

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ X1A, X1B, X2A, X2B ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ P-КОДА GPS-СИГНАЛОВ

Ньян Лин Тун

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

Аннотация: В статье рассматривается процесс моделирования псевдослучайных последовательностей X1A, X1B, X2A, X2B и их комбинации для формирования P-кода в GPS-сигналах. Эти последовательности генерируются с помощью линейных регистров сдвига с обратной связью (LFSR) и являются ключевыми элементами спутниковой навигации. Моделирование этих сигналов позволяет анализировать структуру GPS-кодов, проверять их псевдослучайные свойства и адаптировать алгоритмы приема сигнала. В статье приводятся математические основы генерации последовательностей, методика их моделирования в MATLAB, а также анализ полученных данных.

Введение

Система глобального позиционирования (GPS) основана на передаче сигналов с орбитальных спутников, обеспечивающих точное определение местоположения различных объектов. Ключевым элементом этих сигналов являются псевдослучайные последовательности, используемые для кодирования информации. Они создаются с помощью линейных регистров сдвига с обратной связью (LFSR), что позволяет получать детерминированные, но внешне случайные сигналы. Основными составляющими GPS-кода являются последовательности X1A, X1B, X2A, X2B, которые затем комбинируются в P-код. Этот код служит для идентификации спутников и разделения сигналов между ними, что делает возможным точное определение координат на поверхности Земли.

Принципы генерации последовательностей X1A, X1B, X2A, X2B

Линейные регистры сдвига (LFSR)

Основным инструментом генерации X1A, X1B, X2A и X2B являются линейные регистры сдвига с обратной связью (LFSR). Они представляют собой цепочки битов, которые изменяются по заданному правилу, определяемому многочленом. Каждая последовательность генерируется с использованием своего начального состояния и набора обратных связей (*taps*), выраженного многочленом. Например:

- X1A использует *taps* [6, 8, 11, 12] с периодом 4092 бита.
- X1B — *taps* [1, 2, 5, 8, 9, 10, 11, 12] с периодом 4093 бита.
- X2A — *taps* [1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12], период 4092 бита.
- X2B — *taps* [2, 3, 4, 8, 9, 12], период 4093 бита.

Обратная связь формируется с помощью операции XOR определённых битов регистра, затем выполняется сдвиг вправо, и новый бит вставляется в начало. Таким образом, шаг за шагом формируется P-код.

Формирование P-кода

После генерации X1 и X2 последовательностей необходимо сформировать уникальный P-код для каждого спутника. Это осуществляется следующим образом:

1. Создание X1

- X1 формируется через XOR между X1A и X1B:

$$X1 = X1A \oplus X1B \quad (1)$$

- Полученная последовательность одинакова для всех спутников.

2. Создание X2i

- X2 формируется через XOR между X2A и X2B:

$$X2 = X2A \oplus X2B \quad (2)$$

- Однако X2 не используется напрямую, а подвергается циклическому сдвигу (задержке) на i битов, где i — уникальное значение для каждого спутника (*PRN*).
- Это создаёт уникальную последовательность X2i для каждого *PRN*.

3. Формирование Р-кода

- Финальный Р-код получается через XOR между X1 и X2i:

$$P\text{-code} = X1 \oplus X2i \quad (3)$$

- Это обеспечивает различимость сигналов от разных спутников и позволяет GPS-приёмникам корректно идентифицировать данные.

Моделирование последовательностей в среде MATLAB

На рисунке 1 представлены результаты моделирования формирования последовательности X1A.

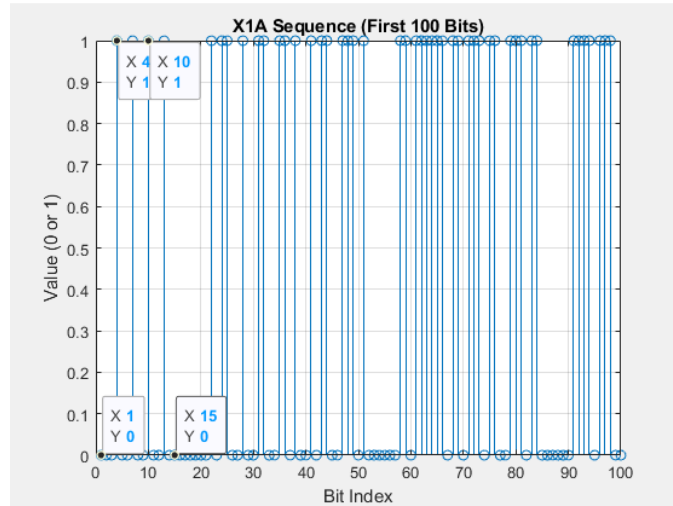


Рисунок.1- Генерация X1A с помощью LFSR (линейного регистра сдвига с обратной связью)

Диаграмма представляет первые 100 бит последовательности X1A, которая является важным компонентом GPS-сигнала. Эта последовательность генерируется с использованием линейного регистра сдвига с обратной связью (LFSR), состоящего из 12 стадий, и обеспечивает псевдослучайное поведение сигнала. X1A формируется в соответствии с характеристическим многочленом и использованием *taps* на позициях 6, 8, 11 и 12. Бинарные значения (0 и 1) распределены таким образом, чтобы минимизировать корреляцию с другими GPS-сигналами, гарантируя точность позиционирования и надёжность навигации. Аннотированные точки на графике подчёркивают ключевые моменты изменения бита, подтверждая соответствие структуры X1A требованиям Р-кода. Эта визуализация служит подтверждением корректности алгоритма генерации и анализа GPS-сигнала.

Формирование кода X1B представлено на рис.2.

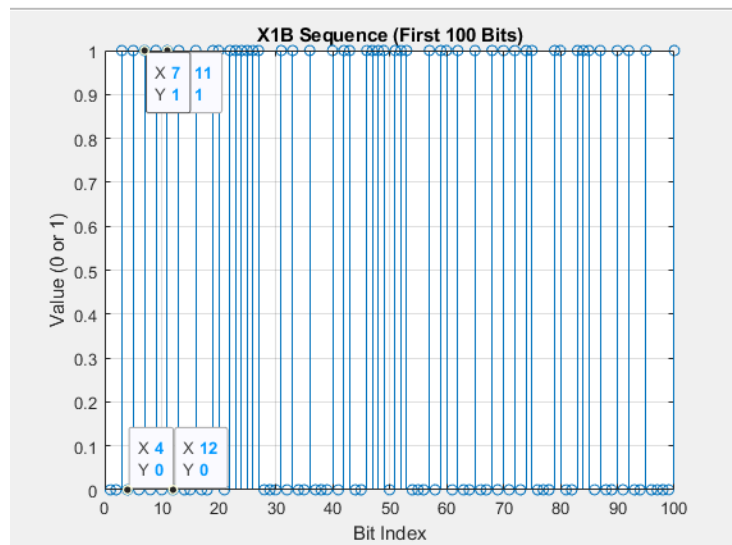


Рисунок.2- Генерация X1B с использованием обратных связей и начального состояния регистра

Диаграмма представляет первые 100 бит последовательности X1B, одного из ключевых компонентов GPS-сигнала. Эта последовательность формируется с использованием линейного регистра сдвига с обратной связью (*LFSR*), который работает на основе 12-разрядного регистра и специфического набора taps: [1, 2, 5, 8, 9, 10, 11, 12]. Основное назначение X1B — обеспечить псевдослучайность и уникальность GPS-кода, предотвращая перекрытие сигналов между спутниками.

Как видно из диаграммы, последовательность X1B характеризуется чередованием значений 0 и 1, что подтверждает её детерминированную, но внешне случайную природу. Отмеченные точки (7, 1 и 4, 0) показывают изменение состояния бита, важное для анализа структуры последовательности. Этот график служит инструментом для визуального подтверждения корректности генерации X1B, что является важным шагом при моделировании P-кода в GPS-системах.

Результаты моделирования формирования последовательности X2A представлены на рис.3.

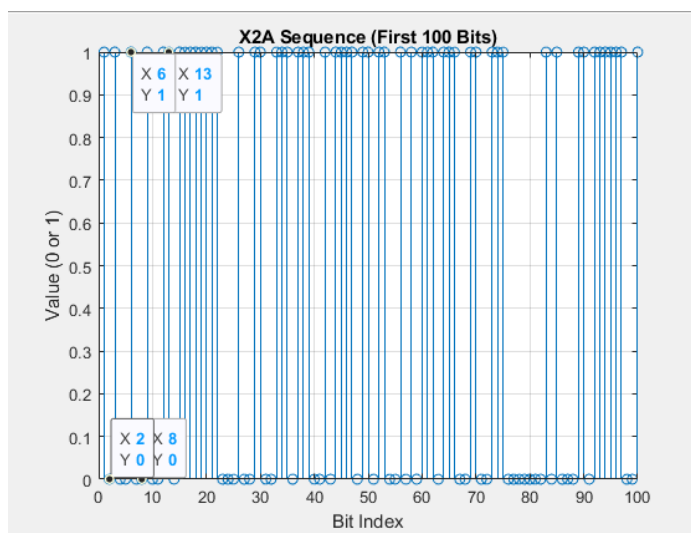


Рисунок.3 - Псевдослучайная последовательность X2A, формируемая для GPS-кодирования

Графически представлены первые 100 бит последовательности X2A, которая играет важную роль в кодировании GPS-сигналов. Последовательность X2A генерируется с помощью линейного регистра сдвига с обратной связью (*LFSR*) с taps на позициях [1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. На графике видно, что значения 0 и 1 чередуются псевдослучайным образом, обеспечивая низкую корреляцию с другими GPS-сигналами. Аннотированные точки (6,1) и (13,1) показывают места, где значение бита равно 1, а (2,0) и (8,0) указывают позиции с 0. Эти характеристики делают X2A критически важной для формирования X2, который затем подвергается задержке и участвует в генерации P-кода. Визуализация X2A подтверждает правильность работы *LFSR* и его соответствие требованиям GPS-навигации.

Рис.4 описывает поведение бинарной последовательности X2B.

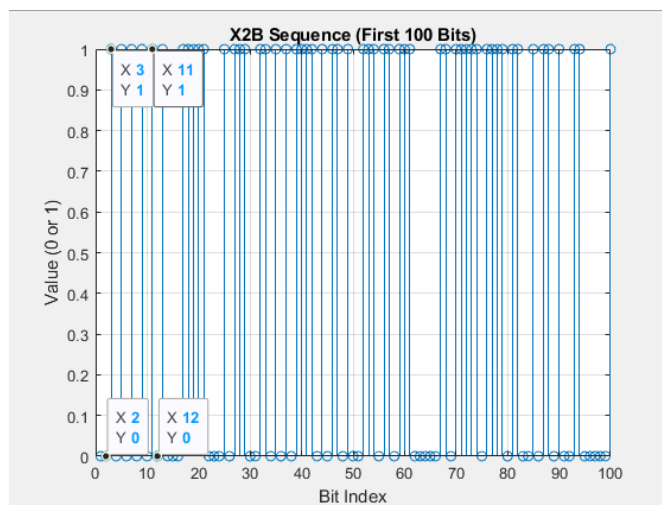


Рисунок.4 - Бинарная последовательность X2B с низкой корреляцией, используемая в X2

Диаграмма иллюстрирует первые 100 бит последовательности X2B, которая является ключевым элементом GPS-сигнала. Она формируется с использованием линейного регистра сдвига с обратной связью (*LFSR*) с taps на позициях [2, 3, 4, 8, 9, 12], обеспечивая псевдослучайные свойства.

На графике видно, что значения 0 и 1 распределены в псевдослучайном порядке, что как уже отмечалось выше важно для низкой корреляции между спутниковыми сигналами. Аннотированные точки (3,1) и (11,1) показывают места, где значение бита равно 1, а (2,0) и (12,0) указывают позиции с 0. Эта последовательность участвует в формировании X2, который затем подвергается задержке для создания X2i и дальнейшей генерации Р-кода. Анализ графика X2B подтверждает корректность работы *LFSR* и его соответствие требованиям GPS-навигации.

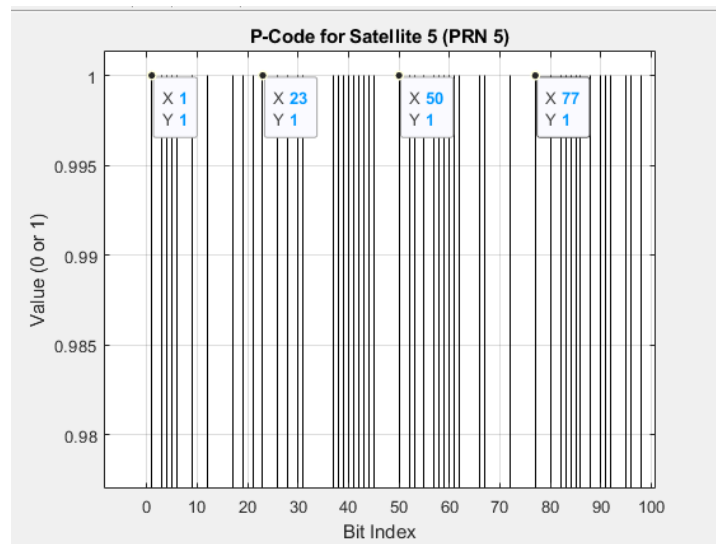


Рисунок.5 - Итоговый GPS Р-код, созданный путём XOR между X1 и X2i

Рис.5 иллюстрирует первые 100 бит последовательности Р-кода: его псевдослучайное распределение, низкую корреляцию, важность индивидуального сдвига X2i и корректность работы алгоритма генерации. Р-код, который создаётся путём выполнения операции XOR между последовательностью X1 и индивидуально сдвинутой последовательностью X2i, специфичной для каждого спутника GPS.

На рис.5 введены следующее обозначения:

- Ось X (индекс бита): Отображает положение каждого бита в Р-коде, с диапазоном от 0 до 100. Это соответствует длине последовательности.
- Ось Y (значение): Бинарный сигнал, принимающий значения `0` или `1`, демонстрируя псевдослучайную структуру кода.

Ось X (индекс бита)	P-код
1	1
2	0
3	1
4	1
5	1
6	1
7	0
8	0
9	1
10	0
...	...
100	0

Заключение

Моделирование последовательностей X1A, X1B, X2A, X2B и генерация P-кода играет ключевую роль в спутниковых системах позиционирования. Использование *LFSR*, математических операций XOR и методики задержки сигнала обеспечивает уникальность кодов и их псевдослучайные свойства. Применение среды *MATLAB* позволяет эффективно моделировать вышеуказанные последовательности, анализировать их структуру и верифицировать работоспособность алгоритмов.

Таким образом, предлагаемые подходы к моделированию формирования псевдослучайных последовательностей *GPS* сигналов являются важными и актуальными для разработки навигационных систем и оптимизации *GPS*-приёмников.

Литература

1. Каплан, Э. Д. и Хегарти, К. Дж. «Понимание GPS: принципы и приложения». Artech House, 2006.
2. Мисра, П. и Энге, П. Глобальная система позиционирования: сигналы, измерения и производительность. Ganga-Jamuna Press, 2011.
3. Цуй, Дж. Б. Основы приемников глобальной системы позиционирования: программный подход. Wiley, 2004.
4. Ван Дирендонк, А. Дж. «GPS-приемники». Труды IEEE по аэрокосмическим и электронным системам, 1996 г.
5. Псиаки, М. Л. «Блокировка слабых сигналов GPS в программном приемнике». Труды IEEE, 2004 г.
6. Фонтана, Р. Д., Чунг, В. и Стэнселл, Т. А. «Модернизированный гражданский сигнал L2». Труды конференции ION GPS/GNSS, 2001 г.

Reference

1. Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. "Understanding GPS: Principles and Applications". Artech House, 2006.
2. Misra, P., & Enge, P. Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance. Ganga-Jamuna Press, 2011.
3. Tsui, J. B. Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach. Wiley, 2004.
4. Van Dierendonck, A. J. "GPS Receivers". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996.
5. Psiaki, M. L. "Block Acquisition of Weak GPS Signals in a Software Receiver". Proceedings of the IEEE, 2004.
6. Fontana, R. D., Cheung, W., & Stansell, T. A. "The Modernized L2 Civil Signal". ION GPS/GNSS Conference Proceedings, 2001.