schaer. IONEX – The IONosphere maps EXchange format Version 1 – <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs/scb/data/format/ionex1.pdf>. 6. The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c) – <ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/sp3c.txt> 7. 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. 8. 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. 9. IERS Conventions (2003). Dennis D. McCarthy and Gérard Petit. (IERS Technical Note; 32). 10. <ftp://maia.usno.navy.mil/conv1996/chapter7/olls25.blq>. 11. <http://frost.e.oso.chalmers.se/loading/>. 12. ANTEX: The Antenna Exchange Format, Version 1.4 – <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs/scb/station/general/antex14.txt>.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 07.05.2012*