

УДК 621.396

Математическая модель смещения фазовых центров антенн при высокоточном местоопределении в глобальных навигационных комплексах

А.Н.Подкорытов

Аннотация

В статье рассматривается методика учета смещений фазовых центров антенн спутников и приемников в глобальных навигационных спутниковых системах, а также приводятся результаты вычислительных экспериментов по определению критичности учета этих смещений при обработке реальных навигационных данных. Описываются физические причины возникновения указанных смещений. Проводится экспериментальный анализ степени влияния смещений фазовых центров антенн спутников и приемников на результаты оценивания координат потребителя при высокоточном местоопределении в апостериорном режиме.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы; гнсс; precise point positioning; ppp; pco; phase center offset; смещение фазового центра.

Введение

В Глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) орбита космического аппарата (КА) описывается как траектория движения материальной точки, отождествляемой с центром масс спутника. Высокоточные координаты, вычисляемые аналитическими центрами сети IGS (International GNSS Service) в режиме постобработки (файлы формата SP3), относятся именно к центрам масс спутников. При этом измерения псевдодалности и псевдофазы приемником производятся относительно фазового центра антенны спутника,

который не совпадает с центром масс. Данное смещение должно быть учтено в задачах высокоточного местоопределения в абсолютном режиме [1].

Под точными координатами наземных станций, осуществляющих измерения, подразумеваются координаты точек, в которых устанавливаются антенны. Данные точки называются маркером станции (station marker). Измерения, фиксируемые приемником, производятся относительно фазового центра антенны. Под фазовым центром понимается точка в пространстве, в которой фиксируется высокочастотный спутниковый сигнал. Положение фазового центра в пространстве зависит от направления прихода сигнала, а также от частоты сигнала. При этом возможность непосредственного измерения координат данной точки какими бы то ни было измерительными средствами отсутствует. Смещение между фазовым центром антенны приемника и маркером станции также должно учитываться при местоопределении с высокой точностью в абсолютном режиме [2].

В данной статье рассматривается методика учета смещений фазовых центров антенн спутников и приемников в ГНСС, а также приводятся результаты вычислительных экспериментов по определению критичности учета данных смещений при обработке реальных навигационных данных.

Смещение и вариации фазового центра спутниковых антенн

Для фазовых смещений спутниковых антенн выделяют два вида коррекций: смещение фазового центра и вариация фазового центра. Смещение представляет собой постоянный трёхмерный вектор, зафиксированный в системе координат, связанной с КА (рисунок 1), т.е. ориентация этого вектора зависит от ориентации спутника относительно Земли [1]. Ось Z указанной системы координат 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 координат до правой. Вариация – это дополнительная коррекция (скаляр), которая зависит от угла надира вектора «КА-приёмник». Геометрическая интерпретация угла надира θ приведена на рисунке 2. Заштрихованная область на рисунке 2 отображает диапазон возможных значений угла надира θ , максимальное значение которого составляет примерно 14 градусов.

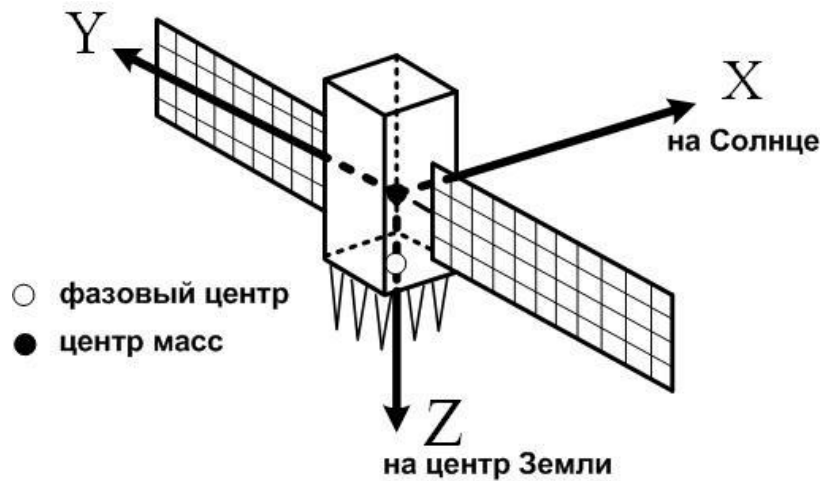


Рисунок 1. Система координат, связанная с КА

Смещение и вариации фазового центра в миллиметрах для всех спутников систем ГЛОНАСС и GPS могут быть получены из файлов IGS формата ANTEX (ANTenna EXchange), которые можно скачать с ftp-сервера международной службы IGS (<ftp://igsb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/>). Стандартное имя файла формата ANTEX – “igsYY_WWWW.atx”, где YY – текущее значение IGS frame, а WWWW – GPS-неделя, когда данный файл был создан.

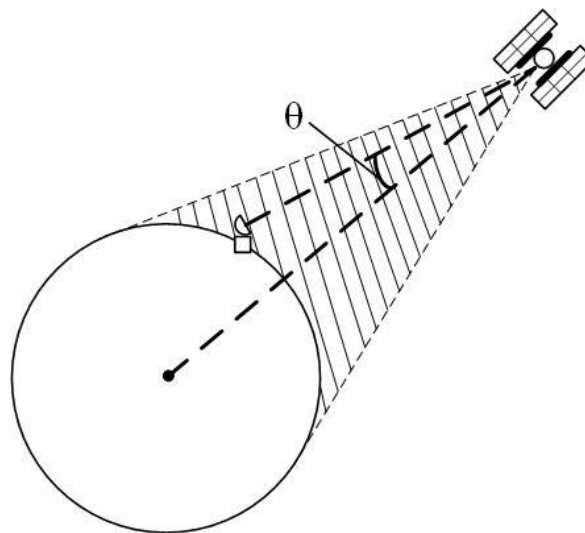


Рисунок 2. Угол надира вектора «КА-приёмник»

На практике величина фазовой коррекции в метрах, учитывающая смещение и вариацию фазового центра антенны КА, рассчитывается как проекция вектора смещения фазового центра (одна из компонент которого корректируется на величину вариации) на

линию, соединяющую центр масс спутника и приемник на Земле. Вычисленное значение фазовой коррекции используется при вычислении невязок измерений псевдодальностей и псевдофаз [2, 3].

В использовавшемся ранее в спутниковой навигации стандарте «относительной калибровки» коррекции смещения фазового центра антенны спутника имели одинаковые значения для всех КА одной модификации. В настоящее время используется стандарт «абсолютной калибровки», при котором значения коррекций зависят от конкретного КА.

Поскольку орбитальные группировки постоянно обновляются (запускаются новые спутники, выводятся из эксплуатации старые), файл IGS формата ANTEX, содержащий информацию об антеннах, регулярно обновляется. По этой причине перед запуском вычислительного процесса в режиме точного позиционирования (PPP) следует проверять наличие обновлений указанного файла.

При отсутствии ANTEX файла смещения фазовых центров некоторых модификаций спутников также могут быть учтены приближенно [1]. Из рисунка 4 видно, что спутники одной модификации имеют близкие значения смещения.

На рисунках 3 и 4 показаны Z-компоненты смещения фазовых центров антенн спутников ГЛОНАСС и GPS на 28 мая 2010 года.

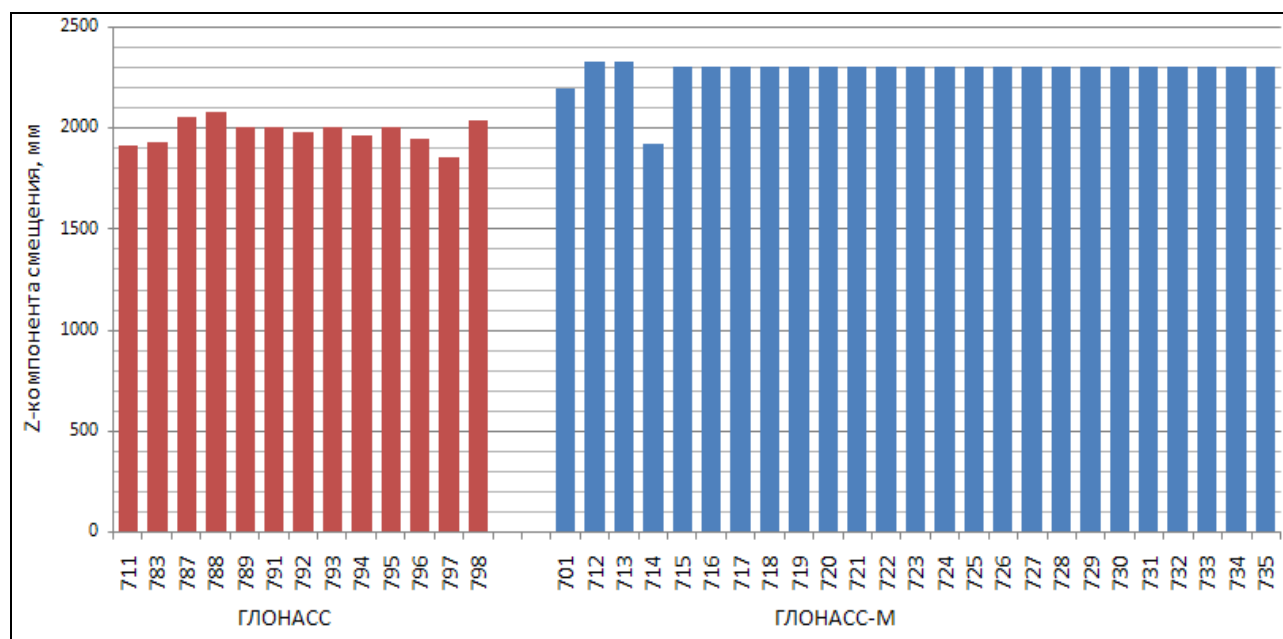


Рисунок 3. Z-компонента смещения фазовых центров для антенн спутников ГЛОНАСС.

Источник: файл "igs05_1585.atx" (28 мая 2010г.)

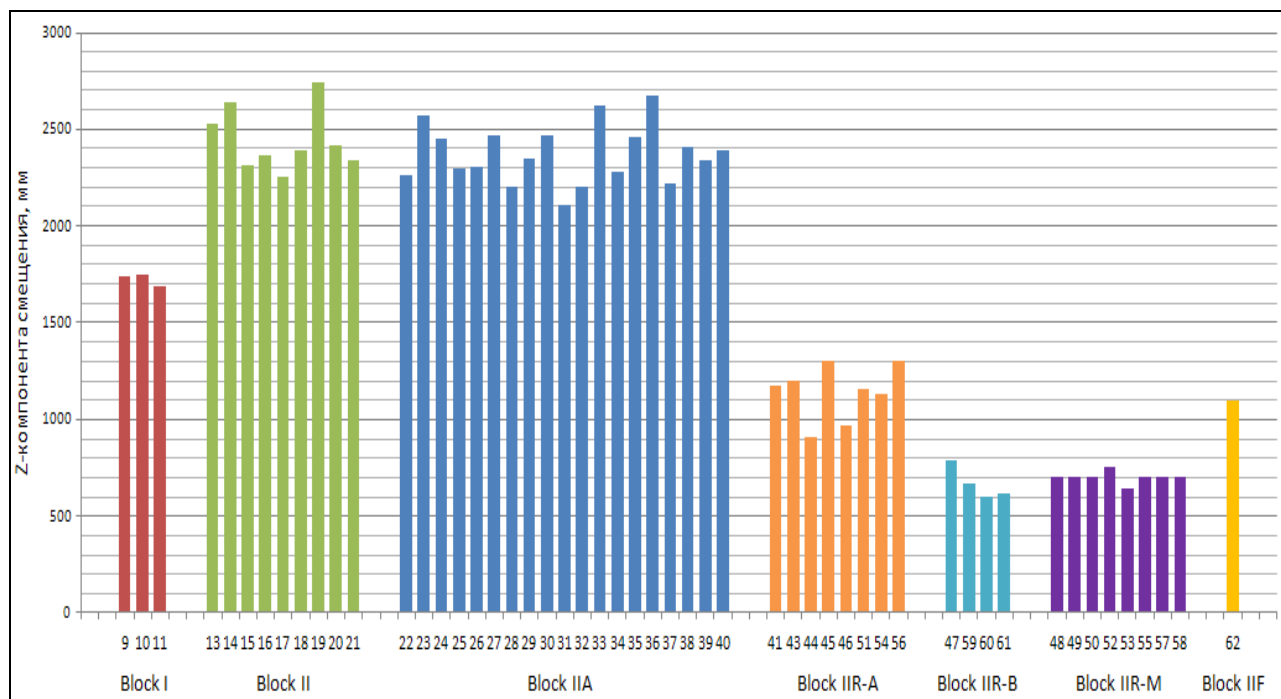


Рисунок 4. Z-компонента смещения фазовых центров для антенн спутников GPS. Источник: файл “igs05_1585.atx” (28 мая 2010г.)

Значения вариаций фазового центра в файле формата ANTEX зависят от угла надира. Для определения нужного значения коррекции нужно вычислить угол надира вектора «КА-приёмник» в момент наблюдения и интерполировать приведенные в файле значения коррекций (достаточно линейной интерполяции). Формат файлов ANTEX также поддерживает зависимость вариаций фазового центра от азимута, но с 2008 года службой IGS формируются файлы, в которых доступны значения вариаций фазового центра, зависящие только от угла надира. На рисунках 5 и 6 показаны вариации фазовых центров антенн спутников ГЛОНАСС и GPS на 28 мая 2010 года, как функции угла надира.



Рисунок 5. Вариации фазовых центров для антенн спутников ГЛОНАСС (SVN 711, 783, 787-789, 791-798) и ГЛОНАСС-М (SVN 701, 712-735). Источник: файл “igs05_1585.atx” (28 мая 2010г.)

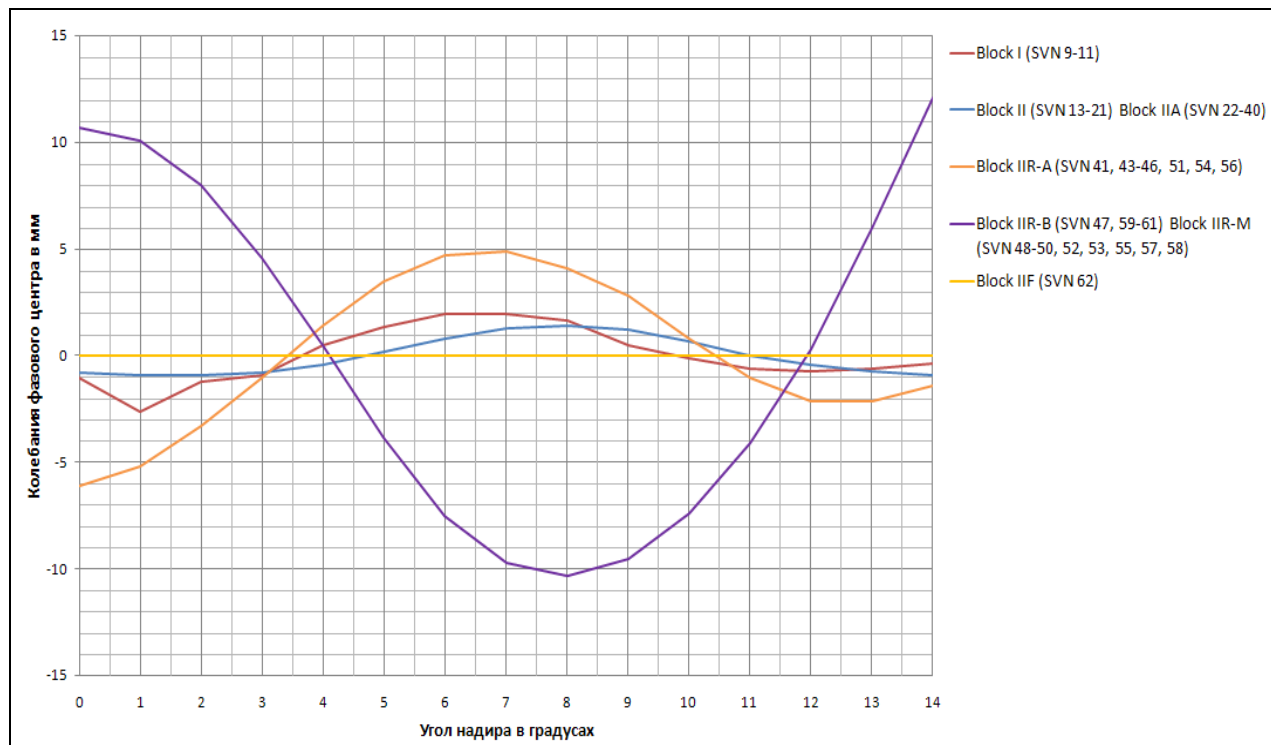


Рисунок 6. Вариации фазовых центров для антенн спутников GPS. Источник: файл “igs05_1585.atx” (28 мая 2010г.)

Смещение и вариации фазового центра антенн приемника

Аналогично информации о фазовых центрах спутниковых антенн смещения и вариации фазового центра антенн приёмника можно найти в ANTEX-файлах. В начале файлов размещены корректировки для спутниковых антенн, далее - информация для антенн приёмников сети наземных станций. Смещение фазового центра антенны приемника также представляет собой трёхмерный вектор, но его компоненты определяются в локальной геодезической системе координат (UEN) относительно точки ARP (Antenna Reference Point) антенны [2].

На рисунке 7 приведена схема антенны станции UNBJ. На ней показана точка ARP, которая является опорной точкой антенны и относительно которой задаются смещения фазовых центров для диапазонов L1 и L2. Как видно из рисунка 7, точка ARP совпадает с точкой BPA (Bottom of Preamplifier) – нижней точкой корпуса антенны. На указанном рисунке видно, что точка ARP примерно на 30 см выше маркера станции, который является высшей точкой стойки, куда крепится антенна. Это смещение не является смещением фазового центра, оно обычно называется высотой антенны и указывается в заголовке файла наблюдений формата RINEX (поле “ANTENNA: DELTA H/E/N”).

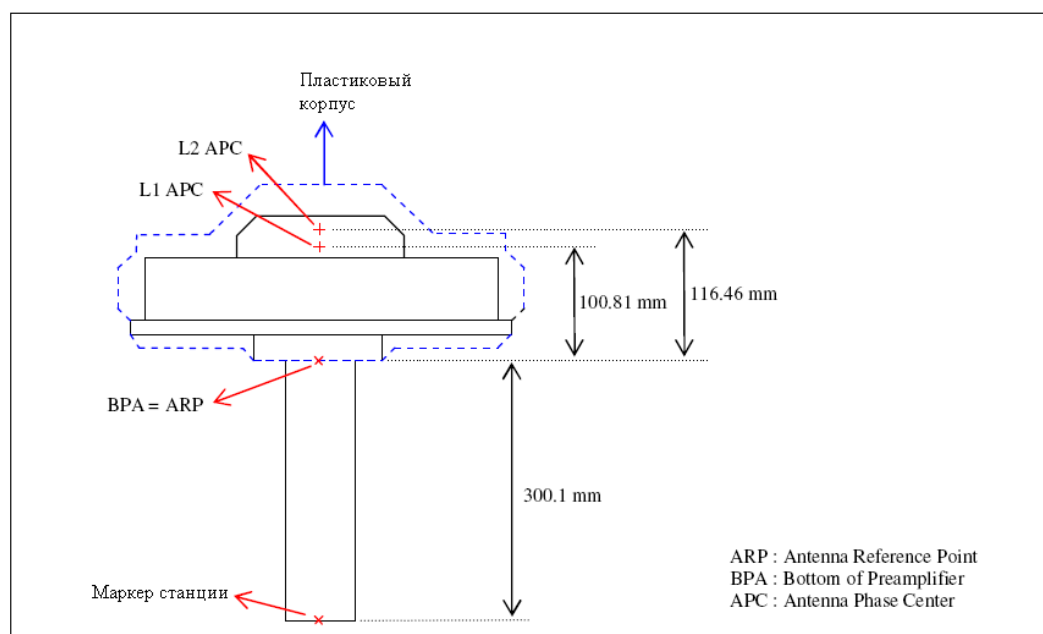


Рисунок 7. Схема антенны станции UNBJ. Смещения фазовых центров из файла “igs05_1421.atx” (март 2008г.)

Процедура учета смещения и вариаций фазового центра антенны приемника аналогична процедуре учета коррекций для спутниковой антенны: в локальной

геодезической системе координат вектор смещения фазового центра антенны приемника с учетом значения вариации и других внешних смещений (высота антенны, компоненты приливных эффектов и прочие локальные коррекции) проецируется на линию, соединяющую маркер станции и спутник. Полученная в результате коррекция в метрах прибавляется к измерениям псевдодальности и псевдофазы на соответствующей частоте.

На рисунке 8 показана зависимость вариаций фазового центра антенны станции UNBJ на частоте L1 в миллиметрах от углов зенита (угол между вертикалью и направлением на спутник) и азимута. На рисунке 9 приведена аналогичная зависимость для частоты L2.

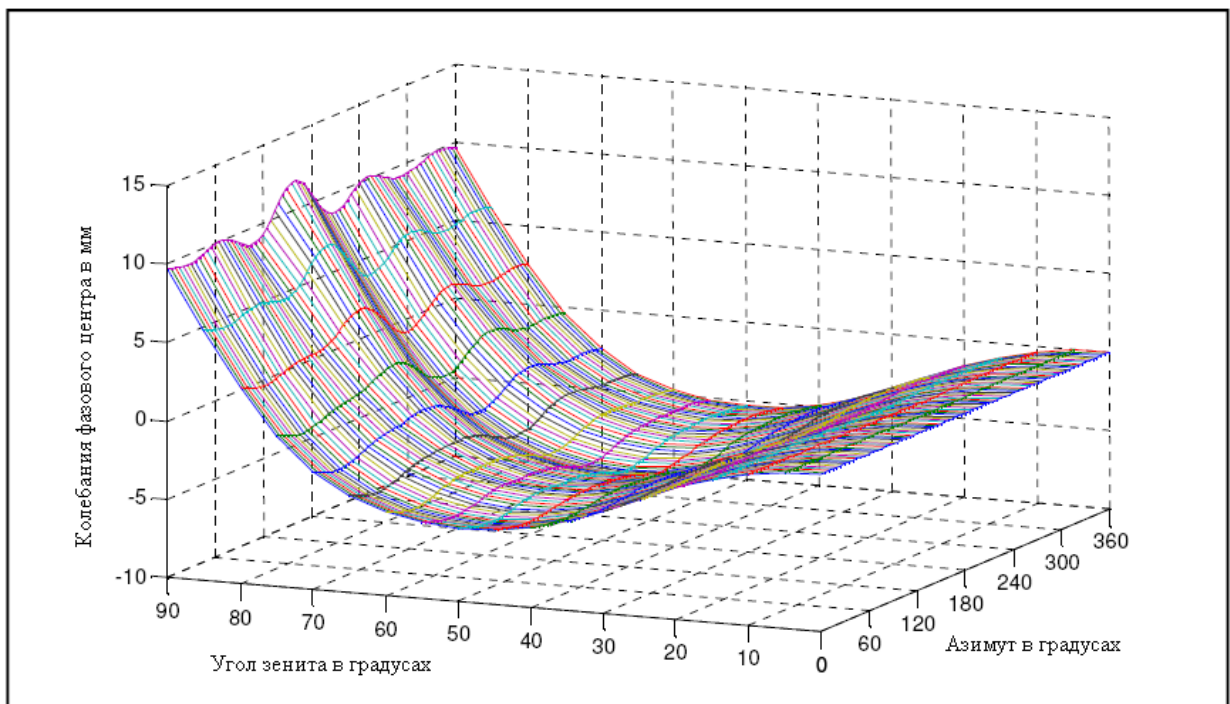


Рисунок 8. Вариации фазового центра антенны станции UNBJ на частоте L1. Источник: файл “igs05_1421.atx” (март 2008г.)

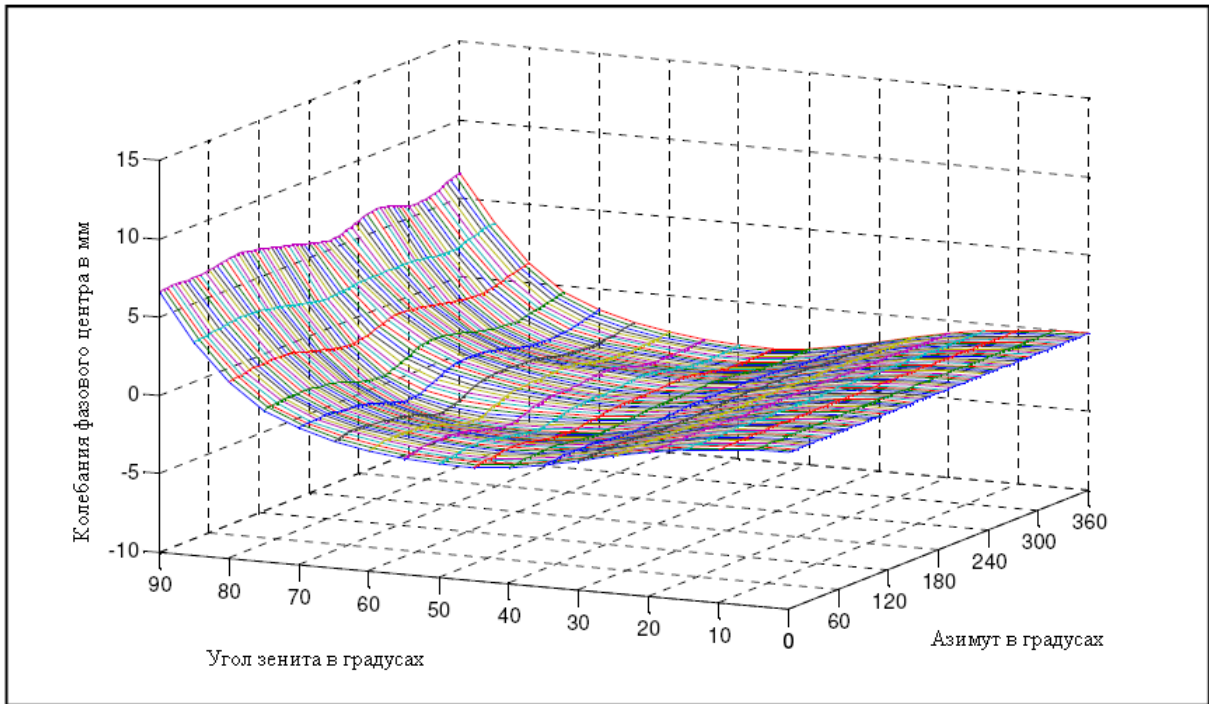


Рисунок 9. Вариации фазового центра антенны станции UNBJ на частоте L2. Источник: файл “igs05_1421.atx” (март 2008г.)

На рисунке 10 приведена зависимость вариаций фазовых центров приемных антенн на частотах L1 и L2 от угла зенита. Как видно из рисунка, наименьшее значение вариации достигается в направлении зенита, а наибольшее – при наименьшем угле возвышения. Также можно видеть, что вариации на частоте L1 для данной антенны сильнее, чем на частоте L2.

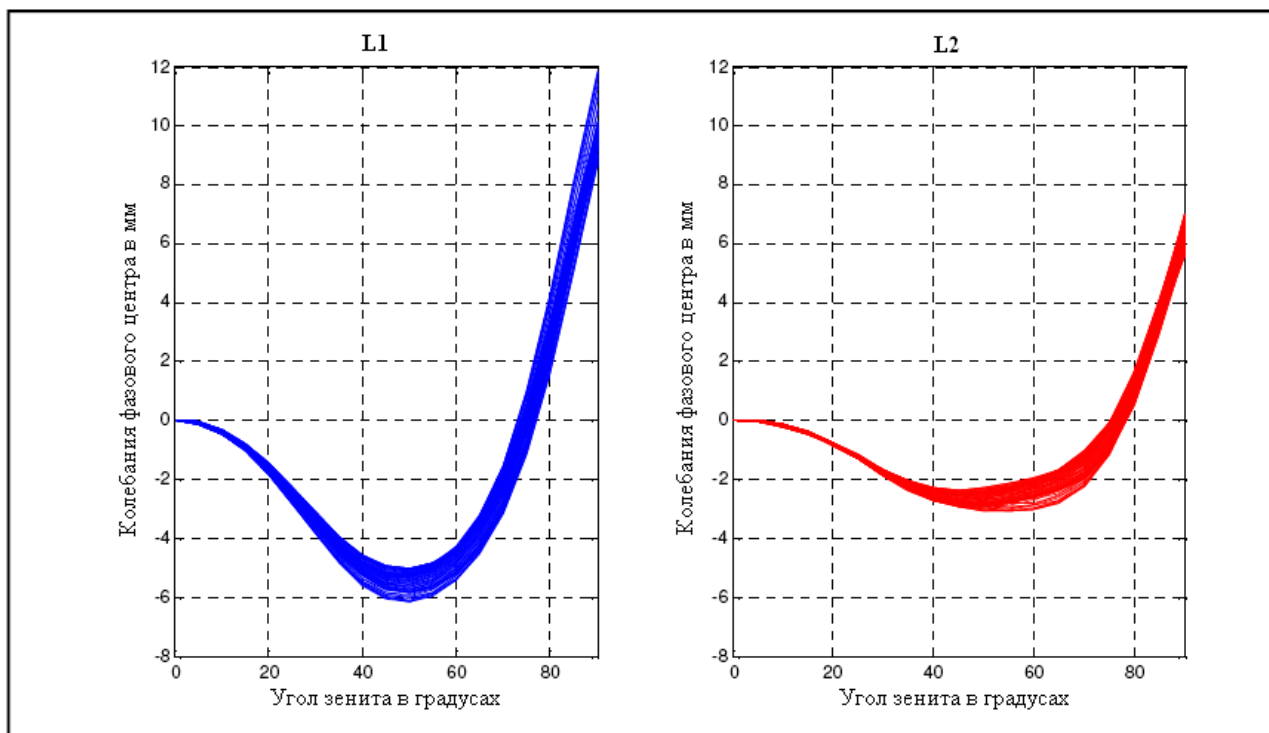


Рисунок 10. Вариации фазового центра антенны станции UNBJ на частотах L1 и L2.

Источник: файл “igs05_1421.atx” (март 2008г.)

Результаты вычислительного эксперимента

Была проанализирована зависимость точности вычисленных оценок координат потребителя от учета смещения фазовых центров антенн спутника и приемника. В апостериорном режиме обрабатывался суточный файл измерений станции “TIXI” сети службы IGS, расположенной на территории России в поселке Тикси, на севере республики Саха (Якутия). В качестве эталонных использовались высокоточные координаты станции, вычисленные службой IGS (International GNSS Service). Для обработки измерений на 11 января 2011 года использовалась наиболее точная (финальная, [4]) эфемеридно-временная информация службы IGS.

На рисунке 11 приводятся зависимости ошибок вычисляемых координат потребителя в гринвичской геоцентрической системе координат от времени обработки с учетом смещений и вариаций фазового центра антенны приемника (сплошные линии) и без него (пунктирные линии). По оси абсцисс отложено время обработки (1 сутки). По окончании обработки суточного файла смещение оценок координат приемника, вызванное отсутствием учета фазовых коррекций, составило $\Delta Y = 0.00235(\hat{i})$ для координаты Y и $\Delta Z = 0.01582(\hat{i})$ для координаты Z (рисунок 11). Указанные смещения привели к росту 3D-ошибки [4] на конец

интервала обработки с 0.005735(м) (с учетом фазовых коррекций в антенне приемника) до 0.019947(м) (без учета фазовых коррекций в антенне приемника).

На рисунке 12 приводятся аналогичные рисунку 11 зависимости с той разницей, что пунктирная линия на рисунке 12 относится к случаю отсутствия учета смещений и вариаций фазового центра как для антенны приемника, так и для антенн спутников (сплошная линия соответствует учету обоих указанных видов смещений). Для рисунка 12 $\Delta X = 0.03235(\hat{i})$ $\Delta Y = 0.01903(\hat{i})$ $\Delta Z = 0.14052(\hat{i})$ на момент окончания обработки суточного файла. Указанные смещения привели к росту 3D-ошибки на конец интервала обработки с 0.005735 (м) (с учетом фазовых коррекций в антеннах спутников и приемника) до 0.147586(м) (без учета фазовых коррекций в антеннах спутников и приемника).

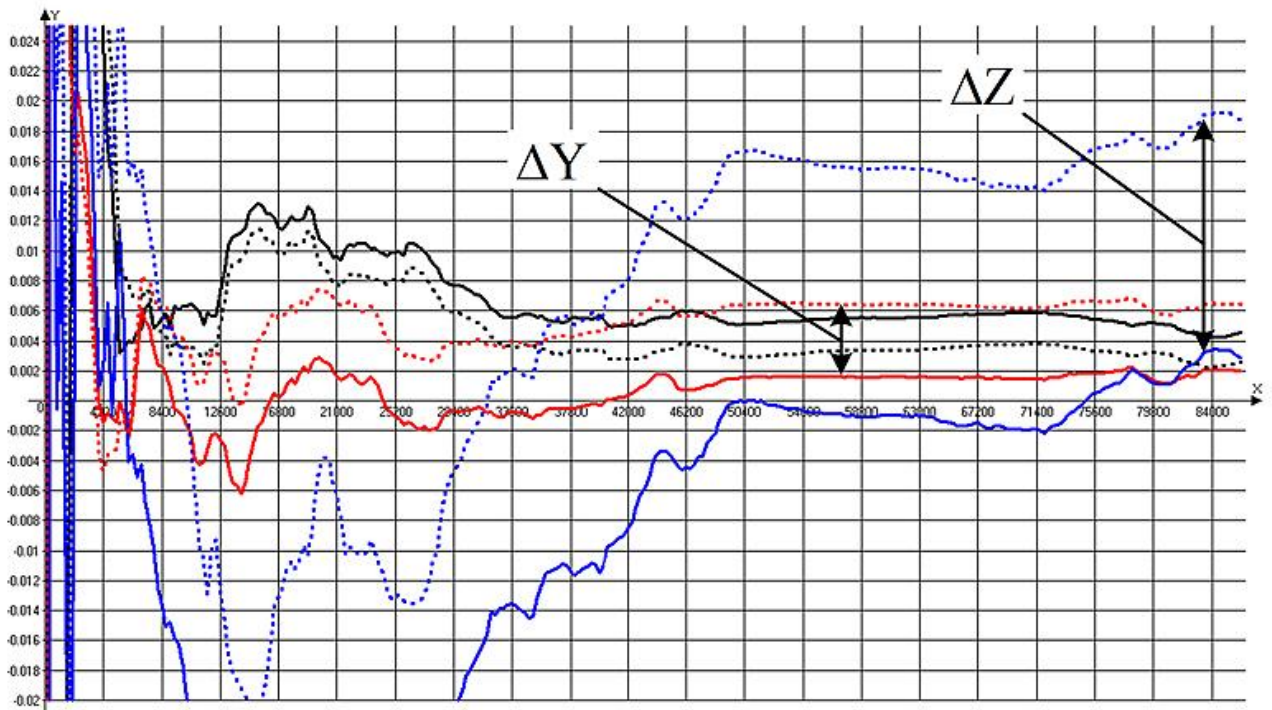


Рисунок 11. Зависимость ошибок оцененных координат при наличии (сплошная) и отсутствии (пунктир) учета смещения и вариации фазового центра антенны приемника потребителя

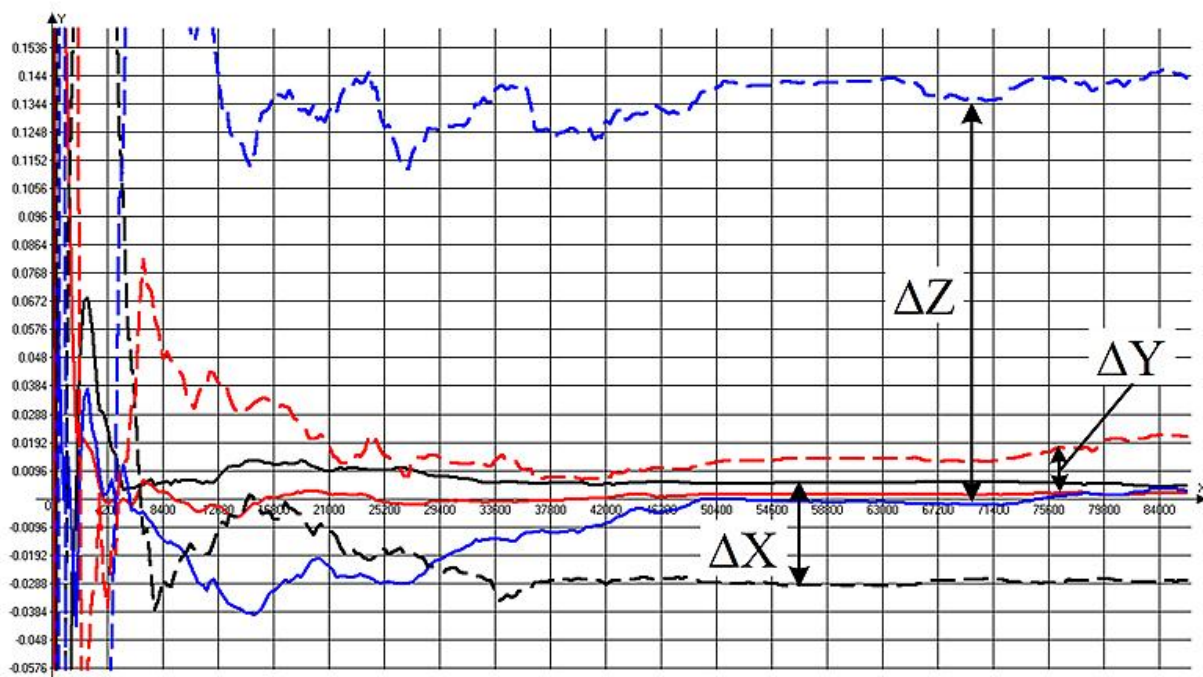


Рисунок 12. Зависимость ошибок оцененных координат при наличии (сплошная) и отсутствии (пунктир) учета смещения и вариации фазового центра антенны приемника потребителя и антенн спутников

Для антенны рассматриваемой станции “ТІХІ” смещение фазового центра на частоте диапазона L1 составило 0.05924(м), а на частоте диапазона L2 - 0.088062(м).

Заключение

Представленная методика учета смещений фазовых центров антенн спутников и приемников позволяет исключить в ошибках координат потребителя при высокоточном местоопределении систематическую составляющую, связанную с наличием указанных эффектов. Приведенные экспериментальные результаты (рисунок 11 и 12) свидетельствуют о важности учета описанных фазовых коррекций при апостериорной обработке длительных файлов навигационных измерений, когда уровень ошибок определения координат потребителя становится менее или порядка 1 см.

В материалах статьи использованы научные результаты, полученные при выполнении НИР по Государственному контракту № 14.740.11.1265 в рамках ФЦП «Научно-педагогические кадры инновационной России».

Библиографический список

1. A guide to using international GNSS service (IGS) products. Jan Kouba. Geodetic Survey Division Natural Resources Canada, May 2009.
2. Rodrigo Figueiredo Leandro. Precise Point Positioning with GPS. A new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis. Geodesy and Geomatics Engineering. Technical report NO.267. April 2009.
3. Global Positioning System: Theory and Applications. Volume I, and II. Edited by Parkinson B. W. and Spilker J. J. PROGRESS IN ASTRONAUTICS AND AERONAUTICS Volume 163. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 370 L'Enfant Promenade, SW, Washington, DC 20024-2518, 1996.
4. Подкорытов А.Н. Высокоточное определение координат потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах с использованием уточненной эфемеридно-временной информации. Вестник Московского авиационного института, №3, т.18, 2011, стр.233-239.

Сведения об авторах

Подкорытов Андрей Николаевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Ул. Константина Царева, 12, комн. 512, Москва, 125080; тел.: +7-926-357-32-54; e-mail: thepompous@gmail.com