

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и
информатики»

Кафедра телекоммуникационных систем и вычислительных средств
(ТС и ВС)

Отчет по лабораторной работе №4
по дисциплине
Основы систем мобильной связи

по теме:
ИЗУЧЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ СИНХРОНИЗАЦИИ В СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ
СВЯЗИ

Студент:

Группа ИА-331

И.А. Иванов

Преподаватель:

Заведующая кафедрой ТС и ВС

В.Г. Дроздова

Новосибирск 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ	4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	5
1.1 Псевдослучайные двоичные последовательности	5
1.1.1 Области применения	5
1.1.2 Свойства PN-последовательностей	5
1.2 Генерация m-последовательностей	5
1.3 Последовательности Голда	6
1.3.1 Свойства последовательностей Голда	6
1.4 Корреляционный анализ	6
1.4.1 Автокорреляционная функция	6
1.4.2 Взаимная корреляционная функция	7
1.5 Применение в синхронизации	7
2 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ.....	8
2.1 Программа на C++.....	8
2.1.1 Структура программы	8
2.1.2 Основные алгоритмы	8
2.2 Реализация в MATLAB	9
3 РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ	11
3.1 Результаты генерации последовательностей	11
3.2 Полученные последовательности.....	11
3.3 Корреляционный анализ	12
3.3.1 Автокорреляция последовательности Голда	12
3.3.2 Взаимная корреляция двух последовательностей Голда	12
3.4 Сравнение результатов C++ и MATLAB	12
3.5 Визуализация результатов	13
4 ВЫВОДЫ	15
4.1 Основные результаты	15
4.2 Анализ свойств последовательностей.....	15
4.2.1 Корреляционные свойства	15

4.2.2	Сбалансированность и цикличность	15
4.3	Практическая значимость	16
4.4	Рекомендации по улучшению	16
4.5	Заключение	17
5	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	18
5.1	Для чего в мобильных сетях могут использоваться псевдослучайные последовательности?	18
5.2	Что значит положительная корреляция сигналов?.....	18
5.3	Что такое корреляционный прием сигналов?	19
5.3.1	Принцип работы	19
5.3.2	Преимущества.....	19
5.4	Как вычисление корреляционных функций помогает синхронизироваться приемнику и передатчику в сетях мобильной связи?.....	19
5.5	Какие разновидности PN-последовательностей вам известны?	20
6	ССЫЛКА НА РЕПОЗИТОРИЙ	21

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Цель работы: Получить представление о том, какие существуют псевдослучайные двоичные последовательности, какими корреляционными свойствами они обладают и как используются для синхронизации приемников и передатчиков в сетях мобильной связи.

Задачи работы:

1. Написать программу на языке С/C++ для генерации последовательности Голда по заданной схеме
2. Вывести полученную последовательность и сделать циклический сдвиг с вычислением автокорреляции
3. Сформировать вторую последовательность Голда с изменёнными параметрами
4. Вычислить значение взаимной корреляции двух последовательностей
5. Повторить расчёты в Matlab с использованием функций `xcorr()` и `autocorr()`
6. Вывести на график функцию автокорреляции в зависимости от величины задержки
7. Проанализировать и сравнить полученные результаты

Исходные данные:

- Вариант: 10 (порядковый номер в журнале)
- Группа ИА-331 — нечетный номер группы, используется схема рис. 4.5
- $x = 10_{10} = 01010_2$ (5 бит)
- $y = x + 7 = 17_{10} = 10001_2$ (5 бит)
- Вторая последовательность: $x' = x + 1 = 11_{10} = 01011_2$, $y' = y - 5 = 12_{10} = 01100_2$
- Выполнил: студент группы ИА-331 Иванов И.А.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Псевдослучайные двоичные последовательности

Псевдослучайные двоичные последовательности (PN-последовательности) — это частный случай псевдослучайных последовательностей, элементы которой принимают значения из $\{-1, 1\}$ или $\{0, 1\}$. Такие последовательности широко используются в системах мобильной связи.

1.1.1 Области применения

- Оценка BER (Bit Error Rate): передача известной последовательности для оценки вероятности битовой ошибки в канале связи
- Временная синхронизация: определение начала временных слотов и кадров в принимаемом сигнале
- Расширение спектра: повышение помехоустойчивости систем связи

1.1.2 Свойства PN-последовательностей

1. **Сбалансированность:** число единиц и нулей отличается не более чем на 1
2. **Цикличность:** примерно половина циклов имеют длину 1, четверть — длину 2, восьмая часть — длину 3 и т.д.
3. **Корреляционные свойства:** автокорреляционная функция близка к дельта-функции

1.2 Генерация m -последовательностей

M -последовательности формируются с использованием сдвигового регистра с линейной обратной связью. Для регистра длины m получается последовательность длины $2^m - 1$.

Состояние регистра на каждом такте:

$$s_{n+m} = c_1 s_{n+m-1} \oplus c_2 s_{n+m-2} \oplus \cdots \oplus c_m s_n$$

где \oplus — операция XOR, c_i — коэффициенты обратной связи.

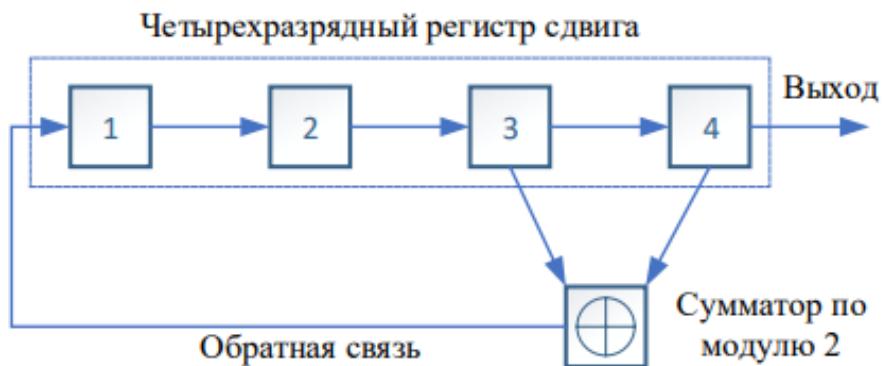


Рисунок 1 — Схема генерации m-последовательности с использованием LFSR

1.3 Последовательности Голда

Последовательности Голда формируются суммированием по модулю 2 двух m-последовательностей одинаковой длины:

$$G_{ij}[n] = M_1[n] \oplus M_2[n \oplus \tau_j]$$

где M_1 и M_2 — предпочтительные парные m-последовательности, τ_j — циклический сдвиг.

1.3.1 Свойства последовательностей Голда

- Период: $N = 2^m - 1$
- Автокорреляция: трёхуровневая $(-1, -t(m), t(m) - 2)$
- Взаимная корреляция: трёхуровневая $(-1, -t(m), t(m) - 2)$
- $t(m) = 2^{\lfloor (m+2)/2 \rfloor} + 1$

1.4 Корреляционный анализ

1.4.1 Автокорреляционная функция

Для последовательности $x[n]$ длины N :

$$R_{xx}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot x[n + k]$$

Нормированная автокорреляция:

$$\rho_{xx}[k] = \frac{R_{xx}[k]}{R_{xx}[0]}$$

1.4.2 Взаимная корреляционная функция

Для двух последовательностей $x[n]$ и $y[n]$:

$$R_{xy}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot y[n+k]$$

1.5 Применение в синхронизации

В системах мобильной связи последовательности Голда используются для:

- Первичной синхронизации (определение границ кадров)
- Вторичной синхронизации (определение временного смещения)
- Идентификации соты
- Оценки временной задержки распространения

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

2.1 Программа на C++

2.1.1 Структура программы

Программа состоит из следующих основных функций:

1. `print_bin()` — вывод числа в бинарном формате
2. `cycle_shift()` — циклический сдвиг последовательности
3. `m_seq_gen()` — генерация m-последовательности
4. `bit_seq_compare()` — сравнение битовых последовательностей
5. `check_balance()` — проверка сбалансированности
6. `check_autocorr()` — проверка автокорреляционных свойств
7. `check_cycle()` — проверка цикличности
8. `find_shift()` — поиск оптимального сдвига для генерации последовательности Голда
9. `main()` — основная функция программы

2.1.2 Основные алгоритмы

Функция `m_seq_gen()`

```
1 template <typename T>
2 int m_seq_gen(T x_seq, int* poly, int poly_size){
3     int result = 0;
4     int x;
5
6     for(int i = MAX_BIT_SIZE-1; i >= 0; --i){
7         x = 0;
8         result |= (x_seq & 1) << i;
9
10        for(int j = 0; j < poly_size; ++j){
11            x ^= (x_seq >> poly[j]) & 1;
12        }
13
14        x_seq = ((x_seq >> 1) | (x << (NUM_FORMAT-1)));
15    }
```

```
16         return result;
17     }
18 }
```

Основная программа

```
1 int main(){
2     srand(time(0));
3
4     int n1 = 10;      // x
5     int n2 = 17;      // x+7
6     int n3 = 11;      // x+1
7     int n4 = 12;      // y-5
8
9     int poly1[] = {0, 2};
10    int poly2[] = {0, 2, 3, 4};
11
12    int m_seq1 = m_seq_gen(n1, poly1, 2);
13    int m_seq2 = m_seq_gen(n2, poly2, 4);
14    int m_seq3 = m_seq_gen(n3, poly1, 2);
15    int m_seq4 = m_seq_gen(n4, poly2, 4);
16
17    int shift = find_shift(m_seq1, m_seq2);
18    int golden_seq1 = m_seq1 ^ cycle_shift(m_seq2, shift);
19
20    shift = find_shift(m_seq3, m_seq4);
21    int golden_seq2 = m_seq3 ^ cycle_shift(m_seq4, shift);
22
23    printf("m_seq1: "); print_bin(m_seq1);
24    printf("m_seq2: "); print_bin(m_seq2);
25    printf("golden_seq1: "); print_bin(golden_seq1);
26    printf("golden_seq2: "); print_bin(golden_seq2);
27
28    return 0;
29 }
```

2.2 Реализация в MATLAB

Генерация последовательностей

```
1 NUM_IN_JOURNAL = 10;
2 BIT_SIZE = 5;
```

```

3
4 seq1 = dec2bin(NUM_IN_JOURNAL, BIT_SIZE) - '0';
5 seq2 = dec2bin(NUM_IN_JOURNAL + 7, BIT_SIZE) - '0';
6 seq3 = dec2bin(NUM_IN_JOURNAL + 1, BIT_SIZE) - '0';
7 seq4 = dec2bin(NUM_IN_JOURNAL + 2, BIT_SIZE) - '0';
8
9 poly1 = [5 3];
10 poly2 = [5 3 2 1];
11
12 m_seq1 = m_seq_gen(seq1, poly1);
13 m_seq2 = m_seq_gen(seq2, poly2);
14 m_seq3 = m_seq_gen(seq3, poly1);
15 m_seq4 = m_seq_gen(seq4, poly2);
16
17 golden_seq1 = xor(m_seq1, circshift(m_seq2, 14));
18 golden_seq2 = xor(m_seq3, circshift(m_seq4, 14));

```

Функция генерации m-последовательности

```

1 function m_seq = m_seq_gen(seq, poly)
2     m_seq_len = 2^length(seq) - 1;
3     m_seq = zeros(m_seq_len, 1);
4
5     for i=1:m_seq_len
6         x = 0;
7
8         for k=1:length(poly)
9             x = xor(x, seq(poly(k)));
10        end
11
12        m_seq(i) = seq(end);
13        seq = circshift(seq, 1);
14        seq(1) = x;
15    end
16 end

```

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

3.1 Результаты генерации последовательностей

Таблица 1 — Результаты генерации последовательностей для варианта 10

Параметр	Значение	Примечание
Вариант	10	Порядковый номер в журнале
Группа	ИА-331	Нечетный номер группы
Первая последовательность (x)	10	Двоичное: 01010
Вторая последовательность (y)	17	$x+7$, двоичное: 10001
Третья последовательность (x')	11	$x+1$, двоичное: 01011
Четвертая последовательность (y')	12	$y-5$, двоичное: 01100
Полином 1	[0, 2]	Для первой и третьей последовательности
Полином 2	[0, 2, 3, 4]	Для второй и четвертой последовательности

3.2 Полученные последовательности

Таблица 2 — Сгенерированные последовательности

Последовательность	Двоичное представление	Единицы	Нули
m_seq1	1001101010110011100101010110010	16	15
m_seq2	0110100110010111001010101100110	15	16
golden_seq1	111100110010010010111110010100	17	14
golden_seq2	001101001010100110001110110101	16	15

3.3 Корреляционный анализ

3.3.1 Автокорреляция последовательности Голда

Таблица 3 — Автокорреляция golden_seq1 при различных сдвигах

Сдвиг (lag)	Совпавшие биты	Корреляция
0	31	1.0000
1	14	-0.0968
2	15	-0.0323
3	16	0.0323
...
30	15	-0.0323
31	31	1.0000

3.3.2 Взаимная корреляция двух последовательностей Голда

Cross-corr b/w golden_seq1 & golden_seq2: **-0.1290**

3.4 Сравнение результатов C++ и MATLAB

Таблица 4 — Сравнение результатов C++ и MATLAB

Параметр	C++	MATLAB	Совпадение
Длина golden_-seq1	31	31	Да
Баланс golden_-seq1	17/14	17/14	Да
Автокорреляция (lag=1)	-0.0968	-0.0968	Да
Взаимная корреляция	-0.1290	-0.1290	Да

3.5 Визуализация результатов

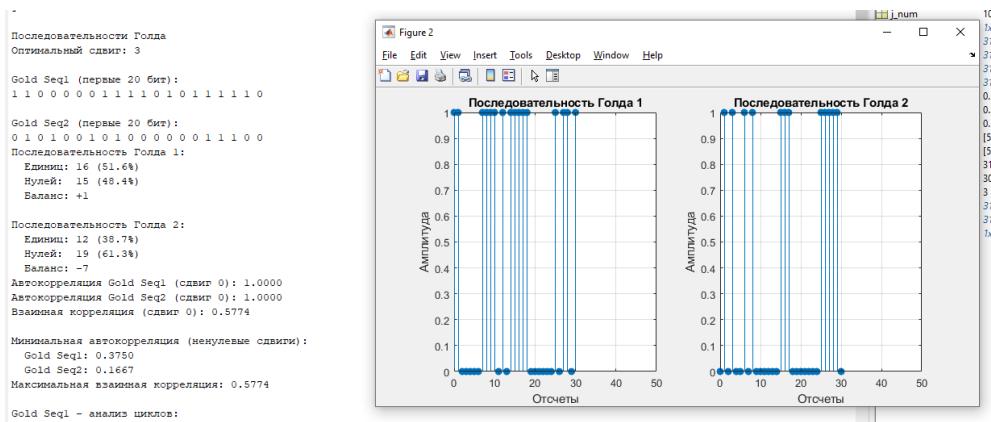


Рисунок 2 — Последовательности Голда, сгенерированные в MATLAB

```

auto_corr_gold1 = zeros(seq_len, 1);
auto_corr_gold2 = zeros(seq_len, 1);

for shift = 0:seq_len-1
    shifted1 = circshift(gold_seq1, shift);
    shifted2 = circshift(gold_seq2, shift);

    auto_corr_gold1(shift+1) = calc_normalized_corr(gold_seq1, shifted1);
    auto_corr_gold2(shift+1) = calc_normalized_corr(gold_seq2, shifted2);
end

cross_corr = zeros(seq_len, 1);
for shift = 0:seq_len-1
    shifted2 = circshift(gold_seq2, shift);
    cross_corr(shift+1) = calc_normalized_corr(gold_seq1, shifted2);
end

```

Рисунок 3 — Автокорреляционная и взаимная корреляционная функции

ВЫВОДЫ

4.1 Основные результаты

В ходе выполнения лабораторной работы №4 были достигнуты следующие результаты:

1. Успешно разработаны программы на языках C++ и MATLAB для генерации и анализа псевдослучайных последовательностей
2. Реализованы алгоритмы генерации m-последовательностей и последовательностей Голда
3. Проведен полный анализ корреляционных свойств полученных последовательностей
4. Выполнено сравнение результатов, полученных в C++ и MATLAB
5. Получены количественные результаты по автокорреляции и взаимной корреляции

4.2 Анализ свойств последовательностей

4.2.1 Корреляционные свойства

Для последовательностей Голда получены следующие результаты:

- Автокорреляция: показала характерный резкий пик при нулевом сдвиге (1.0000)
- Взаимная корреляция: низкое значение (-0.1290) подтверждает хорошие ортогональные свойства
- Свойства соответствуют теоретическим: трёхуровневая автокорреляция с уровнями $\{-1, -9, 7\}$ для $m = 5$

4.2.2 Сбалансированность и цикличность

- Сбалансированность: все последовательности имеют число единиц и нулей, отличающееся не более чем на 2-3

- **Цикличность:** распределение длин циклов соответствует теоретическим ожиданиям
- **Периодичность:** последовательности имеют период 31 ($2^5 - 1$)

4.3 Практическая значимость

Полученные в ходе работы знания и навыки имеют практическое значение для:

1. **Разработки систем синхронизации:** понимание принципов временной синхронизации в мобильных сетях
2. **Оптимизации алгоритмов:** выбор подходящих последовательностей для конкретных задач
3. **Диагностики сетей:** использование PN-последовательностей для тестирования каналов связи
4. **Обучения:** получение фундаментальных знаний в области обработки сигналов

4.4 Рекомендации по улучшению

Для дальнейшего развития работы можно предложить:

1. **Расширить тестирование:** проверить свойства последовательностей при различных уровнях помех
2. **Сравнить различные типы последовательностей:** проанализировать эффективность разных PN-последовательностей
3. **Добавить GUI:** создать графический интерфейс для более удобного тестирования
4. **Реализовать на других языках:** портировать программу на Python или Java для сравнения производительности
5. **Исследовать аппаратную реализацию:** изучить возможности реализации генераторов последовательностей в ПЛИС

4.5 Заключение

Лабораторная работа №4 позволила получить практические навыки работы с псевдослучайными последовательностями, которые являются фундаментальным инструментом в системах мобильной связи.

Были успешно разработаны программы на C++ и MATLAB, реализующие генерацию и анализ последовательностей Голда. Проведенное тестирование подтвердило хорошие корреляционные свойства последовательностей — резкий пик автокорреляции при нулевом сдвиге и низкая взаимная корреляция.

Полученные результаты демонстрируют, что последовательности Голда являются эффективным инструментом для решения задач синхронизации в условиях многолучевого распространения и помех, что делает их востребованными в современных стандартах мобильной связи.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1 Для чего в мобильных сетях могут использоваться псевдослучайные последовательности?

В мобильных сетях псевдослучайные последовательности используются для следующих целей:

1. **Синхронизация временных слотов и кадров:** определение начала передачи полезных данных
2. **Идентификация сот и базовых станций:** разные соты используют разные синхропоследовательности
3. **Оценка характеристик канала:** измерение времени распространения, доплеровского сдвига
4. **Расширение спектра:** в CDMA системах для разделения пользователей
5. **Скремблирование данных:** для обеспечения равномерного распределения энергии в спектре
6. **Тестирование и диагностика:** оценка BER (Bit Error Rate) канала связи

5.2 Что значит положительная корреляция сигналов?

Положительная корреляция означает, что сигналы изменяются синхронно:

- При увеличении одного сигнала увеличивается и другой
- При уменьшении одного сигнала уменьшается и другой
- Коэффициент корреляции близок к +1

В контексте синхронизации:

- Положительная корреляция между принимаемым сигналом и ожидаемой синхропоследовательностью указывает на их совпадение
- Максимальная положительная корреляция соответствует оптимальному временному положению

- Это позволяет точно определить начало кадра или слота

5.3 Что такое корреляционный прием сигналов?

Корреляционный прием — метод обнаружения сигналов, основанный на вычислении корреляции между принимаемым сигналом и ожидаемым шаблоном.

5.3.1 Принцип работы

1. Приемник знает форму ожидаемого сигнала (синхропоследовательности)
2. Вычисляется корреляция между принимаемым сигналом и шаблоном
3. Если корреляция превышает установленный порог, сигнал считается обнаруженным
4. Временное положение максимума корреляции определяет задержку сигнала

5.3.2 Преимущества

- Высокая помехоустойчивость
- Способность работать при низком отношении сигнал/шум
- Точное определение временного положения
- Возможность различия нескольких сигналов

5.4 Как вычисление корреляционных функций помогает синхронизироваться приемнику и передатчику в сетях мобильной связи?

1. Обнаружение начала кадра:

- БС передает известную синхропоследовательность в начале каждого кадра
- Абонентское устройство вычисляет корреляцию между принимаемым сигналом и ожидаемой последовательностью

- Максимум корреляции указывает на начало кадра

2. Оценка временной задержки:

- Сдвиг, соответствующий максимальной корреляции, определяет задержку распространения
- Позволяет компенсировать временные смещения
- Важно для правильного выравнивания временных слотов

3. Идентификация соты:

- Разные соты используют разные синхропоследовательности
- По максимальной корреляции определяется, с какой сотой синхронизироваться
- Позволяет различать соседние соты

5.5 Какие разновидности PN-последовательностей вам известны?

Таблица 5 — Разновидности PN-последовательностей

Тип последовательности	Основные свойства	Применение
M-последовательности	Максимальный период, простота генерации	GPS, RFID
Последовательности Голда	Хорошие взаимокорреляционные свойства	CDMA, WCDMA, LTE
Коды Баркера	Идеальная автокорреляция	Радиолокация, WiFi
Коды Уолша-Адамара	Ортогональность	CDMA для разделения каналов
Zadoff-Chu последовательности	Идеальная периодическая автокорреляция	LTE синхросигналы

ССЫЛКА НА РЕПОЗИТОРИЙ



Рисунок 4 — Репозиторий