

УДК 621.371

В.М. Дейнеко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ МНОГОЛУЧЕВОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ GPS/ГЛОНАСС

Предложен метод оценки погрешности многолучевости распространения сигналов спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС. Работа предлагаемого метода основана на измерении навигационных сигналов двумя антеннами, расположенными на небольшом базовом расстоянии. Получено аналитическое выражение, определяющее разность фаз сигналов принимаемых двумя антеннами, обусловленное погрешностью многолучевости. Полученный метод может быть использовано для оценки фазы отраженного сигнала в конструктивном блоке близко расположенных антенн.

Ключевые слова: погрешность многолучевости, антенна, фаза сигнала, отраженный сигнал.

Постановка проблемы

Точность навигационных определений по сигналам спутников GPS ограничивается рядом факторов, основными из которых являются: влияние атмосферы (ионосфера, тропосфера), несоответствие переданных эфемерид спутника его истинному положению, рассогласование шкалы времени приемника и передатчика, влияние сигналов переотраженных от окружающих предметов, шумы приемной аппаратуры. Большинство указанных погрешностей могут быть скомпенсированы с использованием различных методов основанных на свойствах пространственно-временной корреляции данных погрешностей. Из всех перечисленных источников погрешностей эффект многолучевости и шум приемной аппаратуры являются некоррелированными в пространстве процессами. Так как шум приемной аппаратуры представляет собой "шум", то его влияние на точность навигационных определений может быть существенно снижено путем использования различных методов фильтрации. Погрешность многолучевости является аддитивной смесью регулярной и случайной составляющих и зависит от геометрии антенны GPS-приемника, спутника и окружающих предметов во многом зависит от взаимного расположения спутника, потребителя и отражающих объектов. Поэтому единого подхода по оценке и коррекции данной погрешности на данный момент не существует.

Как показал анализ последних исследований и публикаций, а также экспериментальные исследования погрешность из-за многолучевости имеет большой разброс значений и составляет 0,5...2 м в лучшем случае (при использовании специальных антенн) и до 100 м в худшем, в городских условиях с высотными зданиями [1, 2].

Основные известные способы борьбы с эффектом многолучевости можно классифицировать следующим образом:

1). Использование специально разработанных антенн (геодезического класса с низким коэффициентом

усиления для малых углов места (антенны типа «ChokeRing»)) [3 – 5].

2). Использование в GPS приемниках аппаратно-программных средств уменьшения эффекта многолучевости в реальном масштабе времени в кодовых наблюдениях. К таким технологиям уменьшения многолучевости относятся такие известные патентованные технологии как Narrow Correlator (NovAtel, Trimble, Leica и др.), и PAC, VC (NovAtel) [3 – 5].

Несмотря на то, что за последние несколько лет производителями навигационного оборудования достигнут прогресс в развитии указанных двух направлений, проблема остается нерешенной до конца, так как использование данных технологий требует закупки дорогостоящего зарубежного оборудования. Кроме высокой стоимости данные технологии обеспечивают эффективный результат при задержках переотраженных сигналов по отношению к прямому, превышающих 30 – 40 м [3, 6].

Цель работы заключается в разработке алгоритма оценки и компенсации эффекта многолучевости, при определении местоположения с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем.

Результаты исследований

При распространении сигнала вдоль прямой линии, возможны существенные эффекты огибания и отражения от окружающих предметов. Это явление получило название multipath или в русской транскрипции – многолучевости. Суммарные ошибки из-за влияния многолучевости в GPS измерениях могут достигать значений единиц метров для кодовых измерений и единиц-десятков сантиметров для фазовых измерений. В наиболее худших погрешность многолучевости может вызвать сбои и перерывы в слежении за спутниками. Следует отметить, что расположение приемных антенн ККС обязательно выбирается с учетом минимизации влияния многолучевости, тем не менее, это влияние обязательно необходимо учитывать в процессе обработки информации.

Эффект многолучевости вызван внешними отражениями сигнала от рядом стоящих объектов, поверхностей грунта или воды, при последующем достижении антенны приемника. Многолучевость может привести к целому ряду эффектов, наиболее существенным из которых является интерференция между прямым и отраженным сигналом, которая приводит к увеличению шумовых помех при приеме сигнала. При аппаратном отслеживании за дальностью может возникнуть ошибка равная сумме расстояния от спутника до приемника и от отражателя до приемника.

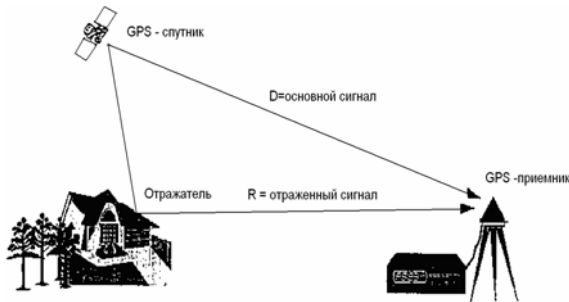


Рис. 1. Влияние эффекта многолучевости

Погрешность многолучевости может быть оценена с использованием следующего соотношения:

$$\operatorname{tg} \Delta\phi_m = \frac{\beta \cdot \sin \Delta\phi}{1 + \cos \Delta\phi},$$

где $\Delta\phi_m$ – фазовый сдвиг несущей сигнала, полученного в приемнике в результате интерференции за счет многолучевости; $\Delta\phi$ – фазовый сдвиг отраженного сигнала относительно прямого; β – коэффициент, который изменяется между 0 (нет отражения) и 1 (отражаемый сигнал, столь же сильный как прямой сигнал).

Основными воздействиями погрешности из-за многолучевости на GPS-измерения являются:

- возникновение "скачков" при приеме сигнала, которые являются функцией частоты. Теоретически максимальный эффект многолучевости наблюдается в случае распространения отраженного сигнала по диагонали с расстояния равного около половины длины волны псевдослучайной последовательности (code-chip), т.е. 150 м кода C/A-кода и 15 м для P(Y) кода. Сдвиг в фазе несущей сигналов при этом не превышает значения 1/4 от длины волны, т.е. около 5...6 см для L1 и L2;

- изменяется вид синусоидального сигнала и средний период функции (рис. 2, 3).

На сегодняшний день не существует общей математической модели для точного описания или предсказания эффекта многолучевости.

В наиболее общем случае GPS-приемник принимает множество отраженных сигналов вместе с прямым сигналом от спутника. Эти отраженные сигналы влияют на выходной сигнал приемника.

Рассмотрим более подробно влияние эффекта многолучевости на фазу несущей принимаемого навигационного сигнала.

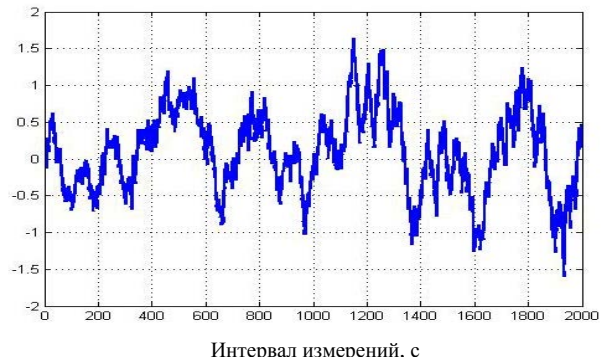


Рис. 2. Изменение вида и периода синусоидального сигнала. Станция EVPT, 23 декабря, спутник №10



Рис. 3. Изменение вида и периода синусоидального сигнала. Станция EVPT, 24 декабря, спутник №10

Сложный сигнал на входе в приемник может быть представлен следующим выражением:

$$s(t) = d(t) \cdot c(t) A \sum_{i=0}^n \alpha_i \cos \left(2\pi f_L t + \theta_0 + \frac{2\pi d_i}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где $d(t)$ – бит данных навигационного сообщения; $c(t)$ – C/A код сигнала GPS; A – амплитуда сигнала на несущей частоте; α_i – коэффициенты прямого и отраженных сигналов; f_L – несущая частота сигнала GPS; d_i – задержка сигнала относительно прямого сигнала GPS; λ – длина волны сигнала GPS; θ_0 – начальная фаза.

В выражении (1) коэффициенты α_i и d_i изменяются во времени и для прямого сигнала принимают значения $i = 0$, $d_0 = 0$ и $\alpha_0 = 1$.

Пренебрегая влиянием бита навигационных данных можно записать выражение для фазы сигнала на выходе дискриминатора [12]:

$$\psi = \arctan \left(\frac{\sum_{i=0}^n R(\tau - \delta_i) \cdot \alpha_i \sin \left(\psi_{\text{ист}} + \frac{2\pi d_i}{\lambda} \right)}{\sum_{i=0}^n R(\tau - \delta_i) \cdot \alpha_i \cos \left(\psi_{\text{ист}} + \frac{2\pi d_i}{\lambda} \right)} \right), \quad (2)$$

где $R(\tau)$ – корреляционная функция; δ_i – задержка сигнала из-за многолучевости; $\psi_{\text{ист}}$ – истинная фаза сигнала.

При отсутствии отраженных сигналов коэффициенты выражения (2) достигают значений $\alpha_0 = 1$,

$\alpha_1 \dots \alpha_n = 0$ и $s_0 = 0$ и (2) сводится к $\Psi = \Psi_{\text{ист}}$, т.е. измеренная фаза сигнала равна истинной фазе. Когда отраженные сигналы присутствуют, то измеренную фазу можно представить

$$\Psi = \Psi_{\text{ист}} - \Delta\Psi.$$

Предположим некий виртуальный отражатель с изменяющимися во времени параметрами (коэффициентом отражения и пространственным местом отражения), который будет эквивалентом всех отражений в окрестности приемной антенны. Тогда влияние всех отраженных сигналов может быть представлено как результат отражения от этого единственного виртуального отражателя. Изменение параметров отражения виртуального отражателя может быть выражено как функция времени, которая определяет погрешность многолучевости в виде:

$$\Delta\Psi = \Psi_{\text{эпб}} - \Psi(t) = \arctan\left(\frac{R(\tau - \delta(t)) \cdot \alpha(t) \sin \gamma(t)}{R(\tau) - R(\tau - \delta(t)) \cdot \alpha(t) \sin \gamma(t)}\right), \quad (3)$$

где $\gamma(t)$ – фаза сложного отраженного сигнала.

Разделив числитель и знаменатель уравнения (3) на корреляционную функцию и обозначив

$$\alpha_1(t) = \frac{R(\tau - \delta(t)) \cdot \alpha(t)}{R(\tau)},$$

можно получить выражение для разности фаз:

$$\Delta\Psi = \frac{\alpha_1(t) \sin \gamma(t)}{1 + \alpha_1(t) \cos \gamma(t)}. \quad (4)$$

Выражение (4) определяет соотношение между ошибкой определения фазы сигнала из-за многолучевости $\Delta\Psi$, коэффициентом отраженного сигнала α_1 и фазой отраженного сигнала $\gamma(t)$.

Из-за значительного расстояния до навигационного спутника, направления прихода его сигналов на две близко разнесенные в пространстве антенны можно предположить параллельными. Таким образом, плоский фронт волны, перпендикулярный линии визирования на спутник, будет иметь одно и то же значение фазы. После отражения от плоского виртуального отражателя сигналы остаются параллельными, а изменение фазы определяется дополнительным смещением плоского фронта волны. По этой причине фаза отраженного сигнала, принимаемого на близко расположенные антенны, будет являться функцией направления отраженного сигнала (т.е. азимута и угла места на предмет переотражения), а также относительной геометрии расположения антенн. Каждая из антенн принимает прямой сигнал от спутника и отраженные сигналы от близкорасположенного плоского объекта. Фаза сигнала на входе антенны Ант 1 по сравнению с фазой на входе Ант 2 может быть представлена как:

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{a_{01} \cdot \cos(\varphi_0 - \varphi_{01})}{\cos \theta_0}, \quad (5)$$

где γ_0 – фаза сигнала на антенне Ant 0; a_{01} – расстояние между антеннами; φ_0 – азимут вектора 0-1;

θ_0 – угол места отраженного сигнала, где индексы 0 и 1 – относятся соответственно к антеннам 0 и 1.

Если значение фазы и направление отраженного сигнала известны для антенны Ант 0, то фаза сигнала на входе антенны Ант1 может быть вычислена исходя из известной геометрии между ними. Соотношение (5) может быть использовано для оценки фазы отраженного сигнала в конструктивном блоке близко расположенных антенн. При этом с увеличением числа антенных элементов увеличивается число неизвестных в общей системе уравнений. Чаще всего используется антенная система из шести антенн.

Выводы

Представленный алгоритм компенсации погрешности многолучевости позволяет селективно из сигналов, поступающих на вход приемной антенны GPS-приемника, прямой навигационный сигнал и фильтровать сигналы с высоким уровнем погрешности многолучевости, т.е. образованные путем интерференции прямого и отраженных от окружающих предметов сигналов. Отличительной особенностью данного алгоритма является то, что он позволяет определять направление прихода прямого и отраженного сигналов. Использование этой особенности позволяет выбирать оптимальное место размещения спутникового навигационного приемника в смысле минимизации погрешности многолучевости. Практическое применение данного алгоритма возможно при выборе оптимального места расположения контрольно-корректирующих станций Системы координатно-временного и навигационного обеспечения Украины.

Список литературы

1. Montenbruck O. Ionospheric Correction for GPS Tracking of LEO Satellites / O. Montenbruck, E. Gill // *United Kingdom: The journal of navigation*. – 2002. – P. 293-304.
2. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Лихтенеггер, Д. Коллінз. – К.: Наукова думка, 1995. – 380 с.
3. Assessment of Ground Accuracy and Multipath Effects for a Differential-GPS Ground Segment / G. Amabili, C. Carcioli, M. Frullone, M. Zanzi // *Proceedings of the GNSS-2003*. – The European Navigation Conference, 22–25 April 2003. – P. 25-32.
4. Radovanovic R.S. High accuracy Deformation Monitoring Via Multipath Mitigation by Day-to-Day Correlation Analysis / R.S. Radovanovic // *Proceedings of ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah, 19–22 September*. – P. 35-44.
5. Ionospheric Delay Validation using Dual Frequency Signal from GPS at GEO Uplink Subsystem Locations / M.S. Grewal, W. Brown, P. Hsu, R. Lucy // *ION GPS' 99* – 14 – 17 September, 1999. – Nashville, TN, USA. – P. 1429-1436.
6. Обзор и анализ существующих алгоритмов обработки информации в помехозащищенных ККС по компенсации и подавлению пассивных помех // *Научно-техн. отчет о составной части НДР, шифр «Завадозахист – ХАРКОС»*. – Х.: «НИИЦ ХАРКОС», 2004. – 74 с.

Поступила в редколлегию 3.06.2009

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. Г.В. Худов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ ПОХИБКИ БАГАТОПРОМІНЕВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СИГНАЛІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ GPS/GLONASS

В.М. Дейнеко

Запропоновано метод оцінки похибки багатопроміневості розповсюдження сигналів супутникових радіонавігаційних систем GPS/GLONASS. Робота методу, який пропонується базується на вимірах навігаційних сигналів двома антенами, які розташовуються на невеликих базових відстанях. Отримано аналітичний вираз, який визначає різницю фаз прийнятих сигналів на двох антенах, який обумовлений похибкою багатопроміневості. Запропонований метод може бути використаний для оцінки фази відбитого сигналу у конструктивному блоці близько розташованих антен.

Ключові слова: похибка багатопроміневості, антена, фаза сигналу, відбитий сигнал.

DEVELOPMENT OF METHOD OF ESTIMATION OF ERROR MULTIPATH DISTRIBUTION OF SIGNALS OF RADIO ENGINEERING SYSTEMS OF SATELLITE NAVIGATION GPS/GLONASS

V.M. Deineko

The method of estimation of error multipath distribution of signals of the satellite radio navigation systems of GPS/GLONASS is offered. Work of the offered method is based on measuring of navigation signals two aeriels, located on small base distance. Analytical expression, determining the difference of phases of signals of accepted by two aeriels, conditioned the error of multipath, is got. The got method can be utilized for the estimation of phase of the reflected signal in the structural block of the some located aeriels.

Keywords: error multipath, antenna, phase of signal, reflected signal.