

УДК 621.391

**Исследование влияния ошибки многолучевости на точность
определения параметров сигналов ГНСС (глобальных
навигационных спутниковых систем) при помощи имитатора
навигационного поля**

Валайтите А.А.,* Никитин Д. П., Садовская Е.В.*****

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: alinavalaytite@gmail.com*

***e-mail: nikitindmitriy@mail.ru*

****e-mail: elena_93@list.ru*

Аннотация

Рассматривается возможность применения имитатора навигационного поля для проведения натурных экспериментов и оценки кодовой ошибки многолучевости в профессиональной навигационной аппаратуре потребителя. Также предложена методика постановки эксперимента, позволяющая оценивать кодовые ошибки многолучевости на производимых серийно навигационных приемниках. Произведен теоретический расчет огибающих ошибок многолучевости. Сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), ошибка многолучевости, стробовый метод, имитатор навигационного поля, GPS, псевдослучайная последовательность (ПСП).

Введение

В современном мире спутниковые радионавигационные системы являются неотъемлемой частью человеческой деятельности. С каждым годом увеличивается рынок потребления навигационной аппаратуры. Значительная часть транспорта, энергетики, связи, транспортировка нефти и газа, разведка месторождений и многие другие отрасли промышленности, вплоть до сельского хозяйства, используют приемники сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для определения координат, направления и скорости движения транспортных средств, синхронизации часов, организации контроля и управления различными объектами.

На сегодняшний день существуют и развиваются шесть спутниковых навигационных систем: GPS, GLONASS, GALILEO, IRNSS, «Бэйдоу», и QZSS. При этом четыре из них – российская система GLONASS, американская GPS, европейская GALILEO и китайская система «Бэйдоу» позиционируются как навигационные системы для глобального местоопределения. В свою очередь японская система QZSS и индийская система IRNSS, на начальном этапе развертывания, предназначаются для использования только в своих странах, поэтому являются спутниковыми навигационными системами (СНС). Находятся в эксплуатации только две средневысотные глобальные спутниковые системы, а именно: GPS и GLONASS. Сигналы данных навигационных спутниковых систем в

общем случае представляют собой смесь информационного сигнала, представляющего последовательность прямоугольных импульсов разной длительности, псевдослучайной последовательности (ПСП) и гармонического сигнала на частоте несущего колебания. В системах GPS и GLONASS применяются различные способы разделения сигналов: в GPS используется кодовое разделение сигналов, у системы ГЛОНАСС – частотное.

В связи с ростом сфер потребления навигационной аппаратуры, потребители накладывают определенные требования, одним из которых является требование к точности своего местоположения. Для удовлетворения запросов пользователей, существуют множество режимов работы спутниковых навигационных систем, обеспечивающих заявленные требования.

Принципиально своё местоположение потребитель определяет с помощью навигационной аппаратуры, которая принимает и обрабатывает радиосигналы, излучаемые навигационными космическими аппаратами (НКА) ГНСС. Эти данные позволяют вычислить координаты навигационных космических аппаратов (НКА) в геоцентрической декартовой системе координат (СК), связанной с центром Земли. ПСП используется для измерения задержки приходящего сигнала относительно местного опорного колебания. При этом НКА должны находиться в пределах прямой видимости потребителя. Если число видимых навигационным приемником НКА достаточно для решения навигационной задачи, то, обрабатывая измеренные псевдодальности (ПД), можно определить кодовые координаты потребителя и согласовать временные шкалы [1, 2, 3]. Одним из самых простых и основных

режимов функционирования навигационной аппаратуры потребителя (НАП) является абсолютный кодовый режим местоопределения («Stand Alone» в англоязычной литературе).

Источники погрешностей навигационных измерений

В зависимости от причины происхождения можно выделить три группы погрешностей:

1. погрешности, вносимые на НКА (ошибки навигационной системы);
2. погрешности при прохождении сигнала на трассе распространения сигнала от НКА до антенны приемной аппаратуры потребителя;
3. погрешности, вносимые приемной аппаратурой потребителя.

Ошибки системы связаны с ошибками бортовых часов НКА и несоответствием реальной траектории движения НКА и передаваемой пользователю информации о его движении. Несмотря на то, что в каждом НКА используется высокостабильный эталон местного времени, спутниковые часы содержат ошибки и отклоняются от значения системного эталона времени. Частично отклонения бортовых часов отслеживаются, их значения передаются в составе навигационных сообщений, и учитываются НАП при решении навигационной задачи. Системные ошибки также связаны с неточностью передаваемой информации о местоположении НКА. При формировании эфемеридной информации учитывается множество факторов, влияющих на изменение траектории орбит НКА, но заложенная на НКА модель не позволяет с абсолютной точностью определить текущее положение НКА, что вносит дополнительную ошибку при определении местоположения потребителя.

Наиболее существенный вклад в ошибку навигационных измерений вносят ошибки, связанные с распространением сигнала по трассе НКА - приемник. Существенный вклад в распространение сигнала вносит задержка в атмосфере Земли, а именно: в ионосферных и тропосферных ее слоях. Ионосфера Земли представляет собой слой заряженных частиц на высоте от 120 до 200 км. Эти частицы снижают скорость распространения сигнала и, следовательно, увеличивают его время прохождения от НКА до НАП, и соответственно вносится ошибка в оценку этого расстояния. Указанные задержки могут быть смоделированы для разного времени суток, усреднены и внесены в измерения, но не могут точно отобразить реальную ситуацию. После прохождения ионосферного слоя, навигационный сигнал попадает в тропосферный слой, в котором присутствуют водяные пары, также влияющие на скорость распространения сигнала. Ионосферная задержка частично (до 50%) компенсируется с помощью модели Клобучара, параметры которой передаются также в составе эфемерид [1, 2, 3]. Влияние тропосферы существенно меньше и исключается с помощью модели, которая обычно выбирается потребителем из множества заложенных в аппаратуру моделей, например, широко используются модели Саастомойнена или Хопфилда [2, 3]. Кроме того, для борьбы с задержками используют поправочную информацию. Корректирующие поправки передаются с помощью геостационарных спутников SBAS, что позволяет повысить точность местоопределения.

Ошибки, порождаемые возникновением переотраженных сигналов, также относятся к категории ошибок, связанных с распространением навигационного

сигнала. Такие ошибки возникают из-за переотражения навигационного сигнала от близкорасположенных объектов – зданий, металлических конструкций, деревьев и т.п. [4, 5, 6]. В результате этого эффекта время распространения отраженных сигналов превышает время распространения «прямого» сигнала. Различают «быструю» и «медленную» многолучевость. Быстрая многолучевость связана с быстрым изменением фазы отражённого сигнала и возникает при резком изменении расстояния от отражающей поверхности или характера окружающей среды. Например, рядом с приёмником проехал автомобиль. Ошибку, порождаемую быстрой многолучевостью, можно считать гауссовой случайной величиной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, характеризующей максимальную ошибку, порождаемую многолучевостью. Медленная многолучевость связана с медленным измерением задержки отражённого сигнала и возникает, когда приёмник находится в статике относительно отражающей поверхности. Ошибки многолучевости часто определяют результирующую точность координатных измерений.

Для количественной оценки влияния эффектов многолучевости на точность оценки задержки сигналов в мировой практике используют так называемую огибающую ошибки многолучевости (multipath envelope). На рисунке 1 представлена огибающая кодовой ошибки многолучевости для сигнала GPS C/A НКА номер 1 для случая одного отраженного сигнала, имеющего амплитуду, равную 0.5 относительно амплитуды прямого сигнала, и прохождения смеси сигналов через радиотракт приемника шириной 16 МГц. При этом в качестве

стробовой последовательности используется прямоугольный импульс длительностью 100 нс.

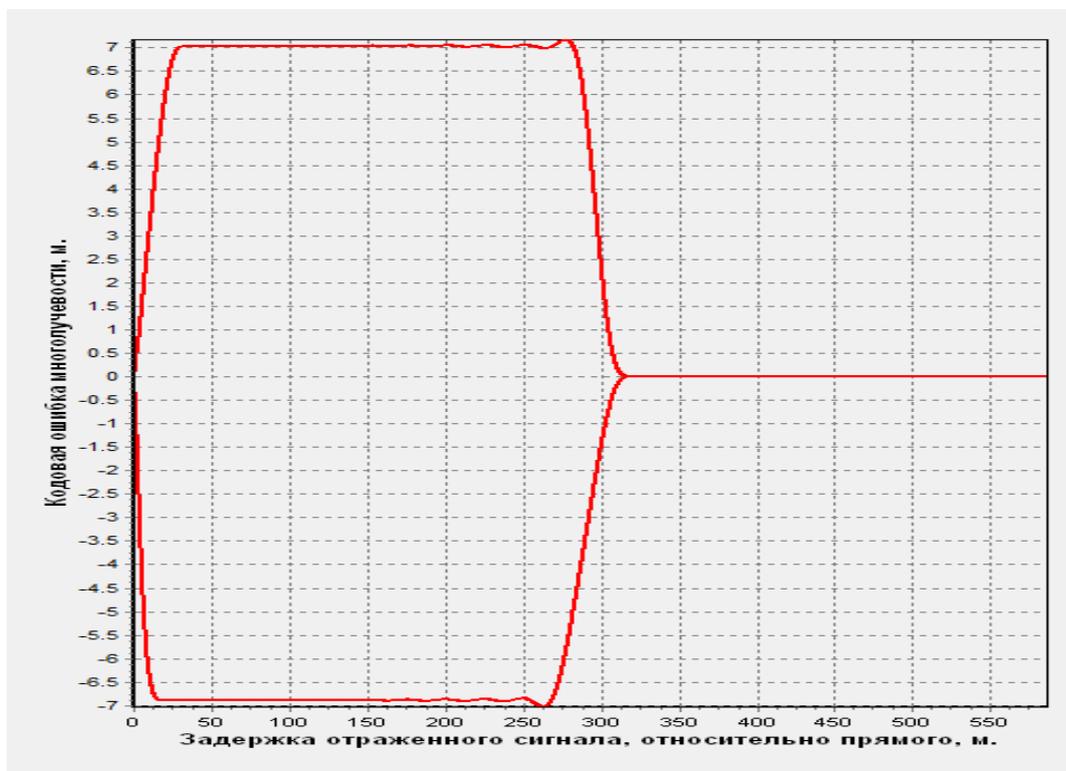


Рисунок 1 – Огибающая ошибки многолучевости для сигнала GPS C/A, амплитуда отраженного сигнала 0.5, длительность строба 100 нс.

Данная характеристика показывает зависимость ошибки смещения оценки задержки прямого сигнала от задержки отраженного сигнала при фиксированном соотношении амплитуд прямого и отраженного лучей. Обычно амплитуду отраженного луча выбирают в два раза меньше, чем амплитуду прямого. Форма огибающей многолучевости в большой степени зависит от построения приемной аппаратуры и используемых в ней алгоритмов обработки сигнала.

Дифференциальные режимы работы спутниковой НАП

С ужесточением требований к точности навигационных местоопределений были разработаны и в настоящее время широко используются на практике различные вариации режимов дифференциальной навигации. Дифференциальные методы основаны на исключении сильно коррелированных погрешностей, сказывающихся одновременно как на аппаратуре потребителя, так и на контрольных (базовых) станциях. Дифференциальное местоопределение производится относительно другой точки, обычно с точно известными координатами, и требует наличия еще одного навигационного приемника, находящегося в этой точке, и канала передачи корректирующей информации. К ошибкам, в той или иной степени исключаящимися относятся - эфемеридные погрешности и уход шкалы времени НКА, влияние ионосферной и тропосферной ошибок и т.д. Эффективность коррекции будет зависеть от того, насколько одинаковы будут эти погрешности на базовой станции и в точке расположения потребителя, когда потребитель производит навигационные измерения, т.е. от степени пространственной и временной корреляции этих погрешностей.

Режим ДН, основанный на измерениях псевдодальностей, называют кодовым дифференциальным режимом (в англоязычной литературе *Differential GPS - DGPS*). Он позволяет достигать метровой точности местоопределения. Используя только кодовые измерения даже в режиме дифференциального местоопределения, не представляется возможным решение высокоточных навигационных задач с ошибками на уровне единиц сантиметров.

Для дальнейшего увеличения точности ДН необходимо использовать также и измерения по фазе несущей частоты. Однако для этого требуется произвести разрешение неоднозначностей фазовых измерений по каждому НКА. Дифференциальный режим работы по фазовым измерениям в реальном времени – режим *Real Time Kinematic (RTK)*, обеспечивает сантиметровую точность местоопределения, что является приемлемым для большинства современных приложений [1, 2]. Фазовый дифференциальный режим измерений является высокоточным режимом работы навигационного приемника.

Однако, вышеперечисленные высокоточные режимы измерения не позволяют устранить ошибки, порождаемые возникновением переотраженных сигналов. На практике ошибки фазовой многолучёвости составляют порядка 2 см [1, 3]. Кодовая многолучёвость даёт большую ошибку, которая зависит от многих факторов и может достигать до 10 м. [1] в современных профессиональных навигационных приемниках и до 100 м. в дешевых автомобильных навигаторах.

Очевидно, что если не применять специальных методов борьбы, ошибки многолучевости могут превышать по абсолютному значению все остальные составляющие ошибки задержки (ионосферные, тропосферные и др.) [1, 2, 3].

Методы борьбы с ошибками многолучевости

Существует ряд способов борьбы с ошибкой многолучевости, в основе которых лежит применение временной или пространственной селекции. Пространственные методы используют антенны со специальными диаграммами направленности (антенны типа *choke-ring*), подавляющими сигнал, приходящий из

нижней полусферы, но данный метод является неэффективным при прохождении отраженного сигнала, пришедшего с верхней полусферы. Однако метод может быть модернизирован путем использования антенной решетки с электронной коммутацией элементов.

Иные способы основаны на применение временной селекции запаздывающего отраженного сигнала. В связи с тем, что навигационный сигнал является непрерывным, методы, использующиеся при работе с импульсными сигналами в данной ситуации не приемлемы. Для борьбы с ошибкой многолучевости применяется стробовый метод [1]. Данный метод основан на создании особого вида дискриминационной характеристики, формирующей сигнал ошибки в контуре системы, следящей за задержкой (ССЗ) модулирующего кода. Под дискриминационной характеристикой, понимают зависимость сигнальной составляющей на выходе дискриминатора от ошибки слежения. Дискриминаторная характеристика определяет многие важные свойства ССЗ как, например, диапазон захвата (при вхождении в режим слежения), ошибки слежения при адаптивных помехах и время запаздывания, при котором осуществляется подавление отраженного сигнала. Требуемая форма дискриминаторной характеристики достигается выбором опорного сигнала, который подается в дискриминатор. При стробовом методе этот сигнал состоит из последовательности коротких импульсов – стробов.

Простой строб представляет собой одиночный импульс прямоугольной формы, а сложный строб состоит из группы импульсов разной полярности. После

выбора формы строба, как правило, выбирают его длительность исходя из компромисса между величиной многолучевой и шумовой ошибок.

Теоретический расчет ошибки многолучевости

Существуют теоретические методы расчета ошибок многолучевости для заданных видов дискриминаторов и ПСП. При этом очень важно выбрать адекватную модель, описывающую поведение отраженных сигналов. Алгоритмы дискриминаторов ССЗ задаются соотношениями между выходной величиной дискриминатора Z_d и временным сдвигом ε опорного сигнала относительно модулирующей ПСП. При ошибке слежения за фазой сигнала (φ) в системе фазовой автоподстройки частоты (ФАП) и ошибке ССЗ (ε), можно упрощенно записать зависимости корреляционных сигналов:

$$\begin{aligned} I(\varepsilon) &= R_0(\varepsilon) \cos(\varphi); & Q(\varepsilon) &= R_0(\varepsilon) \sin(\varphi); \\ dI(\varepsilon) &= \Delta R(\varepsilon) \cos(\varphi); & dQ(\varepsilon) &= \Delta R(\varepsilon) \sin(\varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

Где $R_0(\varepsilon)$ - взаимокорреляционная функция ПСП на выходе высокочастотного тракта приёмника и опорного сигнала, который является копией модулирующего псевдослучайного кода;

$\Delta R(\varepsilon)$ - взаимокорреляционная функция ПСП на выходе высокочастотного тракта приёмника и опорного сигнала в канале ССЗ в виде последовательности стробов. В работе [7] рассмотрено два вида дискриминаторов: когерентный и некогерентный, часто использующихся в профессиональных навигационных приемниках. При этом некогерентный дискриминатор описывается выражением:

$$\bar{Z}_{di}(\varepsilon) = I(\varepsilon) \cdot dI(\varepsilon) + Q(\varepsilon) \cdot dQ(\varepsilon) \quad (2)$$

Как видно, некогерентный дискриминатор такой формы не зависит от ошибки слежения за фазой сигнала.

Когерентный дискриминатор:

$$\bar{Z}_{dc}(\varepsilon) = I(\varepsilon) \cdot dI(\varepsilon) \quad (3)$$

Если, рассматриваемая ФАП имеет малую ошибку слежения $\varphi=0$, то при действии прямого сигнала дискриминаторные характеристики будут равны и имеют следующий вид:

$$\bar{Z}'_{di}(\varepsilon) = \bar{Z}_{dc}(\varepsilon) = R_0(\varepsilon) \cdot \Delta R(\varepsilon) \quad (4)$$

При появлении отраженного сигнала от одиночного отражателя некой амплитуды, сигнал некогерентного дискриминатора можно записать следующим образом:

$$\bar{Z}'_{di}(\varepsilon) = \bar{Z}_{di}(\varepsilon) + \alpha \cos \theta \cdot [R_0(\varepsilon - \delta) \cdot \Delta R(\varepsilon) + R_0(\varepsilon) \cdot \Delta R(\varepsilon)] + \alpha^2 R_0(\varepsilon - \delta) \cdot \Delta R(\varepsilon - \delta) \quad (5),$$

где α – относительная амплитуда отраженного сигнала, δ - запаздывание отраженного сигнала относительно прямого, θ - фазовый сдвиг несущей отраженного сигнала относительно прямого.

Для когерентного сигнала необходимо учесть, влияние ошибки многолучевости на ФАП. Тогда выходная величина когерентного дискриминатора будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \bar{Z}'_{dc}(\varepsilon) &= Z_1(\varepsilon) \cdot Z_2(\varepsilon) \cdot Z_3(\varepsilon), \\ \text{где } Z_1(\varepsilon) &= \frac{1}{1 + \left[\frac{\alpha \sin \theta \cdot R_0(\varepsilon - \delta)}{R_0(\varepsilon) + \alpha \cos \theta \cdot R_0(\varepsilon - \delta)} \right]^2}; \\ Z_2(\varepsilon) &= \Delta R(\varepsilon) + \alpha \cos \theta \cdot \Delta R(\varepsilon - \delta) + (\alpha \sin \theta)^2 \frac{\Delta R(\varepsilon - \delta) \cdot R_0(\varepsilon - \delta)}{R_0(\varepsilon) + \alpha \cos \theta \cdot R_0(\varepsilon - \delta)}; \\ Z_3(\varepsilon) &= R_0(\varepsilon) + \alpha \cos \theta \cdot \Delta R(\varepsilon - \delta) + (\alpha \sin \theta)^2 \frac{R_0^2(\varepsilon - \delta)}{R_0(\varepsilon) + \alpha \cos \theta \cdot R_0(\varepsilon - \delta)}; \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда ошибка многолучевости может быть найдена как корень уравнений $\bar{Z}'_{dc}(\varepsilon) = 0$ и $\bar{Z}'_{di}(\varepsilon) = 0$. Временное запаздывание и сдвиг фазы связаны формулой: $\Theta = 2\pi \cdot f_c \cdot \delta$, где f_c - несущая частота. То есть отраженный сигнал задается амплитудой и задержкой относительно прямого сигнала. Также важно, что при малой флуктуации значения временного запаздывания, фазовый сдвиг изменяется очень сильно, и ошибки многолучевости помимо величины будут менять знак. Именно поэтому интерес для исследования представляет огибающая ошибки многолучевости, то есть наибольшие значения ошибок многолучевости обоих знаков.

Рассмотренная методология относится к теоретическому способу описания ошибки многолучевости. Сложность представленного метода связана прежде всего с адекватностью описания отраженного сигнала. Для расчета необходимо задаться какой-либо моделью, понимая при этом, что она может быть далекой от конкретных реальных условий. Однако данный теоретический подход расчета огибающих ошибок многолучевости с успехом применяется на практике на этапе проектирования навигационного приемника, чтобы понять, насколько удачно

выбран частотный план приемника, стробовые последовательности для подавления многолучевой ошибки, фильтры в радиочасти приемника.

Помимо теоретического расчета существуют различные методики оценки многолучевых ошибок, построенные на проведении экспериментальных испытаний. Один из вариантов такого эксперимента представлен в работе [4]. В работе [4] предлагается оценивать ошибку многолучевости в реальных условиях, когда присутствует один ярко выраженный отражатель, порождающий один многолучевый (отраженный) сигнал. Однако в реальных условиях на входе приемника, даже несмотря на такую постановку эксперимента, существует множество отраженных сигналов с разными параметрами и большое число других ошибок, действующих на параметры навигационного сигнала. Поэтому по результатам такого эксперимента нельзя однозначно оценить влияние отраженного сигнала на параметры навигационного сигнала.

В данной работе предложено провести оценку влияния отраженного сигнала на параметры сигналов ГНСС с помощью имитатора спутниковых навигационных сигналов *Spirent*. Предложенный подход позволяет создавать прямые и отраженные сигналы от спутников и подавать их на исследуемый навигационный приемник, исключая все остальные источники ошибок и проводя, таким образом, *чистый* эксперимент.

Экспериментальное исследование ошибок многолучевости проводилось с помощью имитатора навигационного поля *Spirent GSS7700*.

Имитатор спутниковых навигационных сигналов *Spirent*

Имитаторы навигационного поля Spirent позволяют имитировать работу различных ГНСС и создавать пользователю динамические и статические сценарии движения потребителя. Для этого используется специализированное программное обеспечение *Simgen*, которое позволяет выбирать и разрабатывать сценарии для проведения необходимых экспериментов. Результатом моделирования являются измерения от навигационных спутников и навигационные данные, передаваемые с выбранным уровнем мощности сигнала, выдаваемые потребителю с имитатора навигационного поля Spirent на несущей частоте.

Программный пакет *Simgen* позволяет управлять смоделированными спутниковыми орбитами и навигационными данными, описывающими их. Созданные сценарии могут быть повторены с высокой точностью и моделировать широкий спектр нормальных и нештатных ситуаций. Программное обеспечение *Simgen* позволяет моделировать ошибки многолучевости, тропосферные и ионосферные ошибки, эфемеридные ошибки, исключать их при первичном исследовании сигнала или комбинировать и исследовать влияние различных ошибок на результаты точности позиционирования или на изменение параметров навигационного сигнала.

Задача экспериментального исследования.

Задачей экспериментального исследования является получение зависимости ошибки многолучевости сигнала GPS C/A в случае присутствия одного отраженного сигнала заданной амплитуды в зависимости от задержки отраженного сигнала и сравнение результатов эксперимента с теоретическим расчетом.

Методика экспериментального исследования.

Разработка методики экспериментального исследования подразумевает выбор и обоснование условий, в которых проводятся эксперименты. Для решения поставленной задачи и оценки влияния на параметры навигационного сигнала только одного отраженного сигнала необходимо исключить из рассмотрения все остальные источники ошибок, такие как задержки сигнала, вызванные прохождением сигнала через слои тропосферы и ионосферы, эфемеридные ошибки НКА и прочие источники ошибок.

Так же, как известно [1, 7, 8], отраженный сигнал воздействует на прямой сигнал, пока задержка отраженного сигнала относительно прямого не превышает длительности одного символа дальномерной ПСП. Поэтому при проведении эксперимента необходимо обеспечить исследование влияния всего диапазона задержек отраженного сигнала от 0 до длительности символа ПСП исследуемого сигнала, чтобы оценить ошибки, порождаемые отраженным сигналом только в интересующем диапазоне. Для непосредственной оценки ошибки многолучевости в работе предлагается использовать комбинацию «Код-Фаза» для сигнала GPS C/A и используя фазовые измерения на частоте L1. Согласно описанной выше методике при отсутствии прочих источников ошибок, кроме, конечно, шумовой ошибки, в данной комбинации хорошо будут видны кодовые ошибки многолучевости, так как фазовые ошибки, по сравнению с кодовыми ошибками, пренебрежимо малы [1, 7, 8].

Экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования проводились по следующему сценарию:

1) Сигнал с высокочастотного выхода имитатора навигационного поля Spirent GSS7700 через малошумящий усилитель (МШУ) был подан на высокочастотный вход профессионального навигационного приемника компании Topcon GR5+. Схематично экспериментальная установка изображена на рисунке 2.

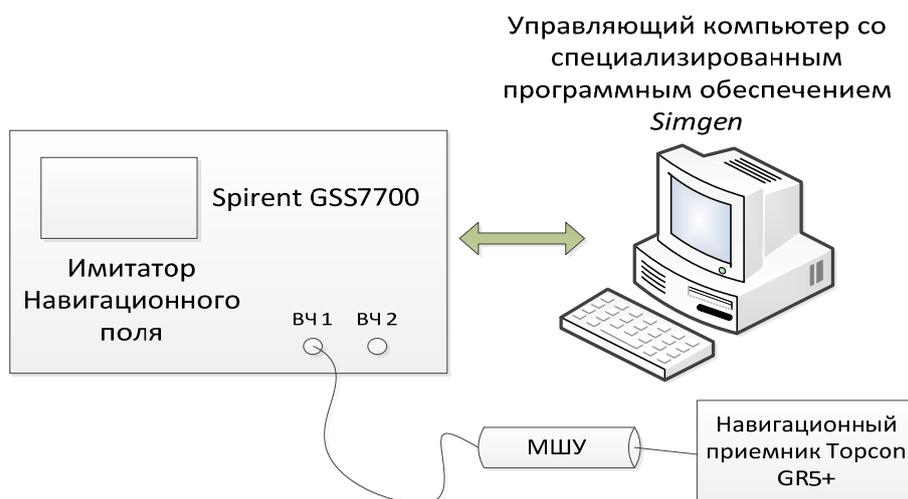


Рисунок 2 – Схематичное представление экспериментальной установки.

2) С использованием программного обеспечения *Simgen* был создан специальный сценарий, позволяющий решить задачу экспериментального исследования в соответствии с выработанной методикой. Для оценки влияния отраженного сигнала на параметры прямого навигационного сигнала в сценарии было задано статическое положение потребителя на все время сценария. Согласно особенностям работы имитатора, потребитель, принимая от имитатора сигналы, предстает физической точкой, и отраженные сигналы имитируются как отражения от земной поверхности. Используя эту особенность, а также то, что длительность одного символа исследуемой ПСП (в данном случае исследуется код GPS C/A) составляет приблизительно 300 м, высота местоположения потребителя была задана

$h = 160$ метров. Таким образом, если отраженный сигнал придет от НКА, находящегося в зените (прямо над потребителем), то его задержка будет равна $\tau = 2 \cdot h \cdot \sin(\alpha) = 320 \text{ м}$, где α – угол возвышения НКА. Такая задержка не повлияет на прямой сигнал. Дальнейшее движение спутника из зенита к горизонту будет уменьшать τ до 0, что позволит исследовать все интересующие нас диапазоны задержек отраженного сигнала. В качестве такого НКА был выбран НКА GPS № 9, который во время начала сценария находился в зените, а через три часа зашел за горизонт. По данному НКА в программе *Simgen* был задан один отраженный сигнал с амплитудой равной 0.5 относительно амплитуды прямого сигнала. Таким образом, за время эксперимента (3 часа) по НКА GPS №9 изменился весь спектр задержек отраженного сигнала, что позволяет построить комбинацию «Код-Фаза» не только в зависимости от времени, но и в зависимости от задержки отраженного сигнала и оценить кодовую ошибку многолучевости экспериментальным способом.

Результаты эксперимента.

Результаты натурного эксперимента по оценке ошибки кодовой многолучевости с использованием реального профессионального навигационного приемника и имитатора навигационного поля представлены на рисунке 3. Также на рисунке изображен график огибающей ошибки кодовой многолучевости, полученный путем теоретического расчета при следующих условиях:

- на входе присутствует один отраженный сигнал;
- амплитуда отраженного сигнала равна 0.5 относительно амплитуды прямого сигнала;

- при теоретическом расчете учтен факт прохождения сигнала через высокочастотный радиотракт навигационного приемника GR5+ и сделаны необходимые частотные преобразования.

Из результатов эксперимента, представленных на рисунке 3 можно заметить, что максимальные значения ошибки многолучевости, полученные в реальном эксперименте хорошо согласуются со значением огибающей ошибки многолучевости, полученной путем теоретического расчета, для данного навигационного приемника для сигнала GPS C/A. Подобные эксперименты могут быть повторены для других типов сигналов (GPS P1/P2) при некотором изменении рабочего сценария.

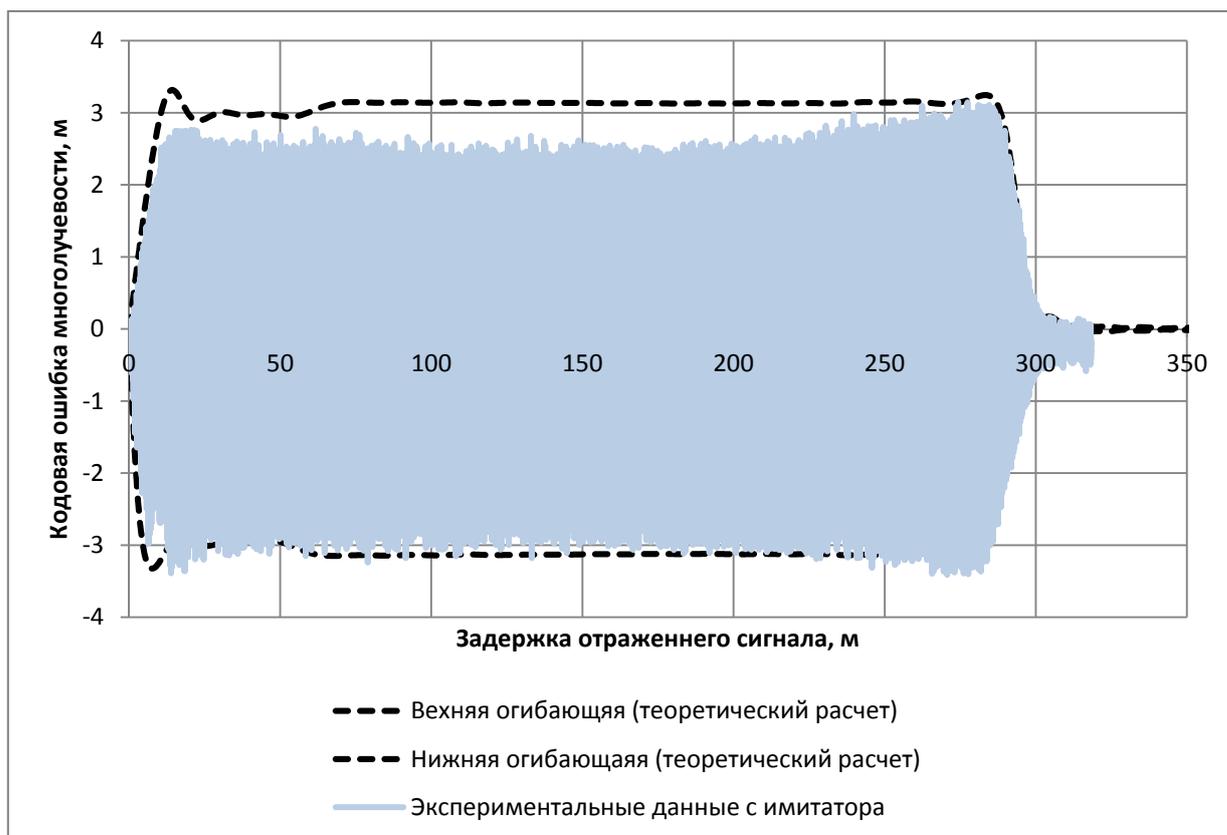


Рисунок 3 - Сравнение ошибки многолучевости в зависимости от задержки отраженного сигнала, рассчитанной согласно теоретическим выкладкам и полученной экспериментально.

Выводы

Хорошее совпадение результатов теоретического расчета максимальных ошибок многолучевости с экспериментальными исследованиями на имитаторе навигационного поля позволяет сразу сделать несколько важных выводов:

- 1) Так как теоретический расчет хорошо согласуется с действительностью, то он может быть применен на этапе проектирования нового приемника, чтобы в первом приближении оценить влияние многолучевых ошибок на точность измеряемых навигационных параметров при выбранном частотном плане и фильтрах в высокочастотной части приемника;
- 2) Результаты натурных экспериментов могут быть использованы, чтобы анализировать способность выпускаемой уже серийно аппаратуры противостоять многолучевым ошибкам, возможно используя при этом какие-то специальные алгоритмы или способы подавления многолучевости;
- 3) Теоретический расчет и предложенная в работе методика экспериментального исследования универсальны и могут быть использованы, чтобы оценить ошибки многолучевости для сигналов любой ГНСС и любого сигнала;
- 4) Данная экспериментальная методика также хорошо подходит для проверки методов борьбы с ошибкой многолучевости, так как есть возможность модифицировать

экспериментальную установку и исследовать несколько образцов навигационной аппаратуры одновременно.

При подготовке статьи к печати были использованы научные результаты полученные при проведении исследований в рамках гранта 14.Z57.14.5589-НШ.

Библиографический список

1. Борискин А.Д., Вейцель А.В., Вейцель В.А., Жодзишский М.И., Милютин Д.С. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных систем: Приемник – потребитель навигационной информации. - М.: Изд-во МАИ, 2010. - 292 с.
2. Parkinson B. Spilker J. (ed.). Global Positioning System: Theory and Practice. Volumes I (694 p) and II (632 p). Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics. Inc. 1996.
3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. / Под редакцией Перова А.И., Харисова В.Н. – Москва, Радиотехника, 2010. - 800 с.
4. Михайлов С.В. Влияние многолучевости распространения радиоволн от навигационного космического аппарата на точность определения координат GPS-приемником. // Беспроводные технологии. 2006. № 2. С. 60–71.
5. Милютин Д.С., Никитин Д.П., Вейцель А.В. Повышение точности местоположения с использованием новых сигналов спутниковых навигационных систем // Вестник Московского Авиационного института, 2009. т. 16. № 6. С. 120-124.

6. 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.
7. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных систем: высокоточные антенны, специальные методы повышения точности позиционирования / Под редакцией Жодзишского М.И. - М.: Изд-во МАИ, 2010. - 386 с.
8. Никитин. Д.П. Совместное использование фазовых и кодовых измерений для дифференциального режима позиционирования // Телекоммуникации. 2012. № 6. С. 8-33.