

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АНАЛИЗА ПЕРЕОТРАЖЕНИЙ НАВИГАЦИОННОГО СИГНАЛА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МНОГОЛУЧЁВОСТИ НА ГНСС-ИЗМЕРЕНИЯ

©2017 А.О. Куприянов, Ю.М. Нейман, Д.А. Морозов, А.Ю. Перминов

*Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия*

*gnss@miigaik.ru*

**Аннотация.** Многолучёвость распространения навигационного сигнала является одним из основных источников ошибок для высокоточных приложений ГНСС. Существует ряд приёмов для ослабления влияния многолучёвости на ГНСС-измерения на аппаратном и программном уровне измерительной аппаратуры. При этом с точки зрения организации наблюдений подход к минимизации влияния многолучёвости в сложных условиях не выработан. Работа посвящена разработке алгоритма для вычисления координат точки отражения навигационного сигнала от произвольной поверхности, с целью исследования влияния эффекта многолучёвости на ГНСС-измерения с геометрической точки зрения и разработки методов его ослабления на этапе организации наблюдений.

**Ключевые слова:** ГНСС, многолучёвость, математическое моделирование

## DEVELOPING THE ALGORITHM TO ANALYSE THE NAVIGATION SIGNAL REFLECTIONS WITH THE PURPOSE TO STUDY THE EFFECT OF MULTIPATH AT THE GNSS MEASUREMENTS

©2017 Kupriyanov A., Neyman Yu., Morozov D., Perminov A.

*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia*

*gnss@miigaik.ru*

**Abstract.** Multipath propagation of the navigation signal is one of the main sources of errors of high-precise GNSS-applications. There are a number of techniques to mitigate the effects of multipath at the GNSS-measurements on hardware and software level instrumentation. Thus from the perspective of the observation approach to minimize the effect of multipath in difficult conditions is not developed. The work is dedicated to the development of an algorithm to calculate the coordinates of the navigation signal reflection point on an arbitrary surface, in order to study the impact of multipath effects on GNSS-measurements from a viewpoint of geometry and the development of methods of weakening the organization at the stage of observations.

**Keywords:** GNSS, multipath, mathematical modeling

На точность ГНСС - измерений влияют различные факторы. Эти факторы обычно разделяют на три группы – это ошибки связанные с: НКА, прохождением сигнала через атмосферу, аппаратурой потребителя. Ошибки, связанные с распространением сигнала (ионосферная и тропосферная задержка и влияние многолучёвости) вносят наибольший вклад в суммарную ошибку измерений. Ошибка, возникающая в результате влияния многолучёвости, выделяется среди остальных, потому что полностью зависит от места проведения измерений и не исключается при использовании относительных методов. Этот факт делает её практически основным источником ошибок в методах высокоточного позиционирования по сигналам ГНСС, применяемых в геодезии.

Под многолучёвостью в данном контексте подразумевается возможность одновременного попадания на приёмную антенну ГНСС-

приёмника сигналов от одного и того же спутника, прошедших разными геометрическими путями [1]. Причиной этого служат отражения сигнала от различных поверхностей и попадание отражённого луча на приёмную антенну. В результате этого приёмник обрабатывает не только прямой сигнал, а сумму прямого и отражённых сигналов, в силу чего искажается измеренная псевдодалность.

Основные методы борьбы с влиянием многолучёвости в настоящее время — использование антенн, конструктивно предназначенных для подавления переотражённых сигналов [2, 3], и использование различных технологий работы коррелятора для ослабления либо выявления влияния многолучёвости [4–6]. На использовании второго метода основано большое количество технологий применяемых в серийной ГНСС-аппаратуре, таких как MEDLL [7], MMT [8], RSSML [9] и др. Кроме того существует

ряд отечественных работ, посвящённых аналитическому и экспериментальному исследованию эффектов многолучёвости [10, 11].

Рассмотренные методы позволяют подавлять влияние многолучёвости на аппаратном уровне, но рассматривают её наличие и интенсивность как факт, не предусматривая превентивных мер на этапе организации наблюдений. В процессе проведения геодезических работ с применением ГНСС-измерений зачастую приходится работать в условиях сложных с точки зрения многолучёвости. Например, в условиях городской застройки, когда имеется множество отражающих поверхностей (рис. 1). В такой

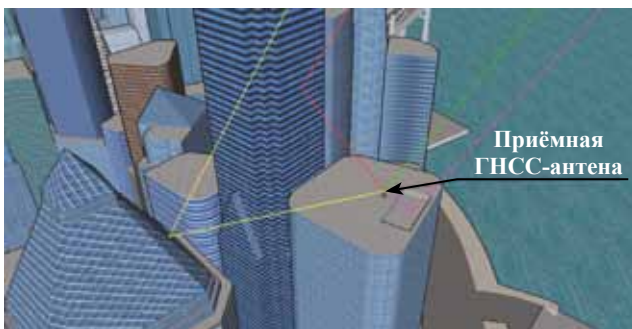


Рис. 1. Переотражения навигационного сигнала в условиях городской застройки

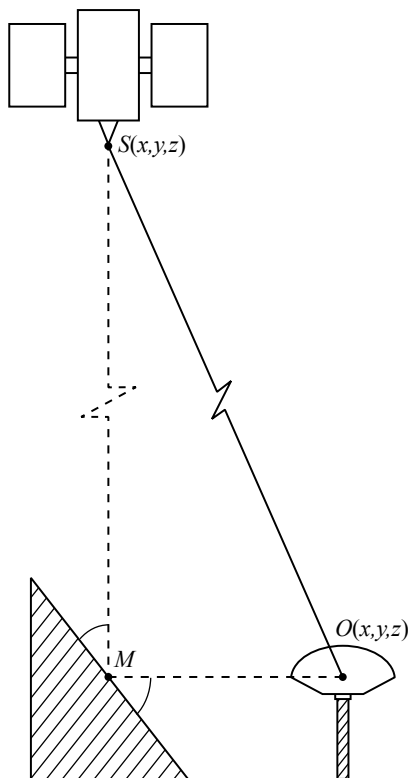


Рис. 2. Принципиальная схема ситуации

ситуации сложно оценить как нужно располагать ГНСС-антенну для минимизации влияния многолучёвости. Тем временем выбор позиции будет влиять на точность производимых измерений.

Для того чтобы выработать некоторые практические рекомендации по минимизации влияния многолучёвости на этапе организации наблюдений, можно рассмотреть ситуацию с геометрической точки зрения. Ошибка, вызванная многолучёвостью в конкретный момент времени, зависит от длины пути отражённых сигналов и, следовательно, от разницы фаз прямого и отражённого сигналов. При наличии данных о положении отражающих плоскостей, координат фазового центра приёмной антенны и эфемерид спутников возникает задача определения координат точек переотражения навигационного сигнала и длин путей переотражённых сигналов.

В представленной на рис. 2 ситуации известными являются координаты фазового центра излучающей антенны спутника  $S(x_s, y_s, z_s)$  и фазового центра приёмной антенны  $O(x_o, y_o, z_o)$ . Кроме того, плоскость предполагаемого отражения сигнала полностью определена, поскольку заданы пространственные координаты точек её контура, в рассматриваемой ситуации это:  $m_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $m_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $m_3(x_3, y_3, z_3)$ . По перечисленным данным необходимо определить пространственные координаты точки отражения  $M$ , в случае если таковая есть в заданной области отражения.

Так как координаты точки выхода сигнала в системе координат, связанной с Землёй, изменяются вследствие её вращения, их необходимо скорректировать прежде чем использовать для решения поставленной задачи.

Рассмотрим следующую задачу:

дано — координаты точки  $S(x_s, y_s, z_s)$ , координаты точки  $O(x_o, y_o, z_o)$ , уравнение отражающей плоскости  $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$  с нормальным вектором  $\vec{n}_1 = (A_1, B_1, C_1)$ ; ограничения разного рода, например, совокупность неравенств для координат типа  $x_{\min} < x_M < x_{\max}$ ;  $y_{\min} < y_M < y_{\max}$ ;  $z_{\min} < z_M < z_{\max}$ , выделяющие возможную область отражения в отражающей плоскости.

Требуется определить координаты возможных точек отражения  $M$  (см. рис. 2).

Решение поставленной задачи можно получить, выполняя последовательно три шага.

1. Поскольку искомая точка  $M$  вместе с известными точками  $S$  и  $O$  образует плоскость  $A_2x+B_2y+C_2z+D_2=0$ , перпендикулярную к отражающей плоскости, то в качестве нормального вектора  $\vec{n}_2=(A_2, B_2, C_2)$  плоскости  $MOS$  можно взять векторное произведение векторов  $\vec{n}_1$  и  $\vec{SO}=(x_o-x_s, y_o-y_s, z_o-z_s)$ . Поэтому уравнение плоскости  $MOS$  имеет вид

$$(B_1z_{\vec{SO}} - C_1y_{\vec{SO}})x + (C_1x_{\vec{SO}} - A_1z_{\vec{SO}})y + (A_1y_{\vec{SO}} - B_1x_{\vec{SO}})z - x_o(B_1z_{\vec{SO}} - C_1y_{\vec{SO}}) - y_o(C_1x_{\vec{SO}} - A_1z_{\vec{SO}}) - z_o(A_1y_{\vec{SO}} - B_1x_{\vec{SO}}) = 0,$$

где  $x_o, y_o, z_o$  — координаты любой точки прямой  $SO$ , например, точки  $O$ .

Таким образом:

$$A_2 = (B_1z_{\vec{SO}} - C_1y_{\vec{SO}});$$

$$B_2 = (C_1x_{\vec{SO}} - A_1z_{\vec{SO}});$$

$$C_2 = (A_1y_{\vec{SO}} - B_1x_{\vec{SO}});$$

$$D_2 = -x_o(B_1z_{\vec{SO}} - C_1y_{\vec{SO}}) - y_o(C_1x_{\vec{SO}} - A_1z_{\vec{SO}}) - z_o(A_1y_{\vec{SO}} - B_1x_{\vec{SO}}).$$

2. Искомая точка  $M$  лежит на прямой пересечения плоскостей: отражающей и  $MOS$ . В качестве направляющего вектора  $\vec{l}(l_1, l_2, l_3)$  этой прямой можно взять векторное произведение векторов  $\vec{n}_1$  и  $\vec{n}_2$ . Получим  $\vec{l}_1 = B_1C_2 - B_2C_1$ ,  $\vec{l}_2 = C_1A_2 - C_2A_1$ ,  $\vec{l}_3 = A_1B_2 - A_2B_1$  и уравнение указанной прямой имеет вид  $\frac{x-x_p}{l_1} = \frac{y-y_p}{l_2} = \frac{z}{l_3}$ , где  $x_p, y_p$  находятся из решения двух линейных уравнений с

$$\text{двумя неизвестными: } \begin{cases} A_1x + B_1y = -C_1z_p - D_1; \\ A_2x + B_2y = -C_2z_p - D_2. \end{cases}$$

Здесь третья координата  $z_p$  произвольно положена равной любому значению, удовлетворяющему ограничениям, выделяющим возможную область отражения в отражающей плоскости. Переписав это уравнение в параметрической форме, мы получаем зависимость искомых координат точки отражения  $M$  только от одной переменной — параметра  $t$ :

$$x_M = x_p + l_1 t, \quad y_M = y_p + l_2 t, \quad z_M = z_p + l_3 t.$$

3. Оставшееся только одно неизвестное — параметр  $t$  найдём из известного требования о равенстве углов падения луча  $SM$  и отражения луча  $MO$ . В математической форме это требование имеет вид одного уравнения с

$$\text{одним неизвестным } t: \frac{(\vec{SM}, \vec{n}_1)}{|\vec{SM}| |\vec{n}_1|} = \frac{(\vec{OM}, \vec{n}_1)}{|\vec{OM}| |\vec{n}_1|}.$$

В более подробном виде имеем (после сокращения на  $|\vec{n}_1|$ ):

$$\frac{A_1(x_p - x_o + l_1 t) + B_1(y_p - y_o + l_2 t) + C_1(z_p - z_o + l_3 t)}{[(x_p - x_o + l_1 t)^2 + (y_p - y_o + l_2 t)^2 + (z_p - z_o + l_3 t)^2]^{1/2}} = \frac{A_1(x_p - x_s + l_1 t) + B_1(y_p - y_s + l_2 t) + C_1(z_p - z_s + l_3 t)}{[(x_p - x_s + l_1 t)^2 + (y_p - y_s + l_2 t)^2 + (z_p - z_s + l_3 t)^2]^{1/2}}.$$

Решая это алгебраическое уравнение любым численным методом, например, простейшим методом половинного деления, получим значение параметра  $t=t_M$ , соответствующее возможной точке отражения  $M$ , и следовательно, координаты этой точки:  $x_M = x_p + l_1 t_M$ ;  $y_M = y_p + l_2 t_M$ ;  $z_M = z_p + l_3 t_M$ . Найденные координаты точек  $M$  проверяются на предмет удовлетворения ограничениям, определяющим возможную область отражения в отражающей плоскости. Если эти условия не удовлетворяются, то точек отражения нет.

Изложенный алгоритм реализован в программе на языке java. Для получения координат спутников ГНСС используется файл точных эфемерид в формате sp3. Информация о плоскостях возможного переотражения навигационного сигнала извлекается из файлов трёхмерных моделей в формате obj. Программа позволяет рассчитывать координаты точек переотражения и приращение пути отражённого сигнала относительно прямого.

Использование указанного алгоритма, трёхмерных моделей местности и имитации сигналов ГНСС позволит провести детальное исследование влияния многолучёвости на результаты измерений в различных условиях. Что в свою очередь может позволить сформулировать практические рекомендации по ослаблению влияния многолучёвости на этапе организации наблюдений. Кроме того, алгоритм может быть использован для выбора в определённой области такого положения, где будет минимальное количество переотражений

за определённый период времени. Это может быть использовано при выборе места для установки постоянно действующей базовой станции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Townsend, B. R., and P. Fenton*, "A Practical Approach to the Reduction of Pseudorange Multipath Errors in a L1 GPS Receiver", in Proceedings of ION GPS-94, Salt Lake City, Utah, USA, 1994.

2. *Justin W.* State of The Art, Leading Edge Geodetic Antennas from Leica Geosystems. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, 2012.

3. *Попов Н.Н., Михеев В.С., Курьянов А.О., Матвеев Д.С.* Требования к материалам приборов и аппаратуры спутниковых систем измерений // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъёмка». 1997. – № 5. – С. 59–69.

4. *Van Dierendonck A.J., Fenton P., Ford T.* Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver. Navigation 39. No. 3. Fall 1992.

5. *Irsigler M. Eissfeller B.* Comparison of Multipath Mitigation Techniques with Consideration of Future Signal Structures. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. IONGPS/GNSS 2003.

Sept. 2003. Portland.

6. *Georgiadou Y., Kleusberg A.* On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning // Manuscripta Geodaetica. Vol. 13. 1988

7. *Richard N., Townsend B., Fenton P.*, The Multipath Estimating Delay Lock Loop : Approaching Theoretical Accuracy Limits. IEEE Position, Location and Navigation Symposium, Las Vegas, Nevada, April U-15, 1994

8. *Sahmoudi M., Landry R.*, Mitigation Techniques Using Maximum-Likelihood Principle. Inside GNSS november / december 2008

9. *Bhuiyan H., Zhang J., Lohan E., Wan W., Sand S.*, Analysis of Multipath Mitigation Techniques with Land Mobile Satellite Channel Model. Radioengineering, vol. 21, no. 4, december 2012

10. *Вейцель А.В., Жодзишский М.И., Милютин Д.С.* Ошибки многолучевости для различных спутниковых сигналов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. – №8. – С. 34–41.

11. *Валайтис А.А., Никитин Д.П., Садовская Е.В.* Исследование влияния ошибки многолучевости на точность определения параметров сигналов ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем) при помощи имитатора навигационного поля // Системы управления и навигации, 2014. – №77. – С. 13–19.

Принята к печати 16 октября 2017 г.