

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 дисциплине
«Основы систем мобильной связи»

по теме:
ЗАНЯТИЕ №3. КОРРЕЛЯЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ.

Студент:
Группа № IA331

B.A. Павлова

Предподаватель:
В.Г. Дроздова

Новосибирск 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1	ЗАНЯТИЕ №3. КОРРЕЛЯЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ	3
1.1	Цель работы	3
1.2	Задачи лабораторной работы	3
1.3	Исходные данные	3
2	КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
3	ХОД РАБОТЫ	7
3.1	Вычисление корреляции между массивами на С	7
3.1.1	Исходные данные (Вариант 17)	7
3.1.2	Принцип работы программы	7
3.1.3	Результаты	7
3.1.4	Анализ результатов	8
3.2	Исследование непрерывных сигналов в Matlab	8
3.2.1	Результаты	8
3.2.2	Анализ результатов	9
3.3	Анализ дискретных последовательностей в Matlab	9
3.4	Исследование корреляции при циклическом сдвиге в Matlab ...	10
3.4.1	Алгоритм	10
3.4.2	График зависимости корреляции от сдвига	10
3.4.3	Результаты	10
3.4.4	Визуализация при оптимальном сдвиге	11
3.4.5	Выводы	11
4	ВЫВОДЫ И ОТВЕТЫ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	12
4.1	Выводы по практической работе	12
4.2	Ответы на контрольные вопросы	12
5	СКРИПТЫ	15
5.1	Скрипт 1 - Язык С - Вычисление корреляции между массивами	15
5.2	Скрипт 2 - MATLAB - Анализ корреляции сигналов	16
5.3	Репозиторий GitHub	18

1 ЗАНЯТИЕ №3. КОРРЕЛЯЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ.

1.1 Цель работы

Получить представление о том, что такое корреляционная функция и нормализованная взаимная корреляционная функция, как они вычисляются и какое отношение имеют к процедурам синхронизации в сетях мобильной связи.

1.2 Задачи лабораторной работы

1. Реализовать на языке C/C++ функции для вычисления: взаимной корреляции между двумя массивами; нормализованной взаимной корреляции между двумя массивами.
2. Выполнить расчёт корреляции и нормализованной корреляции между заданными в таблице 2 массивами a , b и c согласно индивидуальному варианту.
3. Исследовать зависимость взаимной корреляции от временного сдвига
4. Составить отчет, содержащий:
 - титульный лист
 - содержание
 - цель и задачи работы
 - теоретические сведения
 - исходные данные
 - этапы выполнения работы со скриншотами и графиками
 - результирующие таблицы
 - ответы на контрольные вопросы
 - заключение
 - QR-код с ссылкой на репозиторий с кодом (git)

1.3 Исходные данные

Вариант 17

– **Дискретные массивы:**

- $a = [6, 2, 8, -2, -4, -4, 1, 3]$
- $b = [3, 6, 7, 0, -5, -4, 2, 5]$
- $c = [-6, -1, -3, -9, 2, -8, 4, 1]$

– **Непрерывные периодические функции:**

- $a(t) = 4s_1(t) + 4s_2(t) + s_3(t)$
- $b(t) = 3s_1(t) + s_3(t)$

– **Гармонические сигналы:**

- $s_1(t) = \cos(2\pi f_1 t)$, где $f_1 = 17$ Гц
- $s_2(t) = \cos(2\pi f_2 t)$, где $f_2 = f_1 + 4 = 21$ Гц
- $s_3(t) = \cos(2\pi f_3 t)$, где $f_3 = 2f_1 + 1 = 35$ Гц

2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Корреляция – это статистическая зависимость двух и более случайных величин. Корреляционная взаимосвязь в случае с сетями мобильной связи и используемыми в них радиосигналами позволяет обнаруживать сигналы синхронизации для того, чтобы с их помощью корректно разбивать ось времени на интервалы, предусматриваемые стандартами связи (например, слоты, кадры и пр.).

Корреляция бывает **положительная**, когда два процесса напрямую зависят друг от друга, то есть увеличение одной величины вызывает пропорциональный рост другой и наоборот. Например, можно проследить рост объемов продаж мороженого при повышении суточной температуры. **Отрицательная** корреляция свидетельствует об обратной взаимосвязи процессов – рост суточной температуры приводит к снижению объема продаж пуховиков. Бывает также **нейтральная корреляция**, когда явная взаимосвязь между процессами отсутствует (например, связь курса доллара и среднего балла за ЕГЭ у выпускников неочевидна).

Существуют различные подходы к измерению корреляции. Рассмотрим один из вариантов оценить ее значение:

$$Corr_{x,y} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n y_n \quad (1)$$

или для конечных последовательностей длины N :

$$Corr_{x,y} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n y_n \quad (2)$$

Для того, чтобы корректно определять корреляцию между функциями/-процессами “энергия”, которых столь различна, используется нормализованная функция корреляции:

$$Corr_{x,y} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x_n y_n}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} x_n^2 \cdot \sum_{n=0}^{N-1} y_n^2}} \quad (3)$$

Рассчитав нормализованную корреляцию для x и y , можно получить значение, равное 0.95, а для y и z – 0.38. Диапазон возможных значений для нормализованной корреляции от -1 до 1, где 1 и -1 – это максимальные значения положительной и отрицательной корреляции, 0 и близкие к нему значения – означает отсутствие корреляции.

3 ХОД РАБОТЫ

3.1 Вычисление корреляции между массивами на С

3.1.1 Исходные данные (Вариант 17)

- $a = [6, 2, 8, -2, -4, -4, 1, 3]$
- $b = [3, 6, 7, 0, -5, -4, 2, 5]$
- $c = [-6, -1, -3, -9, 2, -8, 4, 1]$

Написана программа на языке С для расчета корреляции.

3.1.2 Принцип работы программы

- **Обычная корреляция:** поэлементное умножение массивов и суммирование результатов
- **Нормализованная корреляция:** деление обычной корреляции на корень из суммы квадратов элементов обоих массивов

3.1.3 Результаты

```
PS C:\Users\KL\Desktop\СибГУТИ\3 курс\OCMC\lab3> gcc -o corr corr.c
PS C:\Users\KL\Desktop\СибГУТИ\3 курс\OCMC\lab3> ./corr

Correlation:
|   a   |   b   |   c   |
-----
a | 150  | 139  | -13  |
b | 139  | 164  | -10  |
c | -13  | -10  | 212  |

normal correlation:
|   a   |   b   |   c   |
-----
a | 1.00  | 0.89  | -0.07 |
b | 0.89  | 1.00  | -0.05 |
c | -0.07 | -0.05 | 1.00 |
```

Рисунок 1 — Результаты вычисления корреляции

Полученные значения корреляции:

- a-b: 139.0 (сильная положительная связь)
- a-c: -13.0 (слабая отрицательная связь)
- b-c: -10.0 (слабая отрицательная связь)

3.1.4 Анализ результатов

- **Сильная корреляция a-b (139.0):** сигналы изменяются синхронно - одновременный рост и уменьшение значений
- **Слабая корреляция a-c (-13.0):** сигналы практически не связаны, хаотичное изменение
- **Слабая корреляция b-c (-10.0):** отсутствие значимой статистической связи

Сигналы а и б демонстрируют значительное сходство, в то время как сигнал с существенно отличается от обоих.

3.2 Исследование непрерывных сигналов в Matlab

Сгенерированы гармонические сигналы с частотами:

- $f_1 = 17 \text{ Гц}$
- $f_2 = f_1 + 4 = 21 \text{ Гц}$
- $f_3 = 2f_1 + 1 = 35 \text{ Гц}$

Построены сигналы согласно варианту 17:

- $a(t) = 4s_1(t) + 4s_2(t) + s_3(t)$
- $b(t) = 3s_1(t) + s_3(t)$

Вычислена корреляция между сигналом s_1 и сигналами a, b .

3.2.1 Результаты

Корреляция z1-a: 2009.0 (норм: 0.697)
Корреляция z1-b: 1504.0 (норм: 0.949)

Рисунок 2 — Результаты вычисления корреляции непрерывных сигналов

- Корреляция $s1\text{-}a$: 0.697 (хорошая положительная связь)
- Корреляция $s1\text{-}b$: 0.949 (очень сильная положительная связь)

3.2.2 Анализ результатов

- Сигнал $a(t)$ содержит равные доли s_1 и s_2 , что уменьшает корреляцию с s_1
- Сигнал $b(t)$ имеет большую составляющую s_1 (коэффициент 3), что обеспечивает высокую корреляцию
- Нормализованная корреляция эффективно оценивает сходство сигналов независимо от амплитуды

3.3 Анализ дискретных последовательностей в Matlab

Визуализированы массивы a и b на графиках, расположенных друг под другом.

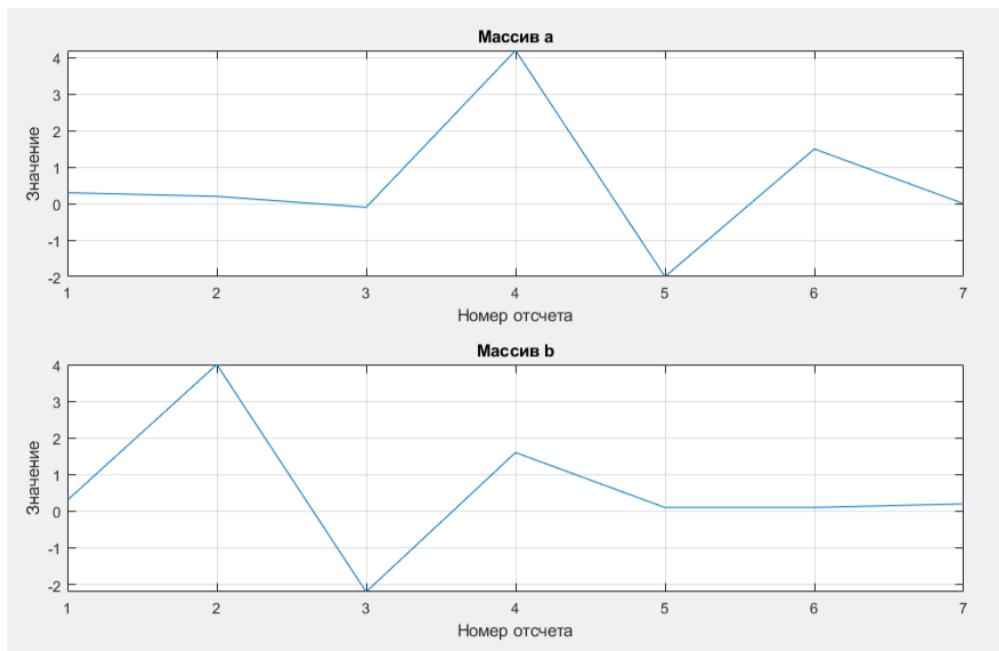


Рисунок 3 — Визуализация массивов a и b

Вычислена взаимная корреляция между массивами:

- Взаимная корреляция массивов a и b : 7.78

3.4 Исследование корреляции при циклическом сдвиге в Matlab

Реализован циклический сдвиг массива b с использованием функции `circshift`. Для каждого сдвига вычислена корреляция с массивом a .

3.4.1 Алгоритм

```
for shift = 0:6
    b_shift = circshift(b, shift);
    corr = sum(a .* b_shift);
    results = [results, corr];
end
```

3.4.2 График зависимости корреляции от сдвига

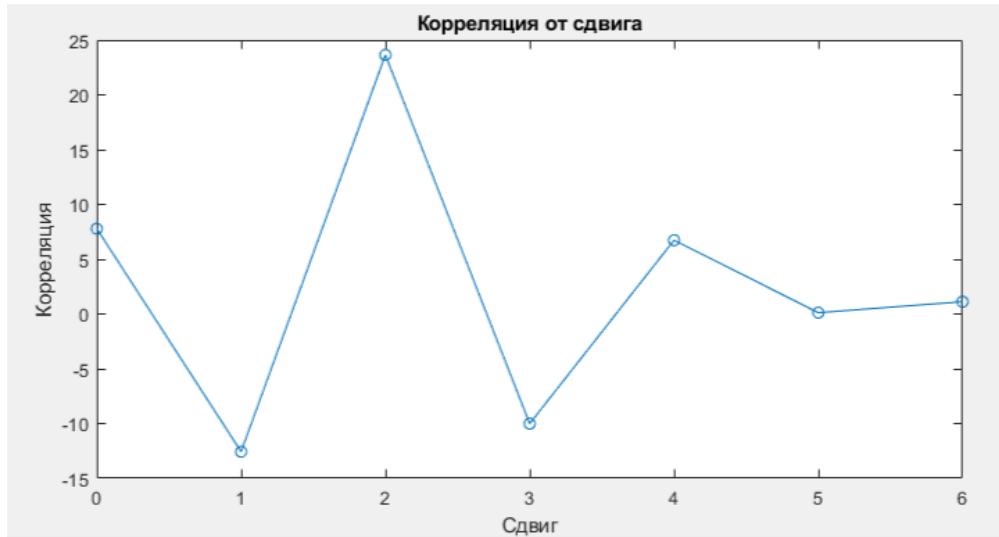


Рисунок 4 — Зависимость корреляции от величины циклического сдвига

3.4.3 Результаты

- Найдена максимальная корреляция: 23.64 при сдвиге 2
- Начальная корреляция: 7.78
- Улучшение корреляции: в 3 раза

3.4.4 Визуализация при оптимальном сдвиге

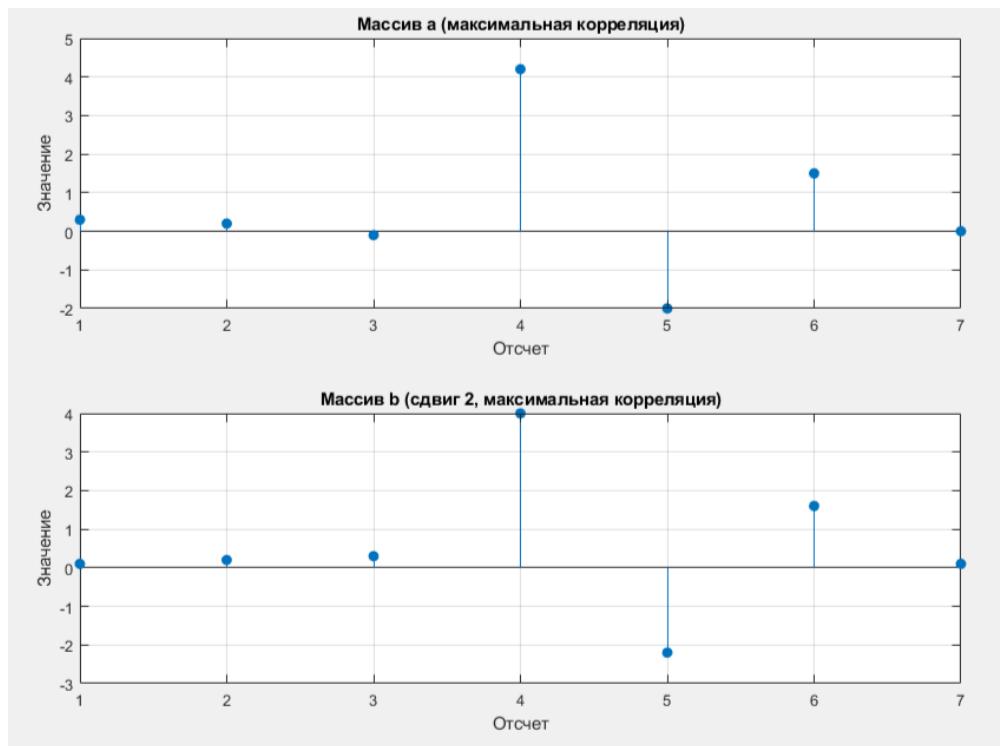


Рисунок 5 — Сигналы а и b при оптимальном сдвиге

3.4.5 Выводы

- Циклический сдвиг позволяет значительно улучшить корреляцию сигналов
- Оптимальное взаимное расположение сигналов достигается при сдвиге 2

4 ВЫВОДЫ И ОТВЕТЫ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1 Выводы по практиственной работе

В ходе работы вычислены корреляции между сигналами: а и b имеют сильную связь (139), а и с - слабую (-13). Для непрерывных сигналов наибольшая корреляция получена между s1 и b (0.949). Циклический сдвиг на 2 позиции увеличил корреляцию массивов с 7.78 до 23.64. Результаты подтверждают, что корреляция полезна для сравнения сигналов и их синхронизации в системах связи.

4.2 Ответы на контрольные вопросы

1. Какие виды корреляции существуют?

Существуют следующие виды корреляции:

- **Положительная корреляция** – когда увеличение одной случайной величины приводит к пропорциональному увеличению другой величины
- **Отрицательная корреляция** – когда увеличение одной случайной величины приводит к пропорциональному уменьшению другой величины
- **Нейтральная (нулевая) корреляция** – когда отсутствует явная статистическая зависимость между величинами
- **Автокорреляция** – корреляция сигнала с самим собой в различные моменты времени
- **Взаимная корреляция** – корреляция между двумя различными сигналами

2. Что значит положительная корреляция сигналов?

Положительная корреляция сигналов означает, что сигналы изменяются синхронно – при увеличении амплитуды одного сигнала наблюдается пропорциональное увеличение амплитуды другого сигнала. Коэффициент корреляции при этом находится в диапазоне от

0 до +1. Чем ближе значение к +1, тем сильнее положительная линейная зависимость между сигналами.

3. Что такое корреляционный прием сигналов?

Корреляционный прием сигналов – это метод обнаружения и выделения полезного сигнала на фоне помех, основанный на вычислении корреляции между принятым сигналом и ожидаемым (эталонным) сигналом. Принцип работы:

- Принятый сигнал $y(t)$ сравнивается с набором эталонных сигналов $s_i(t)$
- Вычисляются корреляционные интегралы: $R_i = \int y(t)s_i(t)dt$
- Сигнал считается обнаруженным, если корреляция превышает определенный порог
- Метод обеспечивает оптимальное отношение сигнал/шум в гауссовском шуме

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

Вычисление корреляционных функций решает следующие задачи синхронизации:

- **Обнаружение синхропоследовательности** – корреляционный прием позволяет обнаружить специальные синхросигналы в принимаемом потоке данных
- **Определение временных границ** – пики корреляции указывают на начало временных интервалов (слотов, кадров)
- **Синхронизация по частоте и фазе** – анализ взаимной корреляции помогает компенсировать расстройки по частоте и фазе
- **Синхронизация в CDMA системах** – корреляция с кодовыми последовательностями обеспечивает разделение каналов и временную синхронизацию

Алгоритм синхронизации:

- a) Приемник вычисляет взаимную корреляцию между принимаемым сигналом и известной синхропоследовательностью
- б) Определяется момент времени, когда корреляция достигает максимума

- в) Этот момент принимается за начало временного интервала
- г) Процедура повторяется периодически для поддержания синхронизации

5 СКРИПТЫ

5.1 Скрипт 1 - Язык C - Вычисление корреляции между массивами

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <math.h>
3
4 int main() {
5     double a[] = { 6, 2, 8, -2, -4, -4, 1, 3 };
6     double b[] = { 3, 6, 7, 0, -5, -4, 2, 5 };
7     double c[] = { -6, -1, -3, -9, 2, -8, 4, 1 };
8
9     // Обычная корреляция
10    double ab = 0, ac = 0, bc = 0;
11    double aa = 0, bb = 0, cc = 0;
12
13    for(int i = 0; i < 8; i++) {
14        ab += a[i] * b[i];
15        ac += a[i] * c[i];
16        bc += b[i] * c[i];
17        aa += a[i] * a[i];
18        bb += b[i] * b[i];
19        cc += c[i] * c[i];
20    }
21
22    // Нормализованная корреляция
23    double nab = ab / sqrt(aa * bb);
24    double nac = ac / sqrt(aa * cc);
25    double nbc = bc / sqrt(bb * cc);
26
27    printf("\nCorrelation:\n");
28    printf(" | a | b | c\n");
29    printf("-----\n");
30    printf("a | %4.0f | %4.0f | %4.0f\n", aa, ab, ac);
31    printf("b | %4.0f | %4.0f | %4.0f\n", ab, bb, bc);
32    printf("c | %4.0f | %4.0f | %4.0f\n\n", ac, bc, cc);
33
34    printf("Normal correlation:\n");
35    printf(" | a | b | c\n");
36    printf("-----\n");
37    printf("a | %5.2f | %5.2f | %5.2f\n", 1.0, nab, nac);
38    printf("b | %5.2f | %5.2f | %5.2f\n", nab, 1.0, nbc);
```

```

39     printf("c | %5.2f | %5.2f | %5.2f\n", nac, nbc, 1.0);
40
41     return 0;
42 }
```

Листинг 5.1 — Программа вычисления корреляции на языке C

5.2 Скрипт 2 - MATLAB - Анализ корреляции сигналов

```

1 f1 = 17;
2 f2 = 17+4;
3 f3 = (17*2) + 1;
4 t = 0:0.001:1;
5
6 s1 = cos(2*pi*f1*t);
7 s2 = cos(2*pi*f2*t);
8 s3 = cos(2*pi*f3*t);
9
10 a = 4*s1 + 4*s2 + s3;
11 b = 3*s1 + s3;
12
13 % Считаем корреляцию
14 corr1 = sum(s1 .* a);
15 corr2 = sum(s1 .* b);
16
17 % Нормализованная корреляция
18 norm1 = corr1 / sqrt(sum(s1.^2) * sum(a.^2));
19 norm2 = corr2 / sqrt(sum(s1.^2) * sum(b.^2));
20
21 fprintf('Корреляция s1-a: %.1f норм(: %.3f)\n', corr1, norm1);
22 fprintf('Корреляция s1-b: %.1f норм(: %.3f)\n', corr2, norm2);
23
24 a1 = [0.3 0.2 -0.1 4.2 -2 1.5 0];
25 b1 = [0.3 4 -2.2 1.6 0.1 0.1 0.2];
26
27 % Графики массивов друг под другом
28 figure;
29 subplot(2,1,1);
30 plot(a1);
31 title('Массив a');
32 xlabel('Номер отсчета');
33 ylabel('Значение');
34 grid on;
35
```

```

36 subplot(2,1,2);
37 plot(b1);
38 title('Массив b');
39 xlabel('Номер отсчета');
40 ylabel('Значение');
41 grid on;
42
43 % Вычисление взаимной корреляции
44 correlation = sum(a1 .* b1);
45 fprintf('Взаимная корреляция массивов a и b: %.2f\n', correlation);
46
47 results = []; % Создаем пустой массив для хранения результатов
48
49 % Перебираем все возможные сдвиги от ( 0 до 6)
50 for shift = 0:6
51     b_shift = circshift(b1, shift); % circshift - циклически сдвигает
      массив b вправо
52     corr = sum(a1 .* b_shift); % Считаем корреляцию: умножаем элементы
      a и b_shift и складываем
53     results = [results, corr];
54 end
55
56 % Находим где была самая большая корреляция
57 [best_corr, best_shift] = max(results);
58 fprintf('Лучшая корреляция: %.2f при сдвиге %d\n', best_corr,
      best_shift-1);
59
60 % График зависимости корреляции от сдвига
61 figure;
62 plot(0:6, results, 'o-');
63 title('Корреляция от сдвига');
64 xlabel('Сдвиг'); ylabel('Корреляция');
65
66 % Графики при лучшем сдвиге
67 b_best = circshift(b1, best_shift-1);
68 figure;
69 subplot(2,1,1);
70 stem(a1, 'filled');
71 title('Массив a максимальная ( корреляция ) ');
72 xlabel('Отсчет'); ylabel('Значение');
73 grid on;
74
75 subplot(2,1,2);
76 stem(b_best, 'filled');

```

```
77 title(['Массив b сдвиг( ' num2str(best_shift-1) ' , максимальная
    корреляция) ']);
78 xlabel('Отсчет'); ylabel('Значение');
79 grid on;
```

Листинг 5.2 — Анализ корреляции сигналов в MATLAB

5.3 Репозиторий GitHub



Рисунок 6 — QR-код репозитория GitHub с исходным кодом