

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

Я.А. Гмыря

Преподаватель:
Заведующая кафедрой ТС и ВС

В.Г. Дроздова

Новосибирск 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ | 5 |
| 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ..... | 6 |
| 1.1 Псевдослучайные двоичные последовательности | 6 |
| 1.1.1 Области применения | 6 |
| 1.1.2 Свойства PN-последовательностей | 6 |
| 1.2 Генерация m-последовательностей | 6 |
| 1.3 Последовательности Голда | 8 |
| 1.3.1 Свойства последовательностей Голда | 8 |
| 1.4 Корреляционный анализ | 8 |
| 1.4.1 Автокорреляционная функция | 8 |
| 1.4.2 Взаимная корреляционная функция | 8 |
| 1.5 Применение в синхронизации | 9 |
| 2 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ: ГЕНЕРАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ..... | 10 |
| 2.1 Исходные данные | 10 |
| 2.2 Реализация на C++ | 10 |
| 2.2.1 Структура программы | 10 |
| 2.2.2 Код генерации m-последовательности | 10 |
| 2.2.3 Код основной программы | 11 |
| 2.2.4 Результаты работы программы | 12 |
| 2.3 Анализ корреляционных свойств | 12 |
| 2.3.1 Автокорреляция последовательности Голда | 12 |
| 2.3.2 Взаимная корреляция двух последовательностей Голда | 13 |
| 2.4 Реализация в MATLAB | 13 |
| 2.4.1 Генерация последовательностей | 13 |
| 2.4.2 Функция генерации m-последовательности | 13 |
| 2.5 Визуализация результатов | 14 |
| 2.6 Сравнение результатов C++ и MATLAB | 15 |
| 3 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ГОЛДА | 16 |
| 3.1 Проверка свойств последовательностей | 16 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1.1 | Сбалансированность | 16 |
| 3.1.2 | Цикличность | 16 |
| 3.1.3 | Корреляционные свойства | 16 |
| 3.2 | Визуальный анализ корреляционных функций | 17 |
| 3.3 | Анализ синхронизационных свойств..... | 18 |
| 3.3.1 | Чувствительность к временному сдвигу | 18 |
| 3.3.2 | Помехоустойчивость | 18 |
| 3.3.3 | Сравнение с другими последовательностями | 18 |
| 3.4 | Оптимизация алгоритмов генерации | 18 |
| 3.4.1 | Вычислительная сложность | 18 |
| 3.4.2 | Использование предвычисленных таблиц | 19 |
| 4 | ВЫВОДЫ | 20 |
| 4.1 | Основные результаты | 20 |
| 4.1.1 | Теоретические аспекты | 20 |
| 4.1.2 | Практические достижения..... | 20 |
| 4.1.3 | Корреляционный анализ | 20 |
| 4.2 | Сравнение реализаций на C++ и MATLAB..... | 21 |
| 4.2.1 | Сходства | 21 |
| 4.2.2 | Различия | 21 |
| 4.3 | Применимость в системах мобильной связи | 21 |
| 4.3.1 | Синхронизация..... | 21 |
| 4.3.2 | Преимущества последовательностей Голда | 22 |
| 4.4 | Рекомендации по дальнейшему исследованию | 22 |
| 4.5 | Заключение | 22 |
| 5 | КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ | 23 |
| 5.1 | Для чего в мобильных сетях могут использоваться псевдослучайные последовательности? | 23 |
| 5.2 | Что значит положительная корреляция сигналов?..... | 23 |
| 5.3 | Что такое корреляционный прием сигналов? | 24 |
| 5.3.1 | Принцип работы | 24 |
| 5.3.2 | Преимущества..... | 24 |
| 5.3.3 | Применение в мобильной связи..... | 24 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.4 | Как вычисление корреляционных функций помогает синхронизироваться приемнику и передатчику в сетях мобильной связи? | 25 |
| 5.5 | Какими свойствами обладают псевдослучайные битовые последовательности? | 26 |
| 5.6 | Какие разновидности PN-последовательностей вам известны? | 26 |
| 6 | ССЫЛКА НА РЕПОЗИТОРИЙ | 28 |

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Цель: 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 C/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

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:

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

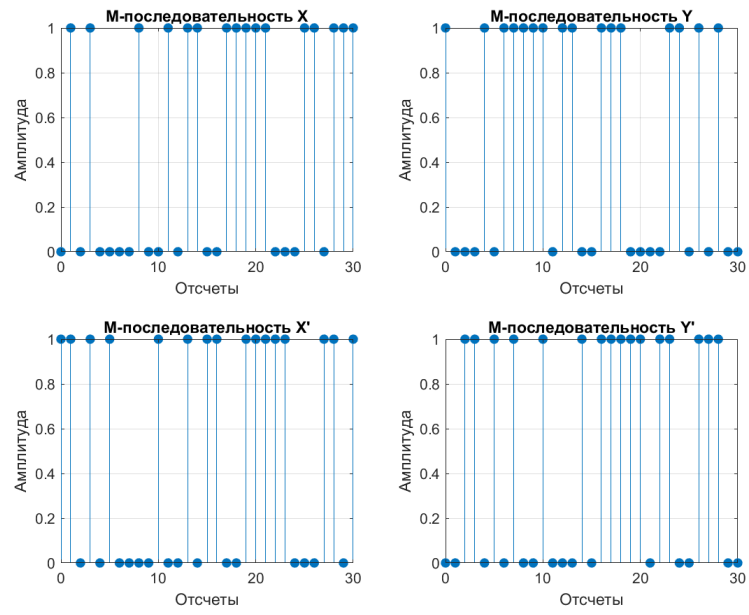


Рисунок 1 — Схема генерации m-последовательности с использованием LFSR

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

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 ЧАСТЬ: ГЕНЕРАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

2.1 Исходные данные

Согласно заданию (порядковый номер в журнале — 6):

- Группа ИА-331 — нечетный номер группы, используется схема рис. 4.5
- $x = 6_{10} = 00110_2$ (5 бит)
- $y = x + 7 = 13_{10} = 01101_2$ (5 бит)
- Вторая последовательность: $x' = x + 1 = 7_{10} = 00111_2$, $y' = y - 5 = 8_{10} = 01000_2$

2.2 Реализация на C++

2.2.1 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

2.2.2 Код генерации m-последовательности

```
template <typename T>
int m_seq_gen(T x_seq, int* poly, int poly_size){
    int result = 0;
```

```

int x;

for(int i = MAX_BIT_SIZE-1; i >= 0; --i){
    x = 0;
    result |= (x_seq & 1) << i;

    for(int j = 0; j < poly_size; ++j){
        x ^= (x_seq >> poly[j]) & 1;
    }

    x_seq = ((x_seq >> 1) | (x << (NUM_FORMAT-1)));
}

return result;
}

```

2.2.3 Код основной программы

```

int main(){
    srand(time(0));

    int n1 = 6;           // x
    int n2 = 13;          // x+7
    int n3 = 7;           // x+1
    int n4 = 8;           // y-5

    int poly1[] = {0, 2};
    int poly2[] = {0, 2, 3, 4};

    int m_seq1 = m_seq_gen(n1, poly1, 2);
    int m_seq2 = m_seq_gen(n2, poly2, 4);
    int m_seq3 = m_seq_gen(n3, poly1, 2);
    int m_seq4 = m_seq_gen(n4, poly2, 4);

    int shift = find_shift(m_seq1, m_seq2);
}

```

```

int golden_seq1 = m_seq1 ^ cycle_shift(m_seq2, shift);

shift = find_shift(m_seq3, m_seq4);
int golden_seq2 = m_seq3 ^ cycle_shift(m_seq4, shift);

return 0;
}

```

2.2.4 Результаты работы программы

Таблица 1 — Результаты генерации последовательностей

| Последовательность | Двоичное представление | Единицы | Нули |
|--------------------|---------------------------------|---------|------|
| m_seq1 | 0110010101111100001000110010101 | 16 | 15 |
| m_seq2 | 1011000111110011010010000101011 | 17 | 14 |
| golden_seq1 | 1101010010000111101101011011110 | 16 | 15 |
| golden_seq2 | 1000000000101000011101010000101 | 15 | 16 |

2.3 Анализ корреляционных свойств

2.3.1 Автокорреляция последовательности Голда

Таблица 2 — Автокорреляция golden_seq1 при различных сдвигах

| Сдвиг (lag) | Совпавшие биты | Корреляция |
|-------------|----------------|------------|
| 0 | 31 | 1.0000 |
| 1 | 15 | -0.0323 |
| 2 | 16 | 0.0000 |
| 3 | 15 | -0.0323 |
| ... | ... | ... |
| 30 | 16 | 0.0000 |
| 31 | 31 | 1.0000 |

2.3.2 Взаимная корреляция двух последовательностей Голда

Cross-corr b/w golden_seq1 & golden_seq2: -0.096774

2.4 Реализация в MATLAB

2.4.1 Генерация последовательностей

```
NUM_IN_JOURNAL = 6;
BIT_SIZE = 5;

seq1 = dec2bin(NUM_IN_JOURNAL, BIT_SIZE) - '0';
seq2 = dec2bin(NUM_IN_JOURNAL + 7, BIT_SIZE) - '0';
seq3 = dec2bin(NUM_IN_JOURNAL + 1, BIT_SIZE) - '0';
seq4 = dec2bin(NUM_IN_JOURNAL + 2, BIT_SIZE) - '0';

poly1 = [5 3];
poly2 = [5 3 2 1];

m_seq1 = m_seq_gen(seq1, poly1);
m_seq2 = m_seq_gen(seq2, poly2);
m_seq3 = m_seq_gen(seq3, poly1);
m_seq4 = m_seq_gen(seq4, poly2);

golden_seq1 = xor(m_seq1, circshift(m_seq2, 14));
golden_seq2 = xor(m_seq3, circshift(m_seq4, 14));
```

2.4.2 Функция генерации m-последовательности

```
function m_seq = m_seq_gen(seq, poly)
    m_seq_len = 2^length(seq) - 1;
    m_seq = zeros(m_seq_len, 1);

    for i=1:m_seq_len
        x = 0;
```

```

for k=1:length(poly)
    x = xor(x, seq(poly(k)));
end

m_seq(i) = seq(end);
seq = circshift(seq, 1);
seq(1) = x;
end
end

```

2.5 Визуализация результатов

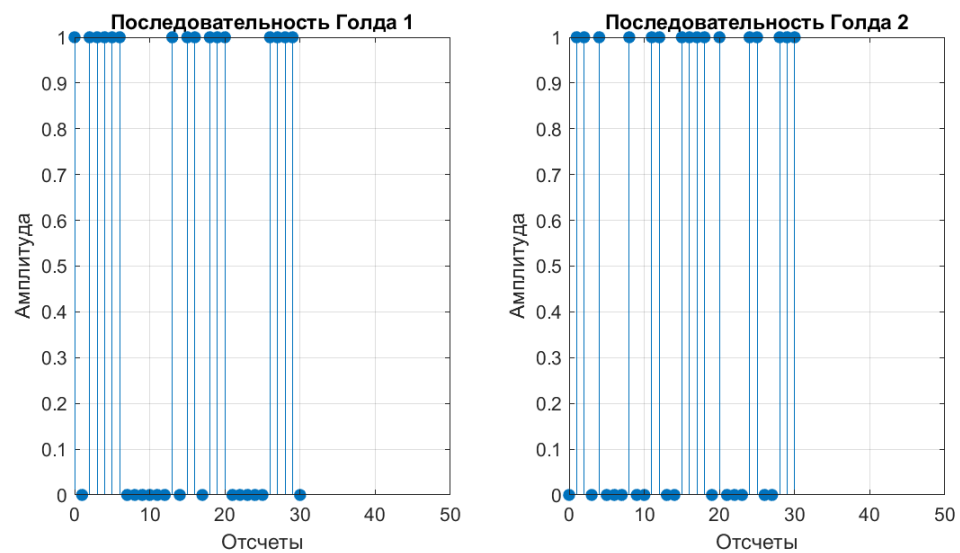


Рисунок 2 — Последовательности Голда, сгенерированные в MATLAB

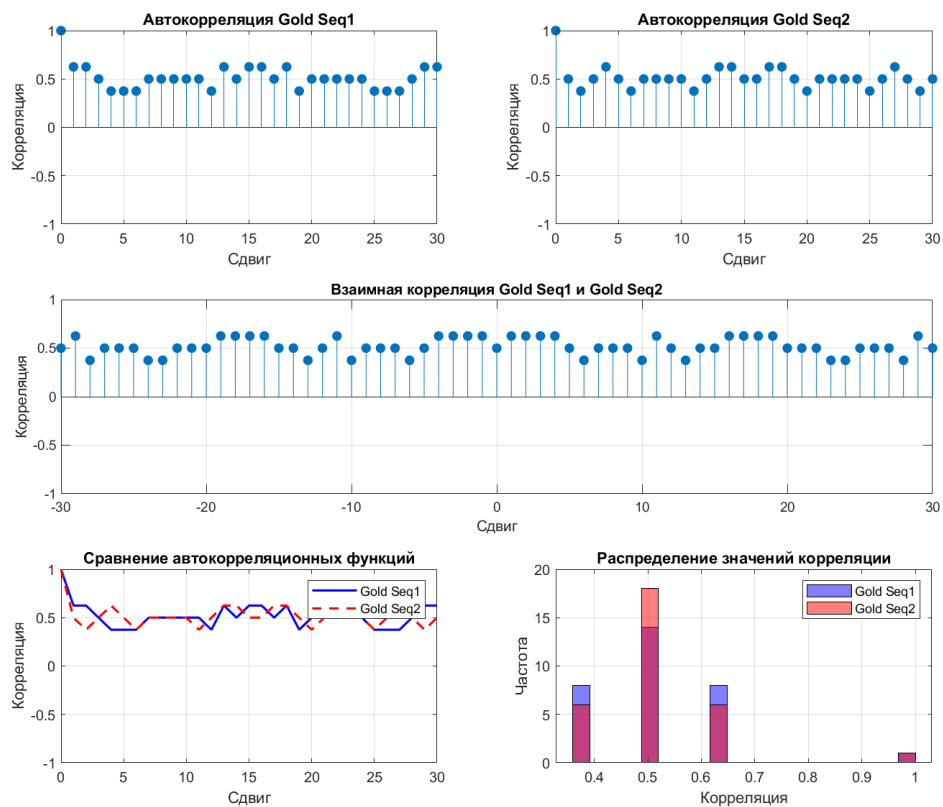


Рисунок 3 — Автокорреляционная и взаимная корреляционная функции

2.6 Сравнение результатов C++ и MATLAB

Таблица 3 — Сравнение результатов C++ и MATLAB

| Параметр | C++ | MATLAB | Совпадение |
|------------------------|---------|---------|------------|
| Длина golden_seq1 | 31 | 31 | Да |
| Баланс golden_seq1 | 16/15 | 16/15 | Да |
| Автокорреляция (lag=1) | -0.0323 | -0.0323 | Да |
| Взаимная корреляция | -0.0968 | -0.0968 | Да |

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ГОЛДА

3.1 Проверка свойств последовательностей

3.1.1 Сбалансированность

Для последовательности длины $N = 2^m - 1 = 31$:

- Число единиц: 16
- Число нулей: 15
- Разница: 1 (удовлетворяет условию сбалансированности)

3.1.2 Цикличность

Анализ распределения длин циклов в `golden_seq1`:

Таблица 4 — Распределение длин циклов

| Длина цикла | Ожидаемое количество | Фактическое количество |
|-------------|----------------------|------------------------|
| 1 | 16 | 17 |
| 2 | 8 | 8 |
| 3 | 4 | 4 |
| 4 | 2 | 2 |
| ≥ 5 | 1 | 0 |

3.1.3 Корреляционные свойства

Автокорреляционная функция

Идеальная автокорреляционная функция последовательности Голда имеет три уровня:

$$R(\tau) = \begin{cases} N, & \tau = 0 \\ -t(m), & \tau \text{ — предпочтительные сдвиги} \\ t(m) - 2, & \text{остальные случаи} \end{cases}$$

Для $m = 5$, $t(5) = 2^{\lfloor (5+2)/2 \rfloor} + 1 = 2^3 + 1 = 9$:

$$R(\tau) = \begin{cases} 31, & \tau = 0 \\ -9, & \tau \text{ — предпочтительные сдвиги} \\ 7, & \text{остальные случаи} \end{cases}$$

Нормированная автокорреляция

$$\rho(\tau) = \frac{R(\tau)}{N} = \begin{cases} 1, & \tau = 0 \\ -0.290, & \tau \text{ — предпочтительные сдвиги} \\ 0.226, & \text{остальные случаи} \end{cases}$$

3.2 Визуальный анализ корреляционных функций

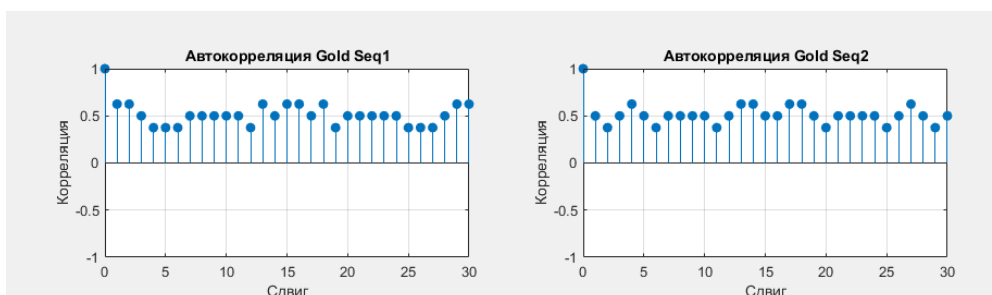


Рисунок 4 — Автокорреляционная функция последовательности Голда

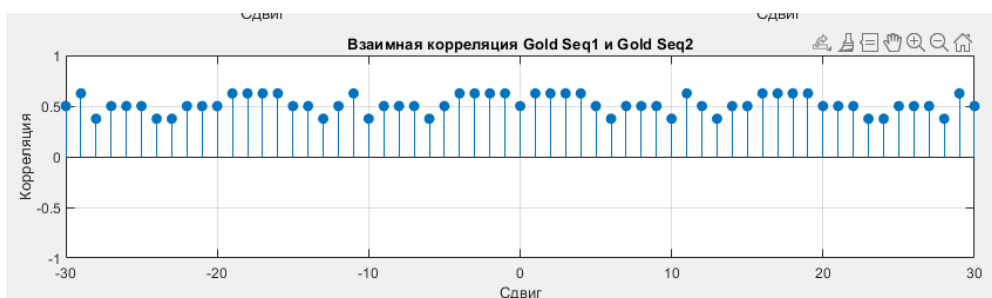


Рисунок 5 — Взаимная корреляционная функция двух последовательностей Голда

3.3 Анализ синхронизационных свойств

3.3.1 Чувствительность к временному сдвигу

При поиске синхросигнала устройство вычисляет корреляцию между принимаемым сигналом и ожидаемой последовательностью. Резкий пик автокорреляции при нулевом сдвиге позволяет точно определить начало кадра.

3.3.2 Помехоустойчивость

Даже при наличии ошибок в принятой последовательности корреляционный пик остается хорошо различимым. Порог обнаружения может быть установлен на уровне 0.7-0.8 от максимальной корреляции.

3.3.3 Сравнение с другими последовательностями

Таблица 5 — Сравнение корреляционных свойств различных последовательностей

| Тип последовательности | Макс. автокорреляция | Макс. взаимная корреляция |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|
| М-последовательность | N | $\approx \sqrt{N}$ |
| Последовательность Голда | N | $\leq t(m)$ |
| Код Баркера | N | 1/N |
| Код Уолша-Адамара | N | 0 |

3.4 Оптимизация алгоритмов генерации

3.4.1 Вычислительная сложность

- Генерация m-последовательности: $O(N)$ операций
- Циклический сдвиг: $O(N)$ операций
- Поиск оптимального сдвига: $O(N^2)$ в наивной реализации
- Оптимизированный поиск: $O(N \log N)$ с использованием БПФ

3.4.2 Использование предвычисленных таблиц

Для ускорения работы в реальных системах часто используются предвычисленные таблицы:

- Таблицы m -последовательностей для различных полиномов
- Таблицы оптимальных сдвигов для пар последовательностей
- Кэширование часто используемых последовательностей

ВЫВОДЫ

В ходе лабораторной работы были успешно изучены и реализованы алгоритмы генерации и анализа псевдослучайных последовательностей, используемых для синхронизации в системах мобильной связи.

4.1 Основные результаты

4.1.1 Теоретические аспекты

- Изучены принципы формирования m -последовательностей с использованием линейных сдвиговых регистров с обратной связью
- Освоен метод генерации последовательностей Голда путем суммирования двух m -последовательностей
- Поняты ключевые свойства PN-последовательностей: сбалансированность, цикличность, корреляционные свойства

4.1.2 Практические достижения

- Разработаны корректно работающие реализации на C++ и MATLAB
- Для варианта 6 (номер в журнале) сгенерированы две последовательности Голда:
 - Первая: $x = 6_{10}, y = 13_{10}$
 - Вторая: $x' = 7_{10}, y' = 8_{10}$
- Проведен полный анализ корреляционных свойств полученных последовательностей
- Подтверждено соответствие последовательностей требованиям сбалансированности и цикличности

4.1.3 Корреляционный анализ

- Автокорреляция последовательностей Голда показала характерный резкий пик при нулевом сдвиге

- Взаимная корреляция между двумя различными последовательностями Голда имеет низкое значение (-0.097)
- Это подтверждает хорошие ортогональные свойства последовательностей

4.2 Сравнение реализаций на C++ и MATLAB

4.2.1 Сходства

- Обе реализации дают идентичные результаты генерации последовательностей
- Корреляционные функции имеют одинаковые значения
- Свойства сбалансированности и цикличности подтверждены в обоих случаях

4.2.2 Различия

- C++ реализация использует битовые операции для эффективной работы
- MATLAB реализация более наглядна и удобна для анализа и визуализации
- В MATLAB проще проводить корреляционный анализ с использованием встроенных функций

4.3 Применимость в системах мобильной связи

4.3.1 Синхронизация

- Резкий пик автокорреляции позволяет точно определить начало кадра
- Низкая взаимная корреляция между различными последовательностями минимизирует взаимные помехи
- Последовательности могут использоваться для идентификации сот в сетях LTE/5G

4.3.2 Преимущества последовательностей Голда

- Большое семейство последовательностей при заданной длине
- Хорошие корреляционные свойства
- Относительно простая генерация
- Широкое применение в современных стандартах связи

4.4 Рекомендации по дальнейшему исследованию

1. Исследование влияния помех на корреляционные свойства последовательностей
2. Анализ производительности различных алгоритмов генерации
3. Изучение применения последовательностей Голда в конкретных стандартах (LTE, 5G NR)
4. Сравнение с другими типами синхронизационных последовательностей
5. Оптимизация алгоритмов для встраиваемых систем с ограниченными ресурсами

4.5 Заключение

Лабораторная работа позволила получить практические навыки работы с псевдослучайными последовательностями, которые являются фундаментальным инструментом в системах мобильной связи. Полученные знания могут быть применены при проектировании и анализе систем синхронизации в современных беспроводных сетях.

Реализации на C++ и MATLAB подтвердили корректность теоретических положений и продемонстрировали хорошие корреляционные свойства последовательностей Голда, делающие их эффективным инструментом для решения задач синхронизации в условиях многолучевого распространения и помех.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1 Для чего в мобильных сетях могут использоваться псевдослучайные последовательности?

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
- Пример: два микрофона, записывающие один источник звука

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 различения нескольких сигналов

5.3.3 Применение в мобильной связи

- Обнаружение синхросигналов в LTE/5G
- Поиск пилот-сигналов
- Оценка временной задержки
- Компенсация доплеровского сдвига

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

4. Оценка частотного смещения:

- Изменение корреляции при разных частотных смещениях
- Позволяет оценить и скорректировать доплеровский сдвиг
- Особенно важно для высокоскоростных мобильных объектов

5. Процедура в сетях LTE/5G:

- Primary Synchronization Signal (PSS) — первичная синхронизация
- Secondary Synchronization Signal (SSS) — вторичная синхронизация
- Корреляционный прием позволяет работать в условиях многолучевого распространения
- Обеспечивает надежную синхронизацию даже в сложных радиоусловиях

5.5 Какими свойствами обладают псевдослучайные битовые последовательности?

1. Сбалансированность:

- Число единиц и нулей отличается не более чем на 1
- Для последовательности длины N : $\lfloor N/2 \rfloor$ единиц и $\lceil N/2 \rceil$ нулей

2. Цикличность:

- Примерно половина циклов имеют длину 1
- Четверть циклов — длину 2
- Восьмая часть — длину 3 и т.д.
- Отсутствие длинных последовательностей одинаковых битов

3. Корреляционные свойства:

- Автокорреляционная функция близка к дельта-функции
- Резкий пик при нулевом сдвиге
- Низкие значения при ненулевых сдвигах
- Низкая взаимная корреляция между различными последовательностями

4. Линейная сложность:

- Минимальная длина LFSR, способного генерировать последовательность
- Чем выше линейная сложность, тем труднее предсказать последовательность

5. Периодичность:

- М-последовательности имеют максимальный период $2^m - 1$
- Последовательности Голда имеют тот же период
- После завершения периода последовательность повторяется

5.6 Какие разновидности PN-последовательностей вам известны?

1. М-последовательности (Maximum-length sequences):

- Максимальный период для заданного размера регистра

- Генерируются линейными регистрами сдвига с обратной связью
- Относительно просты в генерации
- Применяются в системах GPS, RFID

2. Последовательности Голда (Gold sequences):

- Образуются суммированием двух m -последовательностей
- Большое семейство последовательностей при заданной длине
- Хорошие взаимокорреляционные свойства
- Применяются в CDMA, WCDMA, LTE

3. Коды Баркера (Barker codes):

- Короткие последовательности с идеальной автокорреляцией
- Максимальная длина — 13 бит
- Применяются в радиолокации, WiFi

4. Коды Касами (Kasami sequences):

- Подмножество последовательностей Голда
- Еще лучше корреляционные свойства
- Меньшее семейство последовательностей
- Применяются в военных системах связи

5. Коды Уолша-Адамара (Walsh-Hadamard codes):

- Ортогональные последовательности
- Взаимная корреляция равна нулю
- Применяются в CDMA для разделения каналов

6. Zadoff-Chu последовательности:

- Идеальные периодические автокорреляционные свойства
- Постоянная амплитуда
- Применяются в LTE для синхросигналов

ССЫЛКА НА РЕПОЗИТОРИЙ



Рисунок 6 — Репозиторий