

УДК 004.94:629.783

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ GPS И ГЛОНАСС СИГНАЛОВ

ЧЖО ХИНН АУНГ, Н.И. ЛИСТОПАД

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: listopad@bsuir.by

**Аннотация.** В данной работе представлено компьютерное моделирование навигационных сигналов двух глобальных спутниковых систем – GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия). Моделирование выполнено в среде **MATLAB**. Рассмотрены основные принципы формирования сигналов: для GPS – технология кодового разделения каналов (CDMA), для ГЛОНАСС – частотного разделения каналов (FDMA). В процессе моделирования в сигнал добавляется аддитивный белый гауссов шум (AWGN) при различных значениях отношения сигнал/шум (SNR). В данной работе использованы значения SNR = –15 дБ для GPS и SNR = –10 дБ для ГЛОНАСС, что соответствует условиям слабого сигнала. Исследовано влияние уровня SNR на корреляционные пики, точность синхронизации (PLL/DLL) и вероятность битовой ошибки (BER). Приведена **сравнительная таблица** влияния SNR на работу GPS и ГЛОНАСС для уровней от –20 дБ до +5 дБ на основе результатов MATLAB-моделирования. Показано, что MATLAB является эффективным инструментом для тестирования алгоритмов приёма без использования реального оборудования.

**Abstract.** This paper presents the computer modeling of navigation signals for two global satellite systems: GPS (USA) and GLONASS (Russia). The simulation was executed in the MATLAB environment. The fundamental principles of signal generation are examined: code-division multiple access (CDMA) technology for GPS and frequency-division multiple access (FDMA) technology for GLONASS. During the simulation process, additive white Gaussian noise (AWGN) is added to the signal at various signal-to-noise ratio (SNR) values. In this work, SNR values of –15 dB for GPS and –10 dB for GLONASS are applied, which corresponds to weak signal conditions. The impact of the SNR level on correlation peaks, tracking accuracy (PLL/DLL), and bit error rate (BER) is investigated. A comparative table illustrating the effect of SNR on GPS and GLONASS performance for levels ranging from –20 dB to +5 dB is provided based on the MATLAB simulation results. It is demonstrated that MATLAB is an effective tool for testing receiver algorithms without the use of real equipment.

### Введение

Современные глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS), такие как американская система GPS и российская ГЛОНАСС, играют ключевую роль в определении местоположения, навигации и синхронизации времени по всему миру. Спутники этих систем непрерывно передают на Землю радиосигналы в диапазоне L (1–2 ГГц). Эти сигналы содержат кодовую информацию (позволяющую идентифицировать спутник) и навигационное сообщение (содержащее эфемериды, альманахи и другие данные).

Однако разработка и тестирование реальных GNSS-приёмников требуют значительных финансовых и временных затрат, а также специального оборудования. Именно поэтому **компьютерное моделирование** становится незаменимым инструментом на этапе исследований и разработок. Моделирование позволяет:

- воспроизвести структуру сигнала любого спутника;
- имитировать различные виды модуляции (BPSK, BOC и др.);
- добавлять шумы и помехи, характерные для реальных условий приёма;
- исследовать работу алгоритмов синхронизации (PLL, DLL);
- анализировать помехоустойчивость при различных уровнях SNR.

В данной работе моделирование выполняется в среде **MATLAB**, которая предоставляет богатый набор функций для генерации псевдослучайных кодов, модуляции, фильтрации и статистического анализа.

### Методология моделирования в MATLAB

#### Общая схема моделирования

Моделирование каждого сигнала (GPS или ГЛОНАСС) в MATLAB включает следующие этапы:

1. Генерация кода (C/A-код для GPS, ST/VT-код для ГЛОНАСС).

2. Формирование навигационного сообщения (битовая последовательность).
3. BPSK-модуляция (биты кода модулируют несущую частоту).
4. Добавление аддитивного белого гауссова шума (AWGN) с заданным SNR.
5. Корреляционная обработка (поиск задержки кода и доплеровского сдвига).
6. Оценка BER (вероятности битовой ошибки).

**Таблица 1.** Параметры моделирования

| Параметр                        | Значение               |
|---------------------------------|------------------------|
| Среда моделирования             | MATLAB R2021a / R2023a |
| Частота дискретизации           | 10 МГц                 |
| Длительность кода               | 1 мс                   |
| Количество чипов C/A-кода (GPS) | 1023                   |
| Тип модуляции                   | BPSK                   |
| Модель шума                     | AWGN                   |
| Диапазон исследованных SNR      | от -20 дБ до +5 дБ     |
| SNR для GPS (слабый сигнал)     | -15 дБ                 |
| SNR для ГЛОНАСС                 | -10 дБ                 |
| Количество отсчётов для BER     | $10^6$ бит             |

Эти параметры выбраны так, чтобы моделирование было максимально приближено к реальным условиям работы GNSS-приёмников.

### **Моделирование сигнала GPS (технология CDMA) в MATLAB**

Система GPS использует **кодовое разделение каналов (CDMA – Code Division Multiple Access)**. Это означает, что все спутники передают сигналы на одной и той же несущей частоте ( $L1 = 1575,42$  МГц), но каждый спутник имеет свой уникальный **псевдослучайный код (PRN)**. Благодаря этому приёмник может различить сигналы разных спутников.

#### **Реализация в MATLAB**

В MATLAB моделирование GPS-сигнала выполняется следующим образом:

1. Генерация C/A-кода с помощью линейных регистров сдвига.
2. Формирование навигационного сообщения (50 бит/с).
3. BPSK-модуляция: несущая частота умножается на код.
4. Добавление AWGN с  $\text{SNR} = -15$  дБ.
5. Вычисление корреляционной функции между принятым и локально сгенерированным кодом.

#### **Результаты**

При  $\text{SNR} = -15$  дБ (очень слабый сигнал) корреляционный пик оказывается едва различимым на фоне шума. Это приводит к:

- частым ошибкам синхронизации;
- высокому значению BER (около  $10^{-1}$ );
- нестабильной работе PLL и DLL.

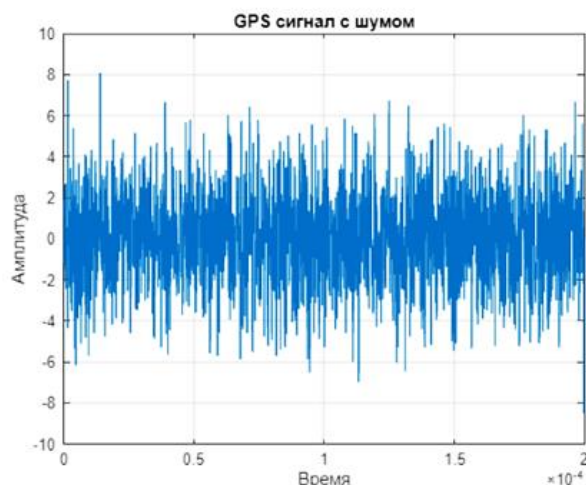


Рис.1. Результат моделирования GPS-сигнала в MATLAB (CDMA, SNR = -15 дБ)

При повышении SNR до 0 дБ и выше корреляционный пик становится ярко выраженным, BER снижается до  $10^{-4}$  и ниже.

#### Моделирование сигнала ГЛОНАСС (технология FDMA) в MATLAB

В отличие от GPS, российская система ГЛОНАСС использует **частотное разделение каналов (FDMA – Frequency Division Multiple Access)**. Каждый спутник ГЛОНАСС передаёт сигнал на **своей собственной несущей частоте**. Частоты разных спутников сдвинуты относительно друг друга на 0,5625 МГц. Основной диапазон – L1 (около 1602 МГц).

##### Реализация в MATLAB

Моделирование сигнала ГЛОНАСС в MATLAB включает:

1. Выбор частотного канала  $k$  (номера спутника).
2. Генерацию кода ST или VT.
3. BPSK-модуляцию на выбранной частоте.
4. Добавление AWGN (в работе использовано SNR = -10 дБ).
5. Анализ частотной синхронизации и межканальных помех.

##### Результаты

При SNR = -10 дБ сигнал ГЛОНАСС демонстрирует умеренную помехоустойчивость. Корреляционный пик заметен, но возможны сбои слежения за частотой. FDMA более чувствительна к частотным ошибкам, чем CDMA, однако при SNR  $\geq 0$  дБ система работает стабильно.

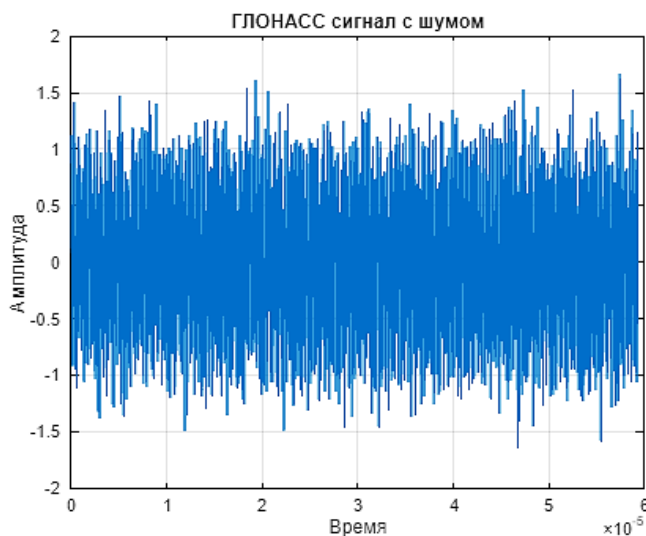


Рис.2. Результат моделирования ГЛОНАСС-сигнала в MATLAB (FDMA, SNR = -10 дБ)

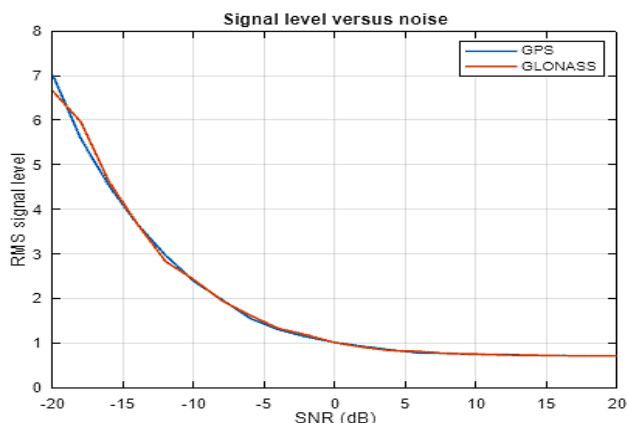
### Отношение сигнал/шум (SNR) и качество приёма

**SNR (Signal-to-Noise Ratio)** – это отношение мощности полезного сигнала к мощности шума. Это один из самых важных параметров, определяющих качество работы GNSS-приёмника.

- **Высокий SNR** (например, +5 дБ и выше): сигнал чистый, корреляционный пик высокий и узкий, PLL и DLL работают стабильно, BER очень низкий ( $<10^{-5}$ ).

- **Низкий SNR** (например, –15 дБ и ниже): сигнал почти скрыт шумом, корреляционный пик слабо различим, частоты срывы PLL, BER высокий ( $10^{-1} – 10^{-2}$ ).

На рисунке 3 показано, как меняется форма корреляционного пика в MATLAB при различных уровнях SNR.



**Рис.3.** Зависимость корреляционного пика от SNR (результаты MATLAB)

В таблице ниже обобщены результаты моделирования для обеих систем. Данные получены в MATLAB при частоте дискретизации 10 МГц и длительности кода 1 мс.

**Таблица 2.** Сравнительная таблица влияния SNR на GPS и ГЛОНАСС (на основе MATLAB-моделирования)

| Уровень SNR | GPS (CDMA) – результаты MATLAB                                             | ГЛОНАСС (FDMA) – результаты MATLAB                                                    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| –20 дБ      | Корреляционный пик не обнаруживается. Синхронизация невозможна. BER ~ 0,5. | Частотный сдвиг не определяется. Сигнал полностью скрыт шумом.                        |
| –15 дБ      | Пик едва различим. BER ~ $10^{-1}$ . PLL/DLL работают с частыми срывами.   | Пик слабый. Частотная синхронизация крайне нестабильна.                               |
| –10 дБ      | Пик начинает проявляться. BER ~ $10^{-2}$ . PLL/DLL работают с ошибками.   | Пик заметен, но возможны сбои слежения. FDMA показывает умеренную помехоустойчивость. |
| 0 дБ        | Хорошо выраженный пик. BER ~ $10^{-4}$ . Устойчивая работа PLL/DLL.        | Хорошая частотная синхронизация. Ошибки демодуляции низкие.                           |
| +5 дБ       | Чёткий высокий пик. BER < $10^{-5}$ . Надёжный приём навигационных данных. | Стабильный приём. Межканальные помехи незначительны.                                  |

**Анализ таблицы:**

- При  $\text{SNR} = -20$  дБ обе системы полностью неработоспособны.
- В диапазоне от  $-15$  дБ до  $-10$  дБ GPS и ГЛОНАСС показывают сопоставимую, но ограниченную помехоустойчивость. FDMA несколько более чувствительна к частотным ошибкам.
- При  $\text{SNR} \geq 0$  дБ обе системы обеспечивают надёжную навигацию.

**Практическая значимость моделирования в MATLAB**

Моделирование GNSS-сигналов в MATLAB имеет следующие практические преимущества:

- 1. Быстрое прототипирование** – можно за несколько минут проверить новую идею без разработки аппаратуры.
  - 2. Гибкость** – легко менять параметры (частоту дискретизации, тип кода, уровень шума, доплеровский сдвиг).
  - 3. Визуализация** – MATLAB позволяет строить графики корреляционных функций, спектров, BER и т.д.
  - 4. Экономия ресурсов** – моделирование намного дешевле полевых испытаний с реальными GNSS-приёмниками.
  - 5. Воспроизводимость** – результаты легко повторить и проверить.
- Разработчики GNSS-приёмников используют MATLAB для:
- оптимизации корреляторов;
  - настройки фильтров;
  - тестирования алгоритмов слежения (PLL/DLL);
  - анализа помехоустойчивости.

**Заключение**

В данной работе было выполнено компьютерное моделирование навигационных сигналов GPS и ГЛОНАСС в среде MATLAB. Основные выводы:

1. GPS использует CDMA (кодовое разделение), а ГЛОНАСС – FDMA (частотное разделение). Это определяет разные подходы к моделированию.
2. Уровень SNR является ключевым фактором, влияющим на корреляционный пик, BER и устойчивость PLL/DLL.
3. При  $\text{SNR} = -15$  дБ (для GPS) и  $\text{SNR} = -10$  дБ (для ГЛОНАСС) обе системы работают на пределе своих возможностей.
4. Представленная сравнительная таблица наглядно показывает, что при  $\text{SNR} \geq 0$  дБ обе системы обеспечивают надёжный приём.
5. MATLAB является мощным и удобным инструментом для исследования GNSS-алгоритмов, позволяя тестировать их без реального оборудования.

Результаты моделирования могут быть использованы при разработке и оптимизации реальных GNSS-приёмников, особенно для работы в условиях слабого сигнала (внутри помещений, в плотной городской застройке, под кронами деревьев).

**Список использованных источников**

1. Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2017). Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. 3rd ed. Artech House.
2. GLONASS Interface Control Document (ICD) – Russian Institute of Space Device Engineering.
3. MATLAB Documentation: GNSS Toolbox / Communications Toolbox (MathWorks, 2023).
4. Misra, P., & Enge, P. (2011). Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance. 2nd ed. Ganga-Jamuna Press.