# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО КОДА СИГНАЛА СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

## Чан Ньейн Чжо

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

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования процессов моделирования и генерации псевдослучайных кодов, используемых в системе ГЛОНАСС. Рассматриваются принципы работы линейных регистров сдвига с обратной связью (LFSR), а также влияние порождающих полиномов на формирование дальномерных кодов. Рассмотрены варианты реализации дальномерного кода стандартной и высокой точности. Проведен анализ их автокорреляционных свойств, эффективности разделения сигналов и влияния на синхронизацию системы. Обоснован выбор оптимального полинома с учетом требований навигационной инфраструктуры, вычислительной сложности и эксплуатационных характеристик системы.

## Введение

Спутниковые навигационные системы играют ключевую роль в обеспечении точного позиционирования и синхронизации данных во многих сферах, включая транспорт, геодезию и телекоммуникации. Одной из таких систем является ГЛОНАСС – российская глобальная навигационная спутниковая система, обеспечивающая непрерывное определение координат и времени.

Ключевым элементом работы ГЛОНАСС является формирование дальномерных кодов, основанных на псевдослучайных последовательностях (PRN-кодах). Эти коды позволяют улучшить точность навигационных измерений, обеспечить устойчивость сигнала к помехам и реализовать надежную синхронизацию приемника со спутником.[1]

### Основная часть

В навигационной системе дальномерные коды генерируются с использованием линейных регистров сдвига с обратной связью (LFSR), что позволяет создавать последовательности максимальной длины с хорошими корреляционными свойствами. Основным параметром формирования PRN-кодов является порождающий полином, определяющий структуру кодовой последовательности. В данной работе рассмотрены два порождающих полинома:

1) **G(x) = 1 + x<sup>5</sup> + x<sup>9</sup>** (9-разрядный регистр сдвига);

2) **G(x) = 1 + x<sup>3</sup> + x<sup>5</sup>** (5-разрядный регистр сдвига)

На рисунке 1 представлена упрощенная структурная схема формирования кода дальномера на основе полинома  $G(x) = 1 + x^5 + x^9$ . [2]



Рисунок 1 – Структурная схема формирования дальномерного кода

Для формирования дальномерного кода согласно предложенной схеме рисунка 1 была использована среда MATLAB. В ходе моделирования были получены графические представления изменения состояния регистра сдвига во времени (рисунки 2-3). Проведенные вычислительные эксперименты показали, что выбор порождающего полинома влияет на ключевые характеристики системы: точность временной синхронизации, устойчивость к внешним воздействиям и сложность реализации алгоритмов.



Рисунок 2 – Результат формирование кода дальномера для 9-разрядный регистр сдвига



Рисунок 3 – Результат формирование кода дальномера для 5-разрядного сдвигового регистра

Сформированный код дальномера для 9-разрядного регистра сдвига был представлен в виде битов, где белый цвет означает 1, а черный – 0.

Таблица 1 – Результат формирование кода дальномера для 9-разрядный регистр сдвига

Шаг сдвига	Бит
1	0 1 1 1 1 1 1 1
2	0 0 1 1 1 1 1 1 1
3	0 0 0 1 1 1 1 1 1
4	0 0 0 0 1 1 1 1 1
5	0 0 0 0 0 1 1 1 1
 99	0 1 0 1 1 0 1 1 0
последний код	0 1 0 1 1 0 1 1 0

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Для полинома G(x) = 1 + x<sup>5</sup> + x<sup>9</sup> (9-разрядный регистр сдвига):

– данная конфигурация генерирует последовательность максимальной длины, обеспечивая высокую степень автокорреляции;

– визуализация процесса показала равномерное распределение битов во времени, что подтверждает устойчивость к помехам;

код отличается сложной структурой, что способствует эффективному разделению

сигналов.

## 2. Для полинома G(x) = 1 + x<sup>3</sup> + x<sup>5</sup> (5-разрядный регистр сдвига):

– формируемая последовательность имеет меньшую длину, но отличается более высокой вычислительной эффективностью;

- зафиксировано периодическое повторение битов, что упрощает синхронизацию в приемной системе;

 применимость данной модели оправдана в условиях ограниченных ресурсов вычислений.

Таким образом, выбор порождающего полинома оказывает влияние на качество навигационного сигнала. Модели с более длинными последовательностями подходят для условий повышенных требований к разделению сигналов, а упрощенные структуры регистров применимы в системах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Коды L1OCd в системе ГЛОНАСС (Рисунок 4) представляют собой коды Голда длиной 1023 бита с периодом 2 миллисекунды. Эти коды генерируются с использованием двух 10-разрядных регистров сдвига с обратной связью (LFSR). Первый регистр (HC1) использует фиксированные точки обратной связи на позициях 7 и 10, в то время как второй регистр (HC2) динамически инициализируется на основе системного номера спутника с точками обратной связи на позициях 3, 7, 9 и 10. Выходы регистров объединяются операцией ХОR для формирования дальномерного кода. Эта конструкция обеспечивает высокие свойства автокорреляции, улучшая синхронизацию сигналов и устойчивость к помехам.[2]



Рисунок 4 — Структурная схема формирования дальномерного кода L1Ocd

Данное изображение представляет визуализацию дальномерного кода L1OCd для спутника (ID: 1) в градациях серого (Рисунок 5). Ось X отображает индексы битов кода, а ось Y соответствует последовательным шагам сдвига. Белые и чёрные ячейки обозначают двоичные значения (1 и 0) соответственно. Диагональные узоры отражают структурированную и периодическую природу дальномерного кода, что важно для повышения синхронизации и разделения сигналов в спутниковых навигационных системах. Этот визуальный анализ демонстрирует надёжность и чёткость сформированной последовательности кода.



Рисунок 5 – Результат формирование кода дальномера для дальномерного кода L1Ocd

На Рисунок 6 проиллюстрирован структурный процесс генерации кода определения местоположения L1OCp в системе ГЛОНАСС. В нем используются два сдвиговых регистра: ЦА1 с 12 ступенями и ответвлениями обратной связи в положениях 6, 8, 11 и 12, и ЦА2 с 6 ступенями и ответвлениями обратной связи в положениях 1 и 6. Начальные состояния ЦА1 и ЦА2 определяются фиксированными и динамическими двоичными последовательностями соответственно. Конечный результат, обозначенный как DKL1OCr, представляет собой сгенерированный код после суммирования по модулю 2, работающий на частоте 0,5115 МГц с периодом повторения 8 мс. Такая конструкция обеспечивает надежную синхронизацию и уникальность кода во всех спутниковых системах.[2]



Рисунок 6 — Структурная схема формирования дальномерного кода L1OCd

Рисунок 7 демонстрирует визуализацию дальномерного кода L1OCp, сгенерированного для спутника с ID 1 в системе ГЛОНАСС. Ось Х представляет индексы битов кода ("Индекс бита кода"), а ось Ү обозначает индексы строк кода ("Индекс строки кода"). Черные и белые области соответствуют двоичным значениям (0 и 1), эффективно подчеркивая структуру и узоры кода L1OCp. Эта структурированная периодичность, запечатленная на изображении, обеспечивает надежную синхронизацию и разделение сигналов, что важно для точности и надежности в системах спутниковой навигации.



Рисунок 7 – Результат формирование кода дальномера для дальномерного кода L1Ocd

Схема на рисунке 8 иллюстрирует процесс генерации дальномерного сигнала L2OCp в системе ГЛОНАСС. Сигнал формируется с использованием двух регистров сдвига, ЦА1 и ЦА2, работающих с тактовой частотой 0,5115 МГц и периодом повторения 20 мс. ЦА1 имеет 14 ступеней с точками обратной связи на позициях 4, 8, 13 и 14, а ЦА2 – 7 ступеней с точками обратной связи на позициях 4, 8, 13 и 14, а ЦА2 – 7 ступеней с точками обратной связи на позициях 6 и 7. Начальные состояния, обозначенные как НС1 и НС2, определяются фиксированными и динамическими последовательностями на основе системного номера спутника. Эти регистры создают двоичные выходные последовательности, которые суммируются по модулю 2 для генерации уникального кода L2OCp. Схема также подчеркивает связь HC2 = j + 64, где j соответствует системному номеру спутника в орбитальной группировке. Такой подход обеспечивает надежность сигнала и эффективную синхронизацию для решения навигационных задач.[2]



Рисунок 8 — Структурная схема формирования дальномерного кода L2OCp

Рисунок 9 демонстрирует визуализацию дальномерного кода L2OCp, сгенерированного для определённого спутника с ID 1. Горизонтальная ось, обозначенная как "Индекс бита кода," представляет последовательные индексы битов кода, а вертикальная ось, обозначенная как "Шаг сдвига," иллюстрирует прогрессию циклических сдвигов, применяемых к коду. Чёрные и белые области соответствуют двоичным значениям (1и 0) последовательности кода. Эта визуализация эффективно подчёркивает структурированную и периодическую природу дальномерного кода L2OCp, что имеет ключевое значение для синхронизации и надёжности сигнала в системах спутниковой связи



Рисунок 9 – Результат формирование кода дальномера для дальномерного кода L2OCp

Визуализация на рисунке 9 показывает периодическую и структурированную природу дальномерного кода L2OCp для спутника с ID 1 в системе ГЛОНАСС. Последовательные строки отображают сдвиги в последовательности битов кода, а чередующиеся черно-белые области отражают двоичные значения. Диаграмма подчеркивает надежность и уникальность дальномерного кода L2OCp, который играет ключевую роль в обеспечении точной синхронизации и целостности сигнала в спутниковой навигации. Это представление предоставляет интуитивное понимание поведения кода, поддерживая его применение в надежных системах связи и позиционирования.

## Заключение

В ходе моделирования и формирования дальномерного кода сигнала было подтверждено, что выбор порождающего полинома и параметры линейного регистра сдвига оказывают значительное влияние на точность и устойчивость навигационного сигнала. Анализ двух конфигураций показал, что первая обеспечивает более надежную автокорреляцию и устойчивость к помехам, тогда как вторая повышает вычислительную эффективность. Результаты моделирования подтвердили необходимость стратегического подхода к выбору параметров формирования дальномерного кода для повышения качества работы системы ГЛОНАСС. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию алгоритмов кодирования с учетом изменяющихся условий радиосигналов и требований к точности позиционирования.

#### Список использованных источников

абак В. П., Конін В. В., Харченко В. П. Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2004. – 328 с. 2. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2.–2010.– (http://russianspacesystems.ru/ wp-content/uploads/2016/08/ICD\_GLONASS\_rus\_v5.1.pdf).