

# РАДИОЕЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

# РАДИОЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

# RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК : 621.396 + 629.7

Козадаев К. В.<sup>1</sup>, Козлова Е. И.<sup>2</sup>, Митрахович И. О.<sup>3</sup>, Киреева Е. И.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Заведующий кафедрой интеллектуальных систем, факультета радиофизики и компьютерных технологий,  
Белорусского Государственного Университета, кандидат ф-м наук, доцент, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Доцент кафедры интеллектуальных систем, факультета радиофизики и компьютерных технологий, Белорусского  
Государственного Университета, кандидат ф-м наук, доцент, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Аспирант кафедры интеллектуальных систем, факультета радиофизики и компьютерных технологий, Белорусского  
Государственного Университета, магистр ф-м наук, Минск, Беларусь

<sup>4</sup>Бакалавр, выпускница кафедры интеллектуальных систем, факультета радиофизики и компьютерных технологий,  
Белорусского Государственного Университета. Минск, Беларусь

## КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ МНОГОЛУЧЕВОСТИ В ПОКАЗАНИЯХ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИХ СИГНАЛОВ

**Актуальность.** Настоящее исследование направлено на повышение точности спутниковых навигационных систем за счет коррекции ошибки многолучевости при распространении спутникового радиосигнала. Задача уменьшения влияния эффекта многолучевости на точность навигационного решения – одна из актуальных проблем в современном спутниковом позиционировании, поскольку погрешность, вносимая переотражением спутниковых сигналов, может достигать десятков метров, что значительно затрудняет задачу построения точного навигационного решения в условиях сложного рельефа (например, в условиях плотной городской застройки), а также при использовании технологий спутниковой навигации в проектировании и строительстве.

**Цель.** Основной целью является уменьшение погрешности, вносимой ошибкой многолучевости, (минимум на один порядок), что позволит значительно увеличить точность решения навигационной задачи.

**Метод.** Рассматривается метод коррекции ошибки многолучевости с помощью вейвлет-преобразования поступающих дальномерных измерений – разновидность программного метода борьбы с погрешностями навигационного решения.

**Результаты.** Эффективность предлагаемого метода продемонстрирована как на смоделированном сигнале, так и на реальных данных спутниковой навигации. Программная реализация алгоритма коррекции и численные эксперименты реализованы средствами программного пакета MATLAB. Результаты показали эффективность применения данного метода коррекции многолучевости и подтвердили ожидаемую точность измерений после их обработки предложенным способом

**Выводы.** Исходя из результатов, полученных в работе, можно заключить, что использование предлагаемого алгоритма вейвлет-преобразования повышает качество исходных данных, используемых для получения навигационного решения, в итоге повышая его точность.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, многолучевость навигационного сигнала, вейвлет-преобразование, точное позиционирование.

### НОМЕНКЛАТУРА

ВП – вейвлет-преобразование;  
ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система;  
ПСП – псевдослучайная последовательность;  
ПФ – преобразование Фурье;  
СКО – среднеквадратичное отклонение;  
 $a$  – масштабный параметр (ширина функции);  
 $B_{r,i}^S$  – смещение фазы несущей (фазовая неопределенность);

$b$  – параметр сдвига во времени (позиция функции);  
 $c$  – скорость распространения сигнала (скорость света);  
 $dT^S$  – смещение часов спутника;  
 $dt_r$  – смещение часов приемника);  
 $d\Phi_{r,i}^S$  – смещения и вариации фазового центра антенны (в зависимости от высоты антенны и ее ориентации);  
 $I_{r,i}^S$  – ионосферная задержка;

$M_P$  – ошибка многолучевости по кодовым измерениям;

$M_\Phi$  – ошибка многолучевости по фазе;

$P$  – псевдодальность;

$T_r^S$  – тропосферная задержка;

$\bar{t}_r$  – момент получения сигнала приемником;

$\bar{t}^S$  – момент отправки сигнала спутником;

$\rho_r^S$  – реальная дальность между спутником и приемником;

$\varepsilon_p$  – вычислительная ошибка по кодовым измерениям;

$\varepsilon_\phi$  – ошибка вычислений по фазе;

$\lambda_i$  – длина волны несущей;

$\Phi_{r,i}^S$  – фазовое расстояние;

$\psi(t)$  – порождающая (базисная) функция.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ГНСС являются удобным общедоступным инструментом для определения пространственных координат и параметров движения мобильных объектов на поверхности Земли и в околоземном пространстве [1]. Основными источниками погрешностей, искажающих навигационное решение, 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). Большинство перечисленных погрешностей может быть компенсировано методами дифференциальной коррекции, основанной на приеме уточняющих навигационное решение поправок от специализированных стационарных передающих пунктов.

Погрешности, связанные с многолучевостью, появляются вследствие отражения навигационного радиосигнала от различных поверхностей при его распространении

от спутника к приемнику: схема проявления эффекта многолучевости при приеме спутниковых сигналов, приведена на рис. 1. Паразитные отраженные сигналы деформируют корреляционный пик при дешифровке полезного сигнала и искажают изначально симметричную корреляционную характеристику приемника. Это приводит к возникновению погрешностей, как в измерениях текущей фазы несущей частоты спутникового навигационного сигнала, так и в оценке расстояния до спутника. Как следствие, именно многолучевая погрешность – главный источник ошибок для высокоточной навигации в условиях сложного рельефа или плотной городской застройки [2].

Заранее неизвестные характеристики прямых и отраженных сигналов делают прогнозирование погрешностей многолучевости весьма сложной задачей, так как параметры ошибки во многом определяются постоянно меняющейся 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 пространственных координат вплоть до значений порядка сотни метров [1].

Большинство разработок в области коррекции ошибки многолучевости в настоящее время основаны на аппаратных методах подавления погрешности, например, она может компенсироваться с помощью узких диаграмм направленности принимающих антенн, пространственно селективирующих входные радиосигналы и не позволяющих переотраженному сигналу повлиять на навигационное решение. Однако такие методы, как правило, весьма трудно реализуемы в серийных навигационных приемниках низкого и среднего ценовых диапазонов. Альтернативным способом решения этой проблемы могут служить программные методы дополнительной цифровой фильтрации сигналов, хотя и несколько усложняющие их обработку, но при этом не требующие внесения конструктивных изменений в структуру навигационных приемников.

Таким образом, целью работы является уменьшение влияния переотраженного сигнала на качество навигационного решения путем постобработки полученного потока данных со спутника, что позволяет повысить точность позиционирования в условиях сложного рельефа.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается возможность компенсации ошибок дальномерных измерений, которые обусловлены многолучевостью распространения сигналов ГНСС, на основе вейвлет-преобразования данных, формируемых в режиме фазовых измерений на уровне алгоритмов их обработки. Предлагаемый метод в качестве входных данных использует разницу измерений по псевдодальности и фазовому расстоянию, для каждого из отслеживаемых спутников. Результатом работы алгоритма является оценка погрешности многолучевости (в метрах), корректирующая параметр псевдодальности. Таким образом, производится снижение паразитного вклада эффекта многолучевости в измерения, непосредственно участвующие в построении навигационного решения.

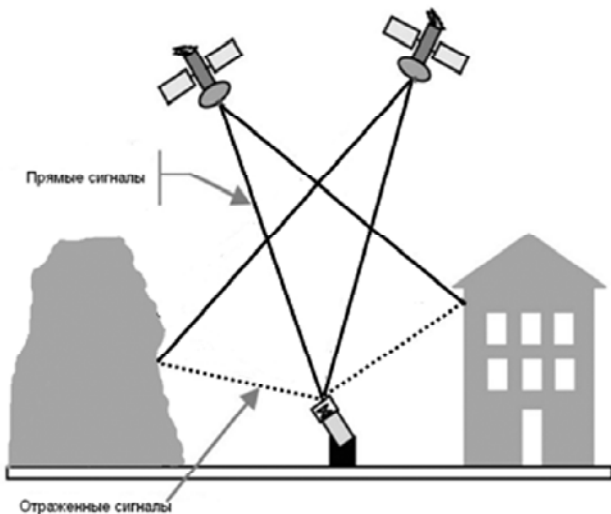


Рисунок 1 – Схема проявления эффекта многолучевости при приеме спутниковых сигналов

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время разработано и реализовано множество практических подходов к оценке и последующей компенсации погрешностей, обусловленных многолучевостью распространения спутниковых навигационных сигналов. Они могут быть условно разделены по трем основным категориям в соответствии с этапами обработки сигналов [1]. Первая категория, как уже было упомянуто, относится к стадии приема спутникового сигнала и подразумевает использование антенн с кольцевыми компенсаторами (choke-ring) и с определенной формой диаграммы направленности для пространственной селекции принимаемых радиосигналов. Вторая категория методов применяет технологии специальной первичной обработки спутниковых сигналов: узкого коррелятора, коррелятора «удвоенной дельты», опережающих и запаздывающих уклонений. Третья категория методов дополнительно учитывает результаты предшествующих навигационных измерений для коррекции последующих (рекурсивность), отслеживая требуемое отношение «сигнал-шум» (SNR) измерений, прогнозируя погрешность многолучевости путем ее моделирования и используя мультиплексные антенны для общего снижения влияния эффекта многолучевости [3]. При этом большинство методов третьей категории сложны в практической реализации и не учитывают накопление ошибки в фазовых измерениях, которые наряду с дальномерными измерениями используются в построении навигационного решения.

Наиболее близким к предлагаемому методу коррекции ошибки многолучевости является описанный в работе [4] способ обработки навигационных измерений, который основан на применении режекторного фильтра. Так, в идеальном случае дальномерное измерение подразумевает оценку расстояния от антенны приемника до спутниковой антенны и предполагает абсолютную синхронизацию процессов передачи и приема кодовой ПСП. Поэтому в теории, оценка такого расстояния может быть представлена как произведение скорости распространения радиосигнала и временного интервала между моментом приема сигнала и моментом его отправки в системе времени часов спутника. Однако, на практике под дальномерными измерениями понимают так называемую псевдодальность, которая включает в себя реальную дальность между спутником и приемником, а также ряд погрешностей (тропосферную и ионосферную задержку, ошибку многолучевости по кодовым измерениям, ошибку вычислений) [5]:

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

Измерение псевдодальности на основе определения фазового расстояния зависит от фазы несущей частоты навигационного сигнала и длины волны несущей. Последняя, в свою очередь, может быть выражена через смещение фазы несущей частоты (фазовых неопределенностей) и величину тропосферных, ионосферных задержек, ошибку многолучевости по фазе и ошибку вычислений. Следует также учесть возможные смещения и вариации фазового центра антенны (в зависимости от

высоты антенны и ее ориентации). Таким образом, модель псевдодальности на основе фазовых измерений (фазового расстояния), в общем виде, принимает следующий вид:

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

Построив разность величин псевдодальностей, полученных на основании кодовых и фазовых измерений для одной и той же конфигурации спутника и приемника, получим равенство в котором участвуют только погрешности (пренебрегая  $\Phi_{r,i}^s$  вследствие его малости):

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

Здесь следует учесть, что ионосферная компонента погрешности  $I_{r,i}^s$  пренебрежимо мало изменяется от измерения к измерению, и в данном случае может быть принята за константу [3], это же можно сказать и о фазовой неопределенности  $B_{r,i}^s$  [5], что показывает ее разрешение в работе [6]. Вклад фазовой неопределенности  $M_\phi$ , есть величина второго порядка малости по сравнению с величиной ошибки многолучевости по кодовым измерениям  $M_p$ , следовательно, ей можно пренебречь. Таким образом, кроме констант в правую часть равенства (3) входят лишь вычислительные ошибки измерений по коду и фазе  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_\phi$  (которые могут быть представлены в виде «белого» шума) и ошибка, обусловленная многолучевостью по кодовым измерениям  $M_p$ .

В силу своей природы ошибка многолучевости обладает свойством квазипериодичности, поскольку фактически это результат приема «истинного» сигнала совместно с его отраженной копией, которые по определению являются синхронизированными. Это упрощает поиск, моделирование и последующую коррекцию ошибки многолучевости. Таким образом, основной задачей предлагаемого подхода является разделение стохастических ошибок, связанных с процессом распространения радиосигнала, и квазипериодической погрешности, обусловленной его переотражением. Такую процедуру можно проводить, используя вейвлет-преобразования сигналов, что позволяет детектировать во входном разностном потоке данных паразитную квазипериодичность, проводя четкую границу между погрешностью многолучевости и стохастическим шумом, который описывают оставшиеся в (3) слагаемые.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В цифровой обработке сигналов широко применяют разновидность z-преобразования: Фурье, Хартли, Уолша и т.д., использующие различные виды полиномиального разложения всей исходной последовательности отсчетов сигнала. Они позволяют анализировать спектры мощности оцифрованного сигнала, а также оценивать передаточные функции и импульсные отклики операций его преобразования [7]. Однако в ряде случаев для исследования тонкой структуры сигнала удобно исполь-

зовать операции преобразования, для которых соответствующие коэффициенты разложения учитывают поведение сигнала лишь в узком диапазоне близкорасположенных точек. Применение такого подхода, по сути, означает переход от частотного анализа цифровых сигналов к частотно-масштабному. Примером такой процедуры может служить оконное преобразование Фурье, основным недостатком которого является невозможность обеспечить высокое разрешение анализа одновременно и по частоте, и по времени. Преодолеть это ограничение позволяет вейвлет-преобразование, использующее в качестве базисных функций разложения различные семейства локальных по спектру и времени функций, каждая из которых получается из одной порождающей (своей для каждого семейства) посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени:

$$\Psi_{ab}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (4)$$

где  $a$  – масштабный параметр (ширина функции),  $b$  – параметр сдвига во времени (позиция функции),  $\Psi(t)$  – порождающая (базисная) функция. Семейства вейвлет-функций классифицируют по признаку пространственной компактности и гладкости (некоторые из них к тому же могут иметь фрактальную структуру) [8].

В работах по акустической теории формирования речи и цифровой обработке речевых сигналов [9–11] показано, что речевой сигнал (вокализованная речь) представляет собой квазипериодическую последовательность импульсов. Для обнаружения и выделения отдельных акустических форм (фонем) в речевых сигналах на фоне стохастического шума разработаны методы, основанные на применении оконного преобразования Фурье, например [11]. Более высокую эффективность при решении задачи шумоподавления в речевых сообщениях (квазипериодических сигналах) демонстрируют методы, основанные на использовании вейвлетных функций [12]. Проведенные авторами данной работы исследования по применению вейвлет-преобразований к решению задачи шумоподавления в речевых сообщениях [13] показали, что наиболее перспективными в этом случае являются вейвлетные функции Добеши, симлеты, а также дискретная вейвлет-функция Мейера. При применения вейвлетов Добеши наилучшие результаты получены для функций 4-го порядка, симлеты показали хорошие результаты при уровне декомпозиции, равном 8, вейвлет-функция Мейера использована в сочетании с мягким видом пороговых преобразований (т.н. трешолдинга). Эти функции обладают достаточной гладкостью, достаточно высоким быстродействием, чувствительны к изменениям фазы полезного сигнала. Предложенные вейвлетные функции с соответствующими критериями позволяют надежно выделять полезный квазипериодический сигнал на фоне шумов различной природы [13].

В настоящей работе стоит весьма схожая задача выделения квазипериодического сигнала (в данном случае паразитного) из стохастического шума в разностной схеме измерений (согласно соотношению (3)). Исходя из этого, логично оценить возможность применения апроби-

рованного аппарата вейвлет-преобразований для решения задачи выделения квазипериодической погрешности многолучевости на фоне случайных ошибок измерений. В данной работе применялись следующие виды вейвлет-преобразований.

Вейвлеты Добеши – один из самых известных и используемых во многих практических приложениях типов вейвлет-преобразования. Вейвлеты Добеши порядка  $N$  отличны от нуля лишь на интервале длиной  $2N-1$  и имеют  $2N$  отличных от нуля коэффициентов фильтров. При увеличении порядка вейвлета Добеши возрастает его «гладкость», что увеличивает спектр возможных применений [14]. Недостатком является большой объем вычислений при таком преобразовании, кроме того, вейвлеты Добеши не обладают симметричностью, что требует некоторой осторожности при интерпретации его результатов. Для построения вейвлета Добеши задается рекурсивное соотношение:

$$\begin{aligned} \psi(r) = & \frac{1+\sqrt{3}}{4} \varphi(2r-1) + \frac{3+\sqrt{3}}{4} \varphi(2r) - \\ & - \frac{3-\sqrt{3}}{4} \varphi(2r+1) + \frac{1-\sqrt{3}}{4} \varphi(2r+2), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi(r) = & \frac{1+\sqrt{3}}{4} \varphi(2r) + \frac{3+\sqrt{3}}{4} \varphi(2r-1) + \\ & + \frac{3-\sqrt{3}}{4} \varphi(2r-2) + \frac{1-\sqrt{3}}{4} \varphi(2r-3). \end{aligned} \quad (6)$$

Приближенные к симметричной форме вейвлеты Добеши называются симлетами, которые обладают всеми достоинствами вейвлетов Добеши, но при этом имеют на порядок меньший период адаптации к изменению фазы сигнала. Коэффициенты симлета рассчитываются аналогично коэффициентам фильтра Добеши [15].

Дискретный вейвлет Мейера относится к коротким вейвлетам, так как имеет более локализованную вейвлет-функцию и является значительно более гладким, чем вейвлет Добеши первого порядка (вейвлет Хаара), что, в свою очередь, обуславливает более высокое его быстродействие.

Вейвлет-функции Мейера определены в частотной области следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{\psi} &= (2\pi)^{-\frac{1}{2}} e^{i\omega} \sin\left(\frac{\pi}{2} \nu\left(\frac{3}{2\pi}|\omega|-1\right)\right), \frac{2\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{2\pi}{3} \\ \hat{\psi} &= (2\pi)^{-\frac{1}{2}} e^{i\omega} \sin\left(\frac{\pi}{2} \nu\left(\frac{3}{2\pi}|\omega|-1\right)\right), \frac{4\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{8\pi}{3} \\ \hat{\psi}(\omega) &= 0, \omega \in \left[\frac{2\pi}{3}, \frac{8\pi}{3}\right]. \end{aligned} \quad (7)$$

В данной работе применяются следующие критерии для перечисленных выше видов вейвлет преобразований:  
– минимаксный критерий с мягким видом трешолдинга, позволяющим использовать порог, пересчитыва-

емый для каждого из уровней разложения данных, вейвлет-функцией Добеши 4-го порядка;

– универсальный критерий Донохо-Джонстона с жестким видом трешолдинга, позволяющим использовать порог, единый для всех уровней разложения, симлетом восьмого порядка;

– критерий несмещенной оценки риска Штайна с мягким видом трешолдинга, позволяющим использовать порог, пересчитанный только для первого уровня разложения данных, вейвлет-функцией Добеши 4-го порядка;

– модифицированный критерий Штайна с мягким видом трешолдинга, позволяющим использовать порог, единый для всех уровней разложения, дискретной вейвлет-функцией Мейера.

#### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенный способ моделирования ошибки многолучевости проверялся как на модельных входных данных, так и на реальных спутниковых сигналах.

В качестве модельной последовательности входных данных использовалась комбинация сигналов с изменяющейся частотой, амплитудой и фазой. Так, первые 500 отсчетов представляют собой гармоническую функцию (синус) с амплитудой 5 и частотой 90Гц, с 501 по 1800 отсчет – функцию синус с амплитудой 7 частотой 120 Гц, а с 1801 по 2300 отсчет – функцию синус с амплитудой 19 частотой 120 Гц и сдвигом фазы  $\pi/2$ , дополнительно сигнал был усложнен добавлением белого шума с дисперсией 1м. Подобная схема сигнала была использована в работе [4], для оценки скорости адаптации предлагаемого метода к смене параметров квазипериодичности в анализируемом потоке данных.

Кривая «1» на рис. 2 – исходный квазигармонический сигнал, описанный выше, кривая «2» – результат коррекции ошибки на выходе ВП. Как видно, СКО не зависит от амплитуды входных данных, и составляет порядка 0,5 м

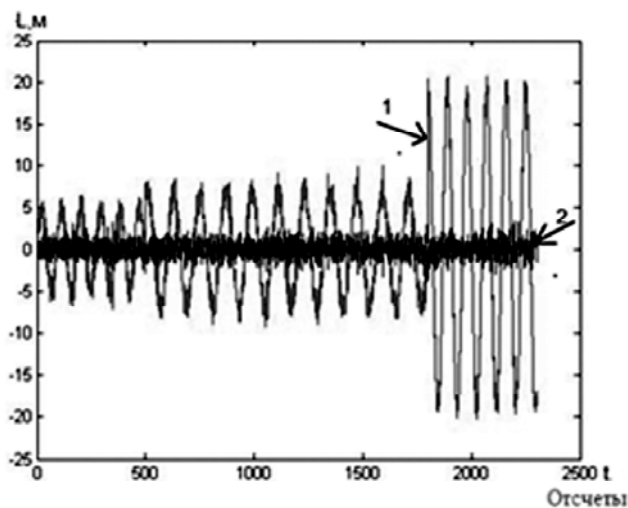


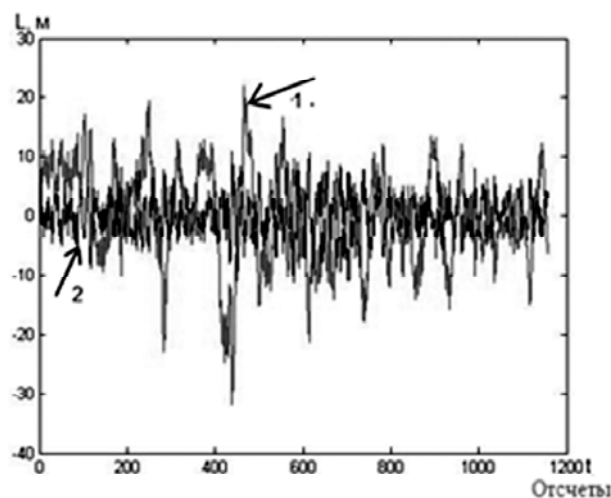
Рисунок 2 – Ошибка на выходе вейвлет-преобразования (вейвлет Мейера)

(табл. 1) для любого из рассматриваемых вейвлет-преобразований, что позволяет уменьшить влияние ошибки многолучевости вне зависимости от ее амплитуды.

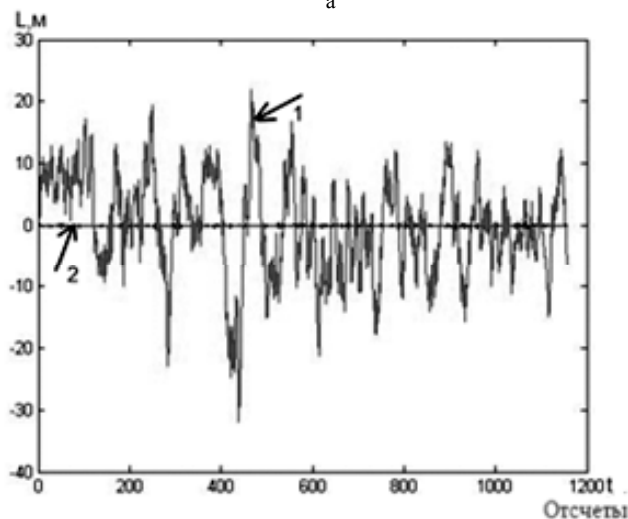
Далее, предложенный метод испытывался на реальных данных, которые собой представляют выборку разницы кодовых и фазовых измерений для одного из спутников системы GPS, снятые в условиях плотной городской застройки, при ясной и солнечной погоде.

Кривая «1» на рис. 3 обозначает входные разности кодовых и фазовых измерений, отфильтрованные методом скользящего среднего, кривая «2», является результатом коррекции на выходе процедуры фильтрации. Зависимость СКО ошибки от типа вейвлет-преобразования приведена в табл. 2.

Таким образом, можно заключить, что предложенный метод может достаточно эффективно детектировать



а



б

Рисунок 3 – Ошибка на выходе вейвлет-преобразования: а – минимаксный критерий, вейвлет Добеши 4го порядка; б – вейвлет Мейера

Таблица 1 – Зависимость СКО от типа используемого вейвлет-преобразования

| Тип вейвлета | Минимаксный критерий, вейвлет Добеши | Критерий Штайна, вейвлет Добеши | Симлет | Вейвлет Мейера |
|--------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------|----------------|
| СКО          | 0,51 м                               | 0,53 м                          | 0,58 м | 0,48 м         |

Таблиця 2 – Зависимость СКО от типа используемого вейвлет-преобразования

| Тип вейвлета | Минимаксный критерий, вейвлет Добеши | Критерий Штайна, вейвлет Добеши | Симлет | Вейвлет Мейера |
|--------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------|----------------|
| СКО          | 3,51 м                               | 1,53 м                          | 1,58 м | 0,13 м         |

квазипериодичность сигнала в анализируемых данных. Наилучшие результаты показал вейвлет Мейера, в силу универсальности своей вейвлет-функции. Сравнение итогов работы предложенного метода коррекции и метода, приведенного в работе [4], показывает, что СКО ошибки при коррекции многолучевости с помощью адаптивного режекторного фильтра составило порядка 1м. Таким образом, использование вейвлет-функции Мейера оказывается более предпочтительным для решения поставленной задачи (в остальных случаях эффект коррекции соразмерен с [4]). Однако в данном случае следует также учитывать значительную вычислительную сложность вейвлет-преобразований по сравнению с адаптивным режекторным фильтром.

### ВЫВОДЫ

Предложенный метод детектирования и коррекции ошибки многолучевости может эффективно использоваться в приемниках спутниковых сигналов на этапе постобработки данных. Основным преимуществом предлагаемого подхода является уменьшение влияния ошибки многолучевости на качество навигационного решения в режиме реального времени без использования сложных в реализации аппаратных методов борьбы. Как показывают данные испытаний предлагаемого метода, можно снизить влияние ошибки многолучевости на погрешность оценки местоположения (изначально достигающей до сотни метров) до уровня единиц метров и ниже (соответствует подавлению амплитуды этого вида навигационной ошибки на 2 порядка), что позволяет существенно повысить точность позиционирования в условиях сложного рельефа.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность:

1. Юрьеву Константину Валерьевичу, начальнику сектора ООО «НТЛаб – Системы»;
2. Саковичу Роману Владимировичу, инженеру – программисту ООО «НТЛаб – Системы»;
3. За организационную, техническую и мотивационную поддержку.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaplan E. Understanding GPS. Principles and application. Second Edition / E. Kaplan, C. Hegarty – Norwood : ARTECH HOUSE,

Козадаев К. В.<sup>1</sup>, Козлова Е. И.<sup>2</sup>, Митрахович И. О.<sup>3</sup>, Киреева Е. I.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Завідувач кафедри інтелектуальних систем, факультету радіофізики та комп'ютерних технологій, Білоруського Державного Університету, кандидат ф-м наук, доцент, Мінськ, Білорусь

<sup>2</sup>Доцент кафедри інтелектуальних систем, факультету радіофізики та комп'ютерних технологій, Білоруського Державного Університету, кандидат ф-м наук, доцент, Мінськ, Білорусь

<sup>3</sup>Аспірант кафедри інтелектуальних систем, факультету радіофізики та комп'ютерних технологій, Білоруського Державного Університету, магістр ф-м наук, Мінськ, Білорусь

<sup>4</sup>Бакалавр, Випускниця кафедри інтелектуальних систем, факультету радіофізики та комп'ютерних технологій, Білоруського Державного Університету. Мінськ, Білорусь

### КОРЕКЦІЯ ПОХИБКИ БАГАТОПРОМЕНЕВИМИ У ПОКАЗАННЯХ СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ЇХ СИГНАЛІВ

**Актуальність.** Це дослідження спрямоване на підвищення точності супутникових навігаційних систем за рахунок корекції помилки багатопроменевості при поширенні супутникового радіосигналу. Завдання зменшення впливу ефекту багатопроменевості на точність

INC, 2006. – 723 p.

2. Михайлов С. В. Влияние многолучевости распространения радиоволн от навигационного космического аппарата на точность определения координат GPS-приемником / С. В. Михайлов // Беспроводные технологии. – 2006. – № 2. – С. 60–71.
3. Parkinson B. W. Global Positioning System: Theory and Application / B. W. Parkinson // Washington DC: American Institute of Aeronautics & Astronautics, Inc. – 1996. – Vol. I – 793 p.
4. Митрахович И. О. Уменьшение влияния эффекта многолучевости на точность спутниковых навигационных систем с помощью режекторного фильтра / И. О. Митрахович, К. В. Козадаев // Вестник БГУ. Серия 1. – 2016. – № 3. – С. 84–89
5. Takasu T. RTKLib ver 2.4.2 Manual / T. Takasu. – Tokyo : IPNT-J, 2013. – 183 p.
6. Chang X.-W. MLAMBDA: a modified LAMBDA method for integer least-squares estimation / X.-W. Chang, X. Yang, T. Zhou // J Geod. – 2005 – № 79. – P. 552–565. DOI. 10.1007/s00190-005-0004-x
7. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз. – М. : Радио и связь, 1985. – 440 с.
8. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
9. Fant G. Acoustic Theory of Speech Production / G. Fant. – Mouton, The Hague, 1970. – 328 p.
10. Flanagan J. L. Speech Analysis, Synthesis and Perception, 2<sup>nd</sup> Ed. / J. L. Flanagan. – Springer-Verlag, New York, 1972. – 428 p.
11. Рабинер Л. П. Цифровая обработка речевых сигналов / Рабинер Л. П., Р. В. Шафер ; пер. с англ. Под ред. М. В. Назарова и Ю. Н. Прохорова. – М. : Радио и связь, 1981. – 496 с., ил.
12. Московский С. Б. Очистка сигнала от шумов с использованием вейвлет-преобразования / С. Б. Московский, А. Н. Сергеев, Н. А. Лалина // Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. – 2015. – № 2 (15).
13. Козлова Е. И. Выделение полезного сигнала речевого сообщения на фоне случайных шумов с помощью вейвлет-преобразования / Е. И. Козлова, Е. И. Киреева, И. О. Митрахович // Электроника-инфо. – 2016. – № 10. – С. 52–55.
14. Berkner K. Multiscale Sharpening and Smoothing in Besov Spaces with Applications to Image Enhancement / K. Berkner, M. Gormish, E. L. Schwartz // Applied and Computational Harmonic Analysis.– 2001. – 11. – P. 2–31. DOI:10.1006/acha.2000.0339
15. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования : учеб. пособие / А. Н. Яковлев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

Статья поступила в редакцию 27.04.2017.

После доработки 20.09.2017.

навігаційного рішення – одна з актуальних проблем в сучасному супутниковому позиціонуванні, оскільки похибка, яку вносить перевідбиття супутникових сигналів, може досягати десятків метрів, що значно ускладнює завдання побудови точного навігаційного рішення в умовах складного рельєфу (наприклад, в умовах щільної міської забудови, а також при використанні технологій супутникової навігації в проєктуванні і будівництві).

**Мета.** Основною метою є зменшення похибки, що вноситься помилкою багатопроменевості, (мінімум на один порядок), що дозволить значно збільшити точність рішення навігаційного завдання.

**Метод.** Розглядається метод корекції помилки багатопроменевості за допомогою вейвлет-перетворення поступаючих дальномірних вимірювань – різновид програмного методу боротьби з похибками навігаційного рішення.

**Результати.** Ефективність запропонованого методу продемонстровано як на змодельованому сигналі, так і на реальних даних супутникової навігації. Програмна реалізація алгоритму корекції і чисельні експерименти реалізовані засобами програмного пакету MATLAB. Результати показали ефективність застосування даного методу корекції багатопроменевості і підтвердили очікувану точність вимірювань після їх обробки запропонованим способом.

**Висновки.** Виходячи з результатів, отриманих в роботі, можна зробити висновок, що використання запропонованого алгоритму вейвлет-перетворення підвищує якість вихідних даних, що використовуються для отримання навігаційного рішення, в результаті підвищуючи його точність.

**Ключові слова:** глобальні навігаційні супутникові системи, багатопроменевість навігаційного сигналу, вейвлет-перетворення, точне позиціонування.

Kozadaev K. V.<sup>1</sup>, Kozlova E. I.<sup>2</sup>, Mitrakhovich I. A.<sup>3</sup>, Kireyeva K. I.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Head of Intelligent systems department at Radiophysics and Computer Technologies Faculty. Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Ph.D. Docent of Intelligent systems department at Radiophysics and Computer Technologies Faculty. Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>M. Sc, Postgraduate student of Intelligent systems department at Radiophysics and Computer Technologies Faculty. Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>4</sup>B. Sc., alumnus of intelligent systems department at Radiophysics and Computer Technologies Faculty. Belarusian State University, Minsk, Belarus

#### THE MULTIPATH ERRORS CORRECTION IN THE TESTIMONY OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS BASED ON THEIR SIGNALS WAVELET TRANSFORMS

**Context.** This research aims to improve the satellite navigation systems accuracy due to the correction of satellite signals multipath propagation errors. The multipath effect errors reducing problem on the navigation solutions accuracy is one of the most pressing problems in modern satellite navigation, because the error introduced by the satellite signals reflections can be up to tens of meters, which greatly complicates the precise positioning task in difficult terrain. For example, in dense urban development conditions, with using satellite navigation technologies in design and construction.

**Objective.** The main objective is to reduce multipath error signal at least one order, which will significantly increase the accuracy of the navigation task solution.

**Method.** When solving the relative positioning tasks, it is often difficult, basically from a financial point of view, to provide the entire receivers set with the same antennas using hardware methods. Including because of the effective use of funds, it was decided to consider the software methods. In this article, is considered a method for correcting the multipath error by using the wavelet transform of incoming navigation signals.

**Results.** The efficiency the proposed method is demonstrated on real satellite navigation data. Software implementation and all experiments are made by the computer mathematics package MATLAB. The results showed the multipath correction method efficiency and confirmed the expected accuracy after processing by the proposed technique.

**Conclusions.** Based on the results obtained in this paper, we can conclude that the use of wavelet transformation improves the measurements quality used to obtain a navigation solution, thereby increasing its accuracy, regardless of terrain.

**Keywords:** Global navigation satellite systems, Multipath of navigation signal, Wavelet-transformation, Precise positioning.

#### REFERENCES

1. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS. Principles and application. Second Edition. Norwood, ARTECH HOUSE, INC, 2006, 723 p.
2. Mikhailov S. V. Radiowave from the navigation satellite propagation multipath influence on the accuracy of determining the coordinates by GPS-receiver, *Wireless Technologies*, 2006, No. 2, P. 60–71.
3. Parkinson B. W. Global Positioning System: Theory and Application. Washington DC: American Institute of Aeronautics & Astronautics, Inc., 1996, Vol. I, 793 p.
4. Mitrakhovich I. A., Kozadaev K. V. Notch filter reducing the multipath effects influence on the satellite navigation systems accuracy, *Vestnik BSU. Serie 1*, 2016, No. 3, pp. 84–89
5. Takasu T. RTKLib ver 2.4.2 Manual. Tokyo, IPNT-J, 2013, 183 p.
6. Chang X.-W., Yang X., Zhou T. MLAMBDA: a modified LAMBDA method for integer least-squares estimation, *J Geod*, 2005, No. 79, pp. 552–565. DOI 10.1007/s00190-005-0004-x
7. Widrow B. S. Stearns Adaptive signal processing. Moscow, Radio and Communication, 1985, 440 p.
8. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Izhevsk, SRC “Regular and chaotic dynamics”, 2001, 464 p.
9. Fant G. Acoustic Theory of Speech Production, Mouton, The Hague, 1970, 328 p.
10. Flanagan J. L. Speech Analysis, Synthesis and Perception, 2<sup>nd</sup> Ed., Springer-Verlag, New York, 1972, 428 p.
11. Rabiner L. R., Shafer R. V. Transl. from Eng. Red by. M. V. Nazarova и Y. N. Prokhorova Speech signals digital processing. Moscow, Radio and Communication, 1981, 496 p.
12. Moskovsky S. B., Sergeev A. N., Lalina N. A. Signal purification from the noise using the wavelet transform, *Universum: Engineering: electronic scientific. Journal*, 2015, No. 2 (15).
13. Kozlova E. I., Kireyeva K. I., Mitrakhovich I. A. Voice message useful signal Isolation against a random noise influence using the wavelet transform, *Electronicka-Info*, 2016, No. 10, pp. 52–55
14. Berkner K., Gormish M., Schwartz E. L. Multiscale Sharpening and Smoothing in Besov Spaces with Applications to Image Enhancement, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2001, Vol. 11, pp. 2–31. DOI:10.1006/acha.2000.0339
15. Yakovlev A. N. Introduction to wavelet transforms: A textbook. Novosibirsk, Publishing House of the National Technical University, 2003, 104 p.