

## УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА МНОГОЛУЧЕВОСТИ НА ТОЧНОСТЬ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ РЕЖЕКТОРНОГО ФИЛЬТРА

К. В. КОЗАДАЕВ<sup>1)</sup>, И. О. МИТРАХОВИЧ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

Отмечено, что настоящее исследование обусловлено расширением области применения глобальных спутниковых навигационных систем. Рассмотрен, в частности, алгоритм коррекции ошибки многолучевости для повышения качества навигационного решения. Показана значимость уменьшения влияния ошибки многолучевости на точность навигационного решения в современной спутниковой навигации. Большинство разработок в этой области в настоящее время представляют собой способы борьбы с многолучевостью, реализованные в аппаратной части приемника. Проведено моделирование ошибки многолучевости на основе адаптивного режекторного фильтра второго порядка. Полученные результаты применимы для решения ряда проблем, связанных с ошибками многолучевости в системах глобального позиционирования.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы; многолучевость навигационного сигнала; режекторный фильтр.

## NOTCH FILTER REDUCING THE MULTIPATH EFFECTS INFLUENCE ON THE SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS ACCURACY

K. V. KOZADAEV<sup>a</sup>, I. O. MITRAKHOVICH<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

This research is connected with the expansion of global satellite navigation systems application. In particular, the multipath error correction algorithm to improve the navigation solution quality is considered. The problem multipath effect errors reducing on the navigation solutions accuracy is one of the most pressing problems in modern satellite navigation. Most of the developments in this field currently are ways of dealing which realized in the receiver hardware. In this work the multipath error modeling is based on an adaptive second-order notch filter. The results obtained can be applied for solving a number of problems connected with multipath errors in global positioning systems.

**Key words:** global navigation satellite systems; navigation signal multipath; notch filter.

### Образец цитирования:

Козадаев К. В., Митрахович И. О. Уменьшение влияния эффекта многолучевости на точность спутниковых навигационных систем с помощью режекторного фильтра // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2016. № 3. С. 84–89.

### For citation:

Kozadaev K. V., Mitrakhovich I. O. Notch filter reducing the multipath effects influence on the satellite navigation systems accuracy. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 3. P. 84–89 (in Russ.).

### Авторы:

**Константин Владимирович Козадаев** – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий кафедрой интеллектуальных систем факультета радиофизики и компьютерных технологий.

**Илья Олегович Митрахович** – аспирант кафедры интеллектуальных систем факультета радиофизики и компьютерных технологий. Научный руководитель – К. В. Козадаев.

### Authors:

**Konstantin Kozadaev**, PhD (physics and mathematics), docent; head of the department of intelligent systems, faculty of radiophysics and computer technologies.

*kozadaeff@mail.ru*

**Ilya Mitrakhovich**, postgraduate student at the department of intelligent systems, faculty of radiophysics and computer technologies.

*immitrik@gmail.com*

В настоящее время глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) являются удобным общедоступным инструментом для определения пространственных координат и параметров движения мобильных объектов на поверхности Земли и в околоземном пространстве. Более того, ГНСС обеспечивают достаточно точную координацию времени для всех пользователей, что позволяет этим системам решать широчайший спектр практических задач – от точного земледелия до навигации военных объектов [1, с. 1].

В процессе определения собственного местоположения приемники ГНСС отслеживают сигналы спутниковой группировки и после соответствующих процедур обработки с определенной периодичностью оценивают дальность и ее приращение для каждого видимого навигационного спутника. Основными источниками погрешностей, искажающих формируемые оценки расстояния, являются ионосферная и тропосферная задержки, погрешности передающей аппаратуры спутников, погрешности оценки расчетной конфигурации спутников, аппаратные погрешности приемника и многолучевость распространения навигационного сигнала (что особенно существенно при навигации в условиях сложного рельефа местности) [2, с. 60]. Большинство перечисленных погрешностей могут быть компенсированы методами дифференциальной коррекции, основанной на приеме уточняющих навигационное решение поправок от специализированных стационарных передающих пунктов. Ошибка задержки сигнала в ионосфере может быть компенсирована при проведении навигационных измерений на нескольких (как минимум двух) частотах [3, с. 169]. Установлено, что именно многолучевая погрешность – главный источник ошибок в высокоточной навигации [2, с. 60]. Ее вклад особенно значим для дальномерных (так называемых кодовых) измерений, когда погрешности определения опорных расстояний достигают величин в десятки метров.

Погрешности, связанные с многолучевостью, появляются вследствие отражения навигационного радиосигнала от различных поверхностей при его прохождении от спутника к приемнику, схема проявления эффекта многолучевости при приеме спутниковых сигналов приведена на рис. 1. При этом паразитные отраженные сигналы деформируют корреляционный пик при дешифровке полезного сигнала и искажают изначально симметричную корреляционную характеристику приемника [2, с. 61]. Это приводит к возникновению погрешностей как в измерениях текущей фазы спутникового навигационного сигнала (фазовые измерения), так и в оценке расстояния до спутника (кодовые измерения). Погрешности, обусловленные многолучевостью навигационных сигналов, присущи и стационарным, и мобильным объектам. При этом для мобильных приемников путь навигационного сигнала и отражающая геометрия изменяются во времени, поэтому период корреляции погрешностей многолучевости для мобильных потребителей значительно меньше, чем для стационарных.

И в стационарном, и в мобильном режимах приема навигационных сигналов неизвестные характеристики прямых и отраженных сигналов делают прогнозирование погрешностей многолучевости весьма сложной задачей, так как параметры ошибки во многом определяются конфигурацией отражающих поверхностей. При этом погрешность дальномерных измерений, обусловленная многолучевостью навигационных сигналов, в зависимости от типа и параметров принимающих антенн, может трансформироваться в ошибку оценки дальности до спутника около сотни метров, в то время как из-за погрешности определения фазы несущей спутникового сигнала обычно ошибка определения расстояния составляет несколько сантиметров [1, с. 283].

В настоящее время разработано и реализовано несколько методов оценки и последующей компенсации погрешностей, обусловленных многолучевостью распространения спутниковых навигационных сигналов. Существующие методы могут быть условно разделены на три основные категории в соответствии с этапами обработки сигналов [1, с. 293]. Методы первой категории действуют на стадии приема спутникового сигнала и обуславливают использование антенн с кольцевыми компенсаторами (*choke-ring*) и с определенной формой диаграммы направленности для пространственной селекции принимаемых радиосигналов. Вторая категория методов предполагает применение технологии специальной первичной обработки спутниковых сигналов – узкого коррелятора, коррелятора «удвоенной дельты», опережающих и запаздывающих уклонений. Третья категория методов дополнительно

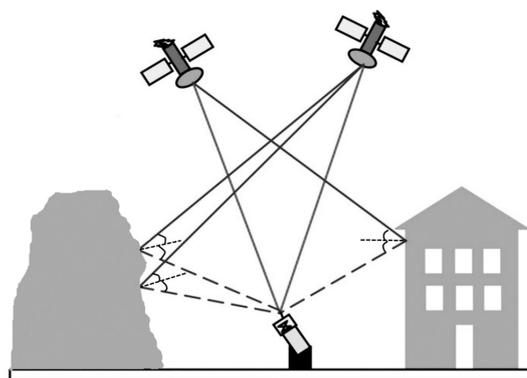


Рис. 1. Схема проявления эффекта многолучевости при приеме спутниковых сигналов:

— прямые сигналы; - - - отраженные сигналы

использует процедуру обработки предшествующих навигационных измерений для коррекции последующих (рекурсивность), отслеживая требуемое соотношение «сигнал – шум» (SNR) измерений, прогнозируя погрешность многолучевости путем ее моделирования и используя мультиплексные антенны для общего снижения влияния эффекта многолучевости [3, с. 547]. При этом большинство методов третьей категории не учитывают данные фазовых измерений. Цель настоящей работы – изучение возможности компенсации ошибок дальномерных измерений, которые обусловлены многолучевостью распространения сигналов ГНСС, с помощью данных, формируемых в режиме фазовых измерений. Программная реализация и все численные эксперименты проводились в среде компьютерной математики *Matlab*.

### Моделирование ошибки многолучевости

Местоположение объекта, как правило, оценивается на основе данных псевдодальности и фазового расстояния.

В идеальном случае дальномерное измерение подразумевает оценку расстояния ( $\rho_r^s$ ) от антенны приемника до спутниковой антенны и предполагает абсолютную синхронизацию процессов передачи и приема кодовой псевдослучайной последовательности (ПСП). Поэтому в теории оценка такого расстояния может быть представлена как произведение скорости распространения радиосигнала (скорость света –  $c$ ) и временного интервала между моментом приема сигнала ( $\bar{t}_r$ ) и моментом его отправки в системе времени часов спутника ( $\bar{t}^s$ ). Однако на практике под дальномерными измерениями понимают так называемую псевдодальность  $P$ , которая включает в себя реальное расстояние между спутником и приемником ( $\rho_r^s$ ), а также смещение часов спутника ( $dT^s$ ) и приемника ( $dt_r$ ), ионосферную ( $I_{r,i}^s$ ) и тропосферную ( $T_r^s$ ) задержки, ошибку многолучевости ( $M_p$ ) по коду и ошибку измерений ( $\epsilon_p$ ) [4, с. 138]:

$$P_{r,i}^s = \rho_r^s + c \left( dt_r(\bar{t}_r) - dT^s(\bar{t}^s) \right) + I_{r,i}^s + T_r^s + M_p + \epsilon_p. \quad (1)$$

Измерение по фазе (фазовое расстояние) ( $\Phi_{r,i}^s$ ) определяется как фаза несущей навигационного сигнала, умноженная на длину волны несущей ( $\lambda_i$ ), которая, в свою очередь, может быть выражена через смещения фазы несущей (фазовых неопределенностей) ( $B_{r,i}^s$ ) и упоминавшиеся выше тропосферные, ионосферные задержки, ошибку многолучевости по фазе и ошибку измерений. Также нужно учесть возможные смещения и вариации фазового центра антенны (в зависимости от высоты антенны и ее ориентации) ( $d\Phi_{r,i}^s$ ). Таким образом, модель фазового расстояния примет следующий вид:

$$\Phi_{r,i}^s = \rho_r^s + \tilde{n} \left( dt_r(\bar{t}_r) - dT^s(\bar{t}^s) \right) - I_{r,i}^s + T_r^s + d\Phi_{r,i}^s + \lambda_i B_{r,i}^s + M_\Phi + \epsilon_\Phi. \quad (2)$$

Если построить разность кодовых и фазовых измерений для одной и той же конфигурации спутника и приемника, то получим следующее равенство:

$$P_{r,i}^s - \Phi_{r,i}^s = 2I_{r,i}^s - \lambda_i B_{r,i}^s + M_p + M_\Phi + \epsilon_p + \epsilon_\Phi. \quad (3)$$

Разбирая равенство (3), учитываем, что ионосферная компонента погрешности квазипостоянна и может приниматься за константу [3, с. 489], равно как и фазовая неопределенность ( $\lambda_i B_{r,i}^s$ ) [4, с. 176]. Вклад фазовой неопределенности в ошибку, обусловленную многолучевостью распространения сигнала, есть величина второго порядка малости по сравнению с величиной ошибки многолучевости по коду, значит, ею можно пренебречь. Следовательно, в равенство (3), кроме констант, входят лишь ошибки измерений по коду и фазе (которые могут быть представлены в виде «белого» шума) и ошибка, обусловленная многолучевостью при приеме спутниковых сигналов. В [3, с. 549] приводятся данные о квазипериодичности ошибки многолучевости, что позволяет ее моделировать, используя соотношения для адаптивного режекторного фильтра, поскольку именно этот тип фильтра позволяет детектировать во входном потоке данных требуемую частоту. В целях построения модели квазипериодической ошибки был выбран фильтр второго порядка, так как фильтры более высоких порядков подразумевают наличие в сигнале нескольких гармоник. Таким образом, для построения модели многолучевости использовался адаптивный режекторный фильтр второго порядка с передаточной функцией вида

$$H(z) = \frac{1 - 2\cos(\theta)z^{(-1)} + z^{(-2)}}{1 - 2r\cos(\theta)z^{(-1)} + r^2z^{(-2)}}. \quad (4)$$

В данном случае передаточная функция имеет один адаптивный параметр  $\theta$  (искомая частота). Если параметр подстройки  $r$  стремится к 1, то полоса пропускания фильтра может быть представлена в виде  $2(1-r)$  радиан [5, с. 315], что позволяет параметру фильтра  $\theta$  стремиться к искомой частоте. Таким

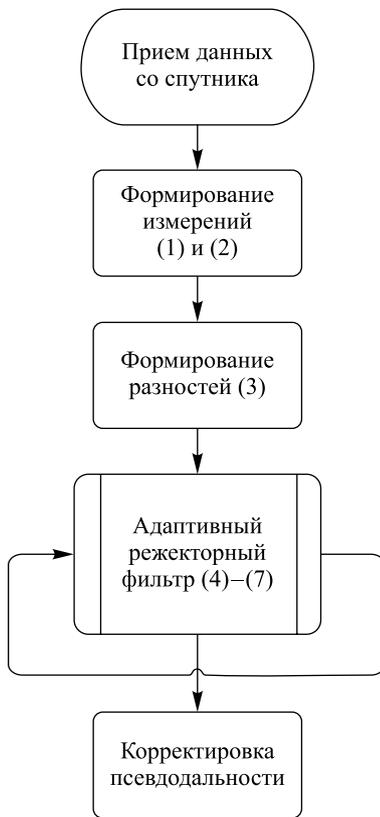


Рис. 2. Блок-схема алгоритма моделирования многолучевости

образом,  $r$  должен удовлетворять условию  $0 < r < 1$  для обеспечения необходимой полосы пропускания фильтра [5, с. 315]. Тогда результат фильтрации  $y[n]$  (для входной последовательности  $x[n]$ ) можно описать как

$$y(n) = x(n) - 2 \cos[\theta(n)]x(n-1) + x(n-2) + 2r \cos[\theta(n)]y(n-1) - r^2y(n-2). \quad (5)$$

Для уменьшения влияния ошибки  $E[y(n)^2]$  применяется метод наименьших квадратов:

$$\theta(n+1) = \theta(n) - 2\mu y(n)\beta(n), \quad (6)$$

где  $\mu$  – параметр сходимости фильтра; функция градиента  $\beta(n)$  представима в виде

$$\beta(n) = 2 \sin[\theta(n)]x(n-1) - 2r \sin[\theta(n)]y(n-1) + 2r \cos[\theta(n)]\beta(n-1) - r^2\beta(n-2). \quad (7)$$

Схема предлагаемого алгоритма коррекции ошибки многолучевости приведена на рис. 2.

Так, после приема данных со спутника формируются дальномерные кодовые и фазовые измерения (1), (2). Далее, происходит их вычитание и переход полученной разности на вход режекторного фильтра, где вычисляется частота ошибки многолучевости ( $\theta$ ) в текущий момент времени. На основании полученных данных осуществляется корректировка дальномерных измерений по коду. Построив корректную модель ошибки многолучевости, можно в городских условиях снизить влияние ошибки многолучевости в дальномерных кодовых измерениях до уровня единиц метров [1, с. 291].

### Результаты моделирования

Предложенный способ моделирования ошибки многолучевости проверялся как на модельных входных данных, так и на реальных спутниковых сигналах. В качестве модельной последовательности входных данных (для определения скорости адаптации режекторного фильтра) использовалась комбинация сигналов с изменяющейся частотой, амплитудой и фазой. Так, первые 700 отсчетов (первый участок) представляют собой гармоническую функцию (синус) с амплитудой 5 и частотой 90 Гц, а с 701 по 1500 отсчет (второй участок) – функцию синус с амплитудой 19, частотой 90 Гц и сдвигом фазы  $\pi/2$ , дополнительно сигнал был усложнен добавлением белого шума с дисперсией 1 (рис. 3).

Среднеквадратичное отклонение (СКО) на первом участке кривой составило 0,9 м (при амплитуде 5 м), а на втором – 0,78 м (при амплитуде 19 м). Как видно из рис. 3, СКО на первом участке выше, чем на втором, за счет времени сходимости фильтра, которое не превышает полупериода (после схождения фильтра СКО составляет 0,56 м). Таким образом, предлагаемый способ моделирования позволяет надежно выделить за приемлемое время квазипериодическую компоненту во входном потоке данных.

Предложенный метод испытывался на реальных данных, которые представляют собой разницу кодовых и фазовых измерений для 17-го спутника системы GPS, выполненных в условиях плотной городской застройки при ясной и солнечной погоде. Постоянные компоненты разности были отфильтрованы с помощью метода скользящего среднего (рис. 4).

При использовании реальных данных СКО ошибки составило 3,12 м, при СКО многолучевости – 10,5 м (после стабилизации фильтра значение СКО не превышает 1 м). Таким образом, можно заключить, что предложенный метод может детектировать квазипериодичность сигнала в поступающих данных. При использовании этого способа моделирования ошибки многолучевости продемонстрированы результаты, уменьшающие влияние СКО ошибки до уровня 15 % амплитуды входящей квазигармонической составляющей.

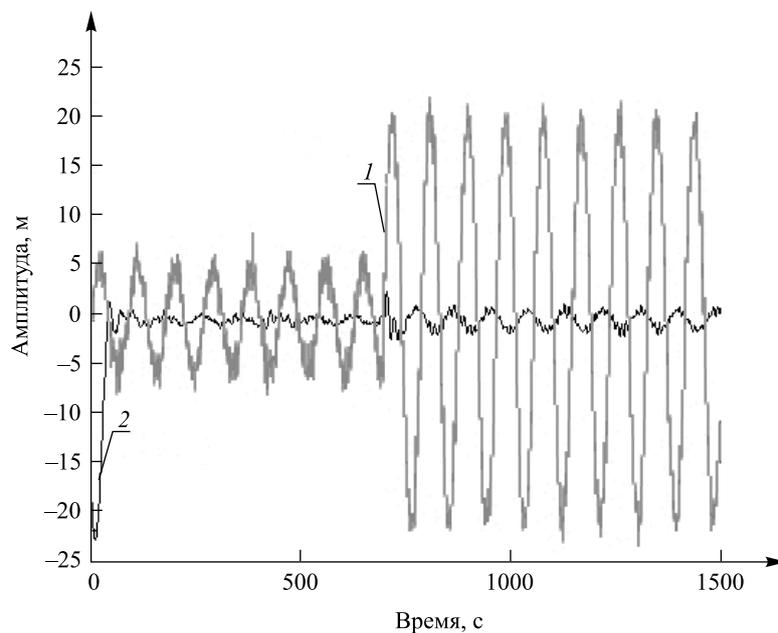


Рис. 3. Ошибка на выходе режекторного фильтра:  
1 – исходный квазигармонический сигнал, описанный выше;  
2 – оценка ошибки на выходе режекторного фильтра

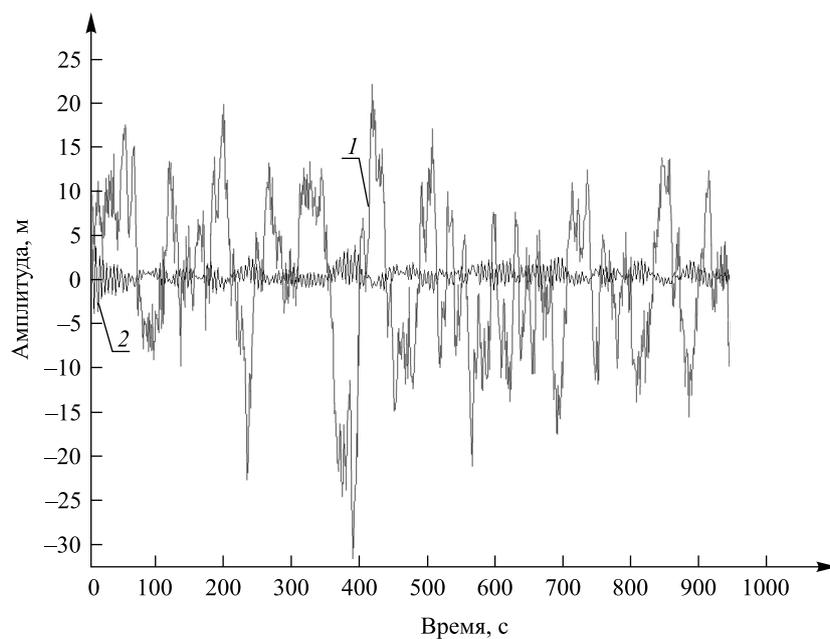


Рис. 4. Ошибка на выходе режекторного фильтра:  
1 – входные разности кодовых и фазовых измерений, отфильтрованные методом скользящего среднего;  
2 – оценка ошибки на выходе режекторного фильтра

Предложенный способ моделирования ошибки многолучевости может успешно использоваться в приемниках спутниковых сигналов для уменьшения влияния ошибки многолучевости на качество навигационного решения без использования сложных в реализации аппаратных методов борьбы. Проведенные испытания на моделированных и реальных данных показали, что в результате коррекции СКО ошибки многолучевости составляет не более 15 % от амплитуды входных погрешности, а после более тонкой подстройки параметров фильтра этот показатель снижается до 5–7 %. Таким образом, в результате применения разработанного метода влияние ошибки многолучевости, которое может достигать сотен метров, можно уменьшить на 1–2 порядка.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (*REFERENCES*)

1. Kaplan E. D., Christopher J. H. Understanding GPS. Principles and application. 2<sup>nd</sup> ed. Norwood, 2006.
2. Михайлов С. Влияние многолучевости распространения радиоволн от навигационного космического аппарата на точность определения координат GPS-приемником // Беспроводные технологии. 2006. № 2. С. 60–71 [Mikhailov S. Radiowave from the navigation satellite propagation multipath influence on the accuracy of determining the coordinates by GPS-receiver. *Wirel. Technol.* 2006. No. 2. P. 60–71 (in Russ.)].
3. Global Positioning System: Theory and Application / ed. by B. W. Parkinson. Washington, 1996. Vol. 1.
4. Takasu T. RTKLib ver. 2.4.2 Manual. Tokyo, 2013.
5. Adaptive Filtering / ed. by L. Garcia. 2011.

Статья поступила в редколлегию 18.04.2016.  
Received by editorial board 18.04.2016.