

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОГО СИГНАЛА ГЛОНАСС В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Е.В. Савельев

savelev@student.bmstu.ru

SPIN-код: 7817-1221

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Статья посвящена разработке имитационных моделей работы спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС при наличии замираний сигнала, вызванных многолучевым распространением, что является одной из основных причин нарушения функционирования подобных систем и, следовательно, актуальной проблемой. Описана математическая модель многолучевого распространения, показаны вызываемые им изменения амплитуды и фазы сигнала. Особое внимание уделено распределениям замираний сигнала, вызывающим наибольшие искажения навигационной информации. Представлены имитационные модели воздействия на навигационный сигнал быстрых замираний, распределенных по законам Райса и Рэлея. Проведен анализ эффективности систем в условиях наличия и отсутствия прямой линии видимости между передатчиком и приемником.

Ключевые слова

Глобальные спутниковые навигационные системы, навигационное оборудование, искажение радиосигнала, многолучевое распространение, быстрые замирания, псевдодальномерный метод, вероятность битовой ошибки, имитационное моделирование

Поступила в редакцию 23.12.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. В современном мире глобальные системы навигации нашли широкое применение как в системах военного назначения, так и среди гражданского населения для определения местоположения и прокладывания маршрутов движения, поэтому обеспечение качества принимаемого сигнала в спутниковых навигационных системах является актуальной проблемой. Одним из факторов, вызывающих наибольшие искажения навигационной информации, является множественное отражение, приводящее к многолучевому распространению сигнала и возникновению быстрых замираний [1]. Физические основы этих явлений подробно рассмотрены в технической литературе [2]. Для борьбы с подобными искажениями предлагаются различные способы, в том числе применение антенн с кольцевыми компенсаторами [3], Rake-приемников [4] наряду с использованием технологий опережающих и запаздывающих уклонений [5] и узких входных корреляторов [6]. Тем не менее предложенные способы не могут гарантировать отсутствия ошибок в работе системы. Для разработки перспективных решений проблемы необходимо проведение моделирования прямо-передающего тракта в применении к конкретной глобальной навигационной

спутниковой системе (ГНСС). По этой причине была поставлена задача разработки имитационной модели системы ГЛОНАСС с учетом особенностей сигнално-кодовой конструкции.

Математическая модель. Допустим, что на приемник поступает прямой сигнал от космического аппарата (КА), а также сигнал, отраженный от поверхности земли [7]. Отраженный луч отличается от прямого по амплитуде и фазе. Из-за неизбежных потерь при отражении его амплитуда уменьшается, изменяясь пропорционально коэффициенту отражения ρ . Фаза изменяется по двум причинам: во-первых, в результате сдвига фазы при отражении на угол β и, во-вторых, из-за потери фазы за счет разности пройденного прямым и отраженным лучами расстояния ΔR . Таким образом, сдвиг по фазе для отраженного луча

$$\gamma = \beta + \frac{2\pi\Delta R}{\lambda},$$

где λ — длина волны прямого луча.

Вектор прямого луча с амплитудой напряженности электрического поля E суммируется с вектором отраженного луча амплитудой ρE . Электрическое поле в месте расположения антенны является результатом интерференции обоих лучей:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\rho \sin \gamma}{1 + \rho \cos \gamma};$$

$$\Delta = \frac{\alpha \lambda}{2\pi},$$

где α — результирующий сдвиг фазы; Δ — погрешность измерения дальности.

Коэффициент отражения ρ и угол сдвига фазы γ зависят от диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости отражающей поверхности, длины волны, угла скольжения и поляризации радиолуча. Разность хода определяют при решении конкретной геометрической задачи, зная взаимное расположение спутника, экранирующей поверхности и приемной антенны.

Реальная картина несколько сложнее. Волна, падающая на отражающую поверхность, имеет не только горизонтально, но и вертикально поляризованные составляющие [8]. Отражаясь, они приобретают разные коэффициенты ρ и углы сдвига фазы γ . В отраженном луче изменяется направление вращения плоскости поляризации; в приемной антенне луч дополнительно ослабляется. Тем не менее в фазовых измерениях картина близка к рассмотренной.

Быстрые замирания возникают вследствие того, что в СВЧ-диапазоне длина волны составляет единицы-десятки сантиметров. В сложной помеховой обстановке наличие множества отраженных сигналов со случайными значениями амплитуды и фазы приводит к сильным изменениям уровня принимаемого сигнала даже при незначительных перемещениях приемника. Возникающие падения уровня называют замираниями. Одномерная плотность распределения

быстрых замираний в условиях, когда прямое прохождение сигнала практически отсутствует, описывается законом Рэлея:

$$w(x) = \frac{x^2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right),$$

где x — случайная величина значения огибающей сигнала, приходящего на пользовательскую станцию; σ^2 — дисперсия горизонтальной и вертикальной составляющих напряженности поля (электрической и магнитной составляющих), причем $P = 2\sigma^2$ — средняя мощность сигнала.

Замирание по закону Рэлея характерно для многолучевого распространения, когда нет прямой видимости и нет ни одного доминирующего отраженного луча, т. е. худшие случаи распространения в городской местности (например, нахождение приемника в тоннеле). При наличии и прямого луча с относительно высоким уровнем мощности сигнала, и отраженных волн меньшей мощности более точной моделью является распределение Райса. Одномерная плотность распределения огибающей сигнала в этом случае определяется из выражения

$$w(x) = \frac{x^2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + U_0}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xU_0}{2\sigma^2}\right),$$

где $I_0(*)$ — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка, U_0 — отношение мощности прямого сигнала к средней мощности флуктуации.

Экспериментальные исследования подтверждают справедливость применения этих закономерностей для городских условий.

Особенности навигационного сигнала ГЛОНАСС. Сигнально-кодовая конструкция навигационной системы ГЛОНАСС описана в интерфейсном документе [9]. Навигационный сигнал, передаваемый каждым аппаратом системы на собственной несущей частоте, принадлежащей к одному из двух диапазонов L_1 и L_2 , является многокомпонентным фазоманипулированным сигналом. Фазовая манипуляция несущей осуществляется на π радиан с максимальной погрешностью не более $\pm 0,2$ рад. Фаза несущего колебания, передаваемого космическим аппаратом, модулируется двоичной последовательностью, образованной суммированием по модулю два псевдослучайного дальномерного кода, цифровой информации навигационного сообщения и вспомогательного колебания типа меандра. Псевдослучайный дальномерный код представляет собой последовательность максимальной длины, получаемую при помощи семиразрядного сдвигового регистра (M-последовательность) с периодом 1 мс и скоростью передачи символов 511 кбит/с. Навигационное сообщение передается в виде потока цифровой информации, закодированной по коду Хемминга и преобразованной в относительный код.

Номинальные значения несущих частот навигационных радиосигналов космических аппаратов ГЛОНАСС в частотных поддиапазонах L_1 и L_2 определяются следующими выражениями:

$$f_{K1} = f_{01} + K\Delta f_1;$$

$$f_{K2} = f_{02} + K\Delta f_2,$$

где K — целое число, номер несущей частоты навигационного радиосигнала, излучаемого КА в частотном поддиапазоне L_1 и L_2 соответственно; $f_{01} = 1602$ МГц; $\Delta f_1 = 562,5$ кГц для поддиапазона L_1 ; $f_{02} = 1246$ МГц; $\Delta f_2 = 437,5$ кГц, для поддиапазона L_2 .

Для каждого навигационного КА рабочие частоты поддиапазонов L_1 и L_2 когерентны и формируются от общего стандарта частоты. Номинальное значение частоты этого стандарта с точки зрения наблюдателя, находящегося на поверхности Земли, равно 5,0 МГц.

Одновременно с проведением измерений в приемнике выполняется автоматическая обработка содержащихся в каждом навигационном радиосигнале меток времени и цифровой информации [10]. Цифровая информация описывает положение данного спутника в пространстве и времени (эфемериды) относительно единой для системы шкалы времени и в геоцентрической связанной декартовой системе координат. Кроме того, цифровая информация описывает положение других спутников системы (альманах) в виде кеплеровских элементов их орбит и содержит некоторые другие параметры. Результаты измерений и принятая цифровая информация являются исходными данными для решения навигационной задачи по определению координат и параметров движения. Навигационная задача решается автоматически в вычислительном устройстве приемника, при этом используется известный метод наименьших квадратов. В результате решения определяются три координаты местоположения потребителя, скорость его движения и осуществляется привязка шкалы времени потребителя к высокоточной шкале Координированного всемирного времени.

Моделирование приемо-передающего тракта. Модель имитирует реальную сигнально-кодую конструкцию системы ГЛОНАСС для спутника, работающего в рамках частотной полосы L_1 системы с использованием частотного разделения каналов. Блок Random Integer имитирует передаваемую со скоростью 50 бит/с цифровую навигационную информацию, эта информация умножается на псевдослучайный дальномерный код, генерируемый блоком PN Sequence Generator (скорость генерации 511 кбит/с, порождающий полином соответствует указанному в интерфейсной документации навигационной системы). Дополнительным множителем является меандр с частотой 50 Гц, поступающий с блока Pulse Generator. Результирующая последовательность бит поступает на BPSK-модулятор. Сигнал переносится на несущую частоту, генерируемую источником SineWave (1602 МГц). После формирования сигнал попадает в канал с аддитив-

ным гауссовским шумом, имитируемым с помощью блока AWGN Channel с варьируемым параметром SNR. Далее сигнал подвергается воздействию замираний по закону Райса в блоке Rician Fading или Рэля в блоке Rayleigh Fading (в зависимости от моделируемой ситуации). На входе приемника сигнал усиливается, проходит через полосовой фильтр, вновь умножается на несущую частоту с блока SineWave, и составляющая с удвоенной частотой отсекается блоком фильтра низких частот Lowpass Filter. Полученный сигнал демодулируется блоком BPSK Demodulator, восстанавливается умножением на аналогичную изначальной псевдослучайную последовательность наряду со вспомогательным меандром для восстановления переданной навигационной информации и выводится на осциллограф Scope. Оценка вероятности битовой и символьной ошибки осуществляется с помощью блоков Error Rate Calculation и выводится на блок Display. Кроме вышеупомянутых блоков в модели используются элементы Zero-Order Hold и Data Type Conversion для обеспечения взаимодействия между блоками, подразумевающими различные типы сигналов. Имитационная модель разделена на четыре подсистемы, изображенные на рис. 1–4. Первая подсистема имитирует работу передатчика, установленного на спутнике навигационной системы ГЛОНАСС, вторая — искажение сигнала аддитивным шумом с распределением по Гауссу и замиранием сигнала, вызванным многолучевым распространением, третья — работу приемника, фильтрующего сигнал и восстанавливающего навигационную информацию. Четвертая подсистема включает в себя промежуточные блоки для согласования используемых типов данных и производит оценку вероятности битовой и символьной ошибки.

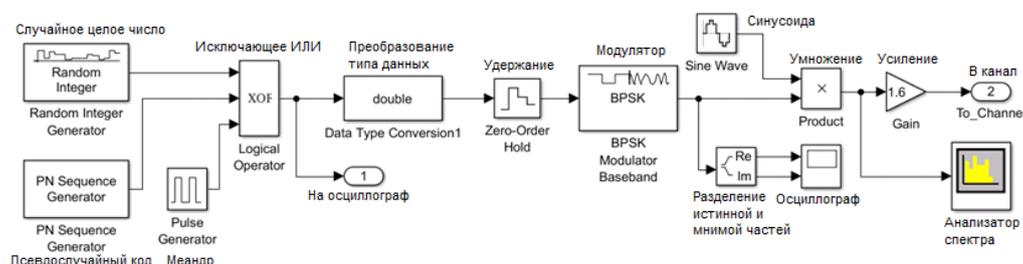


Рис. 1. Имитационная модель передатчика ГЛОНАСС



Рис. 2. Имитационная модель канала распространения

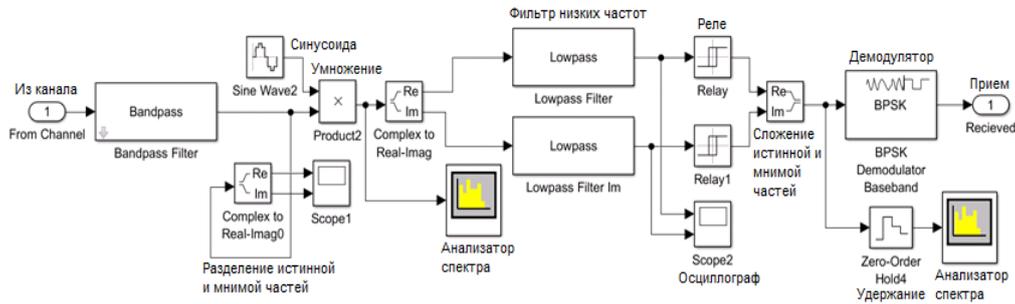


Рис. 3. Имитационная модель приемника ГЛОНАСС

На рис. 2 изображен вариант канала для имитации замираний сигнала в соответствии с законом распределения Райса, т. е. при наличии прямой линии видимости. Максимальное доплеровское смещение сигнала (Maximum Doppler Shift) установлено равным 100 Гц, что примерно соответствует движению приемника относительно отражающей поверхности со скоростью 60 км/ч. К-фактор, определяющий мощностные соотношения между полезным сигналом, передаваемым по прямой линии и его отраженными копиями, равен 3,5, что в общем случае соответствует нахождению приемника навигационной системы в условиях плотной высотной городской застройки.

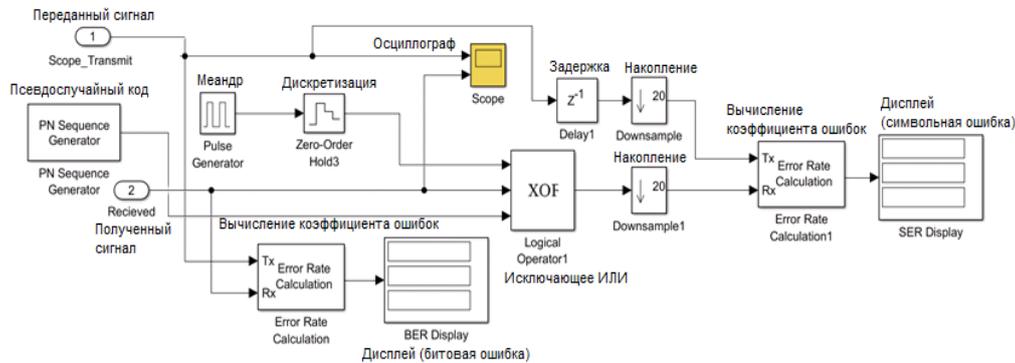


Рис. 4. Блоки оценки вероятности битовой ошибки

Для моделирования замираний по закону Рэлея (без прямой линии видимости между передатчиком и приемником) блок Rician Fading необходимо заменить блоком Rayleigh Fading. Доплеровское смещение при этом остается без изменений, затухание и задержка отраженного сигнала устанавливаются равными не более 20 дБ и 1 мкс соответственно. Для определения работоспособности модели на каждом этапе прохождения навигационного сигнала через приемно-передающий тракт системы с помощью блоков Spectrum Analyzer осуществляется снятие изображений сигнала в частотной области. Частотные спектры сигнала, полученные в частях имитационной модели, соответствующих переходам между подсистемами, составляющими ГНСС, изображены на рис. 5–8.

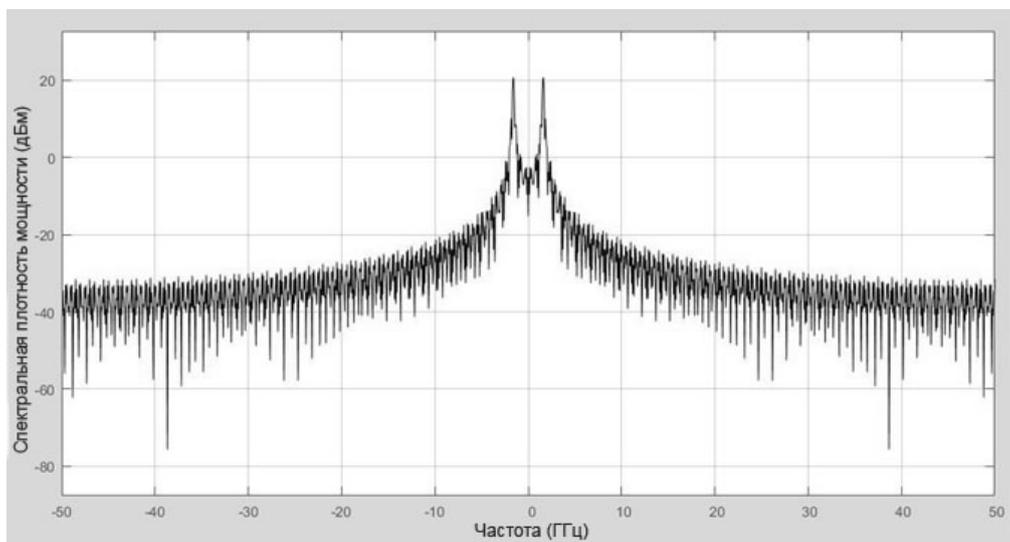


Рис. 5. Спектр сигнала на выходе передатчика

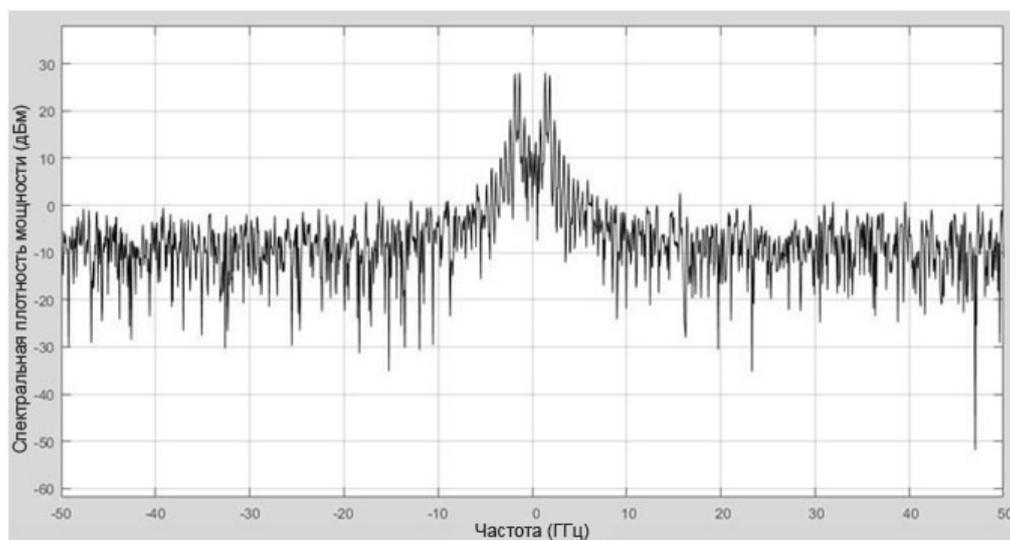


Рис. 6. Спектр сигнала после прохождения через канал

Как нетрудно заметить, при наличии канала с многолучевым распространением энергия полезного сигнала на несущей частоте уменьшается, а на близких к ней частотах появляются дополнительные составляющие, обусловленные доплеровским сдвигом отраженных копий сигнала передатчика. После переноса информационного сигнала (рис. 7) на нулевую частоту информационная составляющая может быть выделена при помощи фильтра низких частот, что выполняется посредством использования блоков цифровой фильтрации Lowpass Filter. Получаемый после фильтрации спектр сигнала изображен на рис. 8.

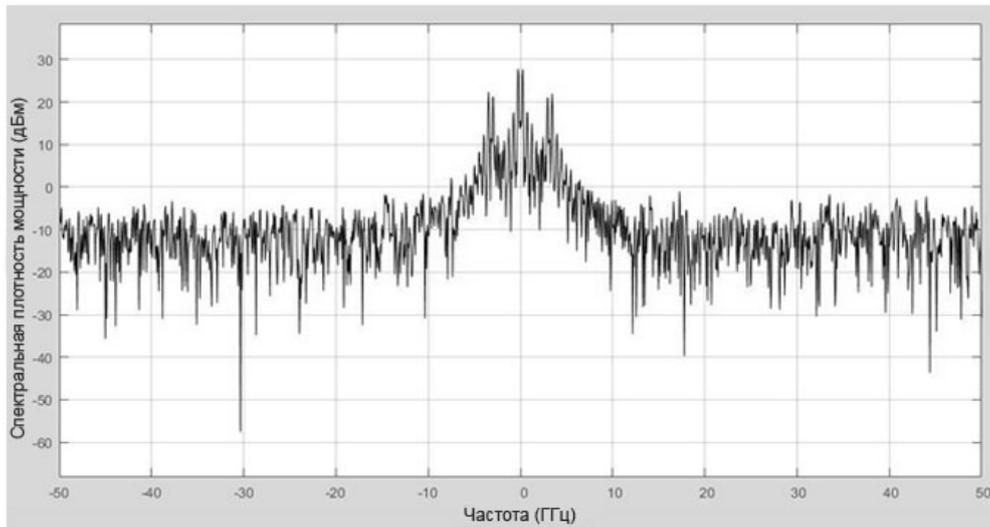


Рис. 7. Спектр сигнала после повторного умножения на несущую

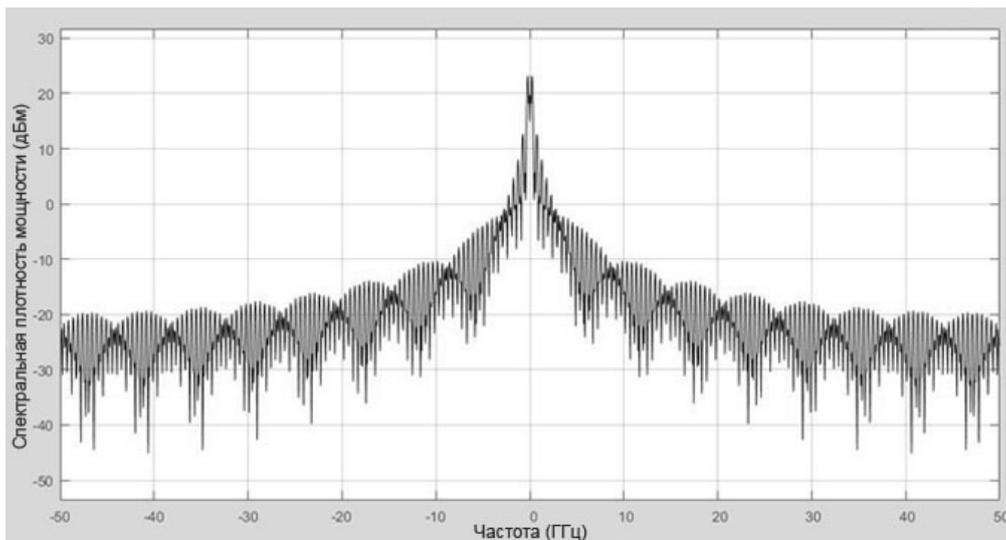


Рис. 8. Спектр сигнала после фильтрации в приемнике

Для оценки эффективности работы навигационной системы в условиях многолучевого распространения сигнала на достаточно большой выборке (10^8 бит) проводится вычисление количества правильно и ошибочно переданных бит информации для оценки вероятности битовой и символьной ошибки.

В силу особенностей сигнально-кодовой конструкции сигнала навигационной системы ГЛОНАСС (расширение спектра при помощи псевдослучайного кода и умножение на вспомогательный меандр наряду с использованием помехоустойчивого кодирования по Хеммингу) вероятность битовой ошибки менее чем 10^{-4} можно считать приемлемой (такая вероятность практически исключает появление бо-

лее одного ошибочного бита на суперкадр, а следовательно, присутствует возможность восстановления оперативной навигационной информации без потерь). Результаты моделирования (точками) параллельно с теоретическими зависимостями для законов Райса и Рэлея (сплошными линиями) изображены на рис. 9.

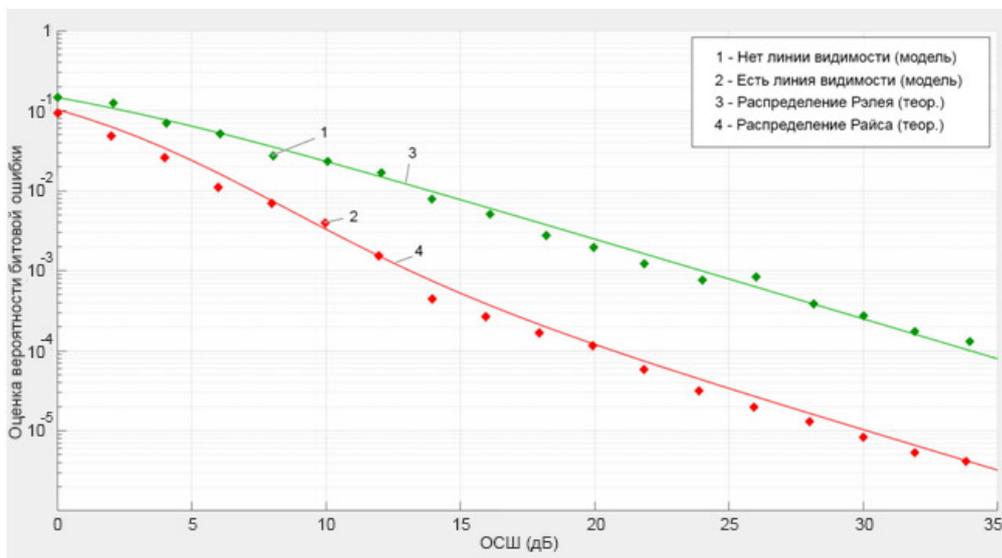


Рис. 9. Оценки вероятностей битовой ошибки

Заключение. Полученные результаты моделирования подтверждают ранее описанные теоретические зависимости, что позволяет сделать заключение об адекватности спроектированной модели. Кроме того, результаты моделирования указывают, что, при наличии прямой линии видимости между спутниками и приемным устройством и удовлетворительном отношении сигнал/шум (ОСШ) вероятность битовой ошибки может быть скомпенсирована за счет помехоустойчивого кодирования информации системы ГЛОНАСС. Если же прямая видимость спутника отсутствует и в приемник поступают исключительно отраженные сигналы, навигационная информация будет претерпевать серьезные изменения. Для преодоления подобного рода помех необходимо создание гибридной системы навигации, совмещающей в себе приемник ГНСС и дополнительную инерциальную систему навигации, результаты работы которой не зависят от сигнально-помеховой обстановки.

Литература

- [1] Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М., Советское радио, 1970.
- [2] Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. М., Высшая школа, 1975.
- [3] Tranquilla J.M., Carr J.P., Al-Rizzo H.M. Analysis of a choke ring groundplane for multi-path control in Global Positioning System (GPS). *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1994, vol. 42, no. 7, pp. 905–911. DOI: <https://doi.org/10.1109/8.299591>

-
- [4] Невдяев Л.М. CDMA: Борьба с замираниями. *Сети*, 2000, № 9. URL: <https://www.osp.ru/nets/2000/09/141359/>
 - [5] Townsend S., Fenton P. A practical approach to the reduction of pseudorange multipath errors in a L1 GPS receiver. *ION-GPS*, 1994. URL: <https://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/File24.pdf> (дата обращения: 19.11.2019).
 - [6] Van Dierendonck A.J., Fenton P., Ford T. Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver. *Navigation*, 1992, vol. 39, no. 3, pp. 265–283. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1992.tb02276.x>
 - [7] Михайлов С.В. Влияние многолучевости распространения радиоволн от навигационного космического аппарата на точность определения координат GPS-приемником. *Беспроводные технологии*, 2006, № 2, pp. 60–71.
 - [8] Скляр Б. Цифровая связь, теоретические основы и практическое применение. М., Вильямс, 2003.
 - [9] ГЛОНАСС. Интерфейсно-контрольный документ. Редакция 5.1. М., Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2008.
 - [10] Перов А.И., Харисов В.К., ред. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М., Радиотехника, 2010.

Савельев Егор Владимирович — магистрант кафедры «Автономные информационные и управляющие системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Сидоркина Юлия Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Автономные информационные и управляющие системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Савельев Е.В. Моделирование навигационного сигнала ГЛОНАСС в условиях многолучевого распространения. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 02(43). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-02-577>

MODELING OF THE GLONASS NAVIGATION SIGNAL IN THE CONDITIONS OF MULTIPATH PROPAGATION

E.V. Savelev

savelev@student.bmstu.ru

SPIN-code: 7817-1221

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to the development of simulation models of the GLONASS satellite navigation system in the presence of signal fading caused by multipath propagation, which is one of the main reasons for the malfunction of such systems and, therefore, an urgent problem. A mathematical model of multipath propagation is described; changes in the amplitude and phase of the signal caused by it are shown. Particular attention is paid to the distribution of signal fading, causing the greatest distortion of navigation information. Simulation models are presented of the impact of fast fading, distributed according to the laws of Rice and Rayleigh on the navigation signal. The analysis of the effectiveness of systems in the presence and absence of a direct line of sight between the transmitter and receiver is carried out.

Keywords

Global satellite navigation systems, navigation equipment, radio signal distortion, multipath propagation, fast fading, pseudo-ranging method, bit error probability, simulation

Received 23.12.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Fink L.M. Teoriya peredachi diskretnykh soobshcheniy [Theory of discrete message transmission]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970 (in Russ.).
- [2] Grudinskaya G.P. Rasprostranenie radiovoln [Radio-waves propagation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975 (in Russ.).
- [3] Tranquilla J.M., Carr J.P., Al-Rizzo H.M. Analysis of a choke ring groundplane for multipath control in Global Positioning System (GPS). *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1994, vol. 42, no. 7, pp. 905–911. DOI: <https://doi.org/10.1109/8.299591>
- [4] Nevdyayev L.M. CDMA: fight against blackout. *Seti* [Network world], 2000, no. 9. URL: <https://www.osp.ru/nets/2000/09/141359/> (in Russ.).
- [5] Townsend S., Fenton P. A practical approach to the reduction of pseudorange multipath errors in a L1 GPS receiver. *ION-GPS*, 1994. URL: <https://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/File24.pdf> (accessed: 19.11.2019).
- [6] Van Dierendonck A.J., Fenton P., Ford T. Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver. *Navigation*, 1992, vol. 39, no. 3, pp. 265–283. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1992.tb02276.x>
- [7] Mikhaylov S.V. Effect of multi-beam radio waves propagation from navigation spacecraft on accuracy of coordinates locating by GPS receiver. *Besprovodnye tekhnologii* [Wireless Technologies], 2006, no. 2, pp. 60–71 (in Russ.).

- [8] Sklar B. Digital communications. Fundamentals and applications. Upper Saddle River, 2001. (Russ. ed.: 'Tsifrovaya svyaz', teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye. Moscow, Vil'yams Publ., 2003.)
- [9] GLONASS. Interfeysno-kontrol'nyy dokument. Redaktsiya 5.1 [GLONASS. Interface control document. Edition 5.1]. Moscow, Rossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut kosmicheskogo priborostroeniya Publ., 2008 (in Russ.).
- [10] Perov A.I., Kharisov V.K., eds. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya [Glonass. Construction and functioning principles]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010 (in Russ.).

Savelev E.V. — Master's Degree Student, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Sidorkina Yu.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Savelev E.V. Modeling of the GLONASS navigation signal in the conditions of multipath propagation. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 02(43). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-02-577.html> (in Russ.).