

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ ГОСУДАР-
СТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Исследование характеристик навигационных сигналов систем GPS, GALILEO, ГЛОНАСС

Электронный лабораторный практикум

САМАРА

2011

Составители: **Корнилин Дмитрий Владимирович,**
Кудрявцев Илья Александрович

Рецензент:

Заведующий межвузовской кафедрой космических исследований профессор
И. В. Белоконов

Исследование характеристик навигационных сигналов систем GPS, GALILEO, ГЛОНАСС [Электронный ресурс] : электрон. лаб. практикум / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. Д. В. Корнилин, И. А. Кудрявцев. - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,32 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В лабораторном практикуме рассматриваются вопросы по исследованию основных характеристик спутниковых радионавигационных сигналов систем GPS, ГЛОНАСС, GALILEO в виде открытых программных комплексов в среде MatLab. Лабораторный практикум по дисциплинам «Радионавигационные системы»(210400.68) и «Основы теории радионавигационных систем» (210601.65) разработан на кафедре РТУ радиотехнического факультета для магистрантов направления подготовки 210400.68 «Радиотехника», занятия в семестре А и студентов специальности 210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы», занятия в семестре 9.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 НАВИГАЦИОННЫЕ СИГНАЛЫ СИСТЕМ GPS, GALILEO, ГЛОНАСС.....	5
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО КОДА СИГНАЛОВ СПУТНИКОВ GPS..	7
2.1 Генерация псевдослучайного кода сигнала спутника GPS.....	7
2.2 Дискретизация псевдослучайного кода сигнала спутника GPS.....	10
2.3 Исследование автокорреляционной функции псевдослучайного кода сигнала спутника GPS.....	11
2.4 Исследование взаимной корреляционной функции псевдослучайного кода сигнала спутника GPS.....	13
2.5 Исследование взаимной корреляционной функции псевдослучайного кода и копии кода сигнала спутника GPS.....	14
2.6 Исследование взаимной корреляционной функции суммы псевдослучайных кодов сигналов спутников GPS.....	16
2.7 Исследование взаимной корреляционной функции сигнала с шумом и копии сигнала спутников GPS.....	17
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО КОДА СИГНАЛОВ СПУТНИКОВ ГЛОНАСС.....	19
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО КОДА СИГНАЛОВ СПУТНИКОВ GALILEO.....	24
5 ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ.....	26
6 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	27

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум посвящен изучению особенностей сигналов глобальных навигационных систем GPS, ГЛОНАСС и GALILEO. Данные системы широко используются при решении задач навигации на земле, в воздухе и на море. В то же время современный этап развития радионавигации характеризуется широким использованием технологии глобальной навигации в персональных навигаторах и мобильных телефонах.

Одной из наиболее удобных технологий математического моделирования является система MatLab, имеющая в своем составе мощные средства для решения вычислительных задач и отображения информации.

В предлагаемом лабораторном практикуме рассматриваются вопросы исследования сигналов спутниковой радионавигации в виде лабораторных работ, выполняемых по завершенным программным продуктам, написанным в среде MatLab.

Методические указания позволяют студентам изучить основы создания сигналов радионавигационных систем, а также исследовать их основные характеристики в среде моделирования Matlab. Указания не претендуют на полноту описания всех особенностей кодовых сигналов или среды Matlab, приводятся лишь краткие пояснения, необходимые для понимания приведенных фрагментов программ и полученных результатов.

1 Навигационные сигналы систем GPS, GALILEO, ГЛОНАСС

На навигационных спутниках GPS, ГЛОНАСС и др. формируются и излучаются следующие сигналы:

$$s_i(t) = \sqrt{2 \cdot P_{i,L}} \cdot D_i(t) \cdot C_i(t) \cdot \cos(\omega_{L1} \cdot t + \theta) + \sqrt{2 \cdot P_{i,Q}} \cdot D_i(t) \cdot P_i(t) \cdot \sin(\omega_{L1} \cdot t + \theta); \quad (1.1)$$

$$s_i(t) = \sqrt{2 \cdot P_{i,Q}} \cdot D_i(t) \cdot P_i(t) \cdot \sin(\omega_{L2} \cdot t + \theta); \quad (1.2)$$

$$s_i(t) = \sqrt{2 \cdot P_{i,L}} \cdot D_i(t) \cdot C_i(t) \cdot \cos(\omega_{L5} \cdot t + \theta) + \sqrt{2 \cdot P_{i,Q}} \cdot C_i(t) \cdot \sin(\omega_{L5} \cdot t + \theta); \quad (1.3)$$

$$s_i(t) = \sqrt{2 \cdot P_i} \cdot D_{i,ГЛ}(t) \cdot C(t) \cdot \cos(\omega_{i,L1} \cdot t + \theta_i); \quad (1.4)$$

$$s_i(t) = \sqrt{2 \cdot P_i} \cdot D_{i,ГЛ}(t) \cdot C(t) \cdot \cos(\omega_{i,L2} \cdot t + \theta_i); \quad (1.5)$$

$$s_i(t) = \sqrt{2 \cdot P_{i,Geo}} \cdot D_{i,Geo}(t) \cdot C_{i,Geo}(t) \cdot \cos(\omega_{L1} \cdot t + \theta), \quad (1.6)$$

где $s_i(t)$ -сигнал i -го спутника; t -системное время соответствующего спутника; $P_{i,L}$ -мощность синфазной составляющей i -го спутника GPS; $D_i(t)$ -

данные i -го спутника GPS; $C_i(t)$ - C/A- код i -го спутника GPS; ω_{L1} - круговая частота спутника GPS , соответствующая частоте $L1$ с учетом доплеровского сдвига; $\phi_{i,Q}$ - начальный фазовый сдвиг; $P_{i,Q}$ - мощность квадратурной составляющей i -го спутника GPS; $P_i(t)$ - P- код i -го спутника GPS; ω_{L2} - круговая частота спутника GPS , соответствующая частоте $L2$ с учетом доплеровского сдвига; ω_{L5} - круговая частота спутника GPS , соответствующая частоте $L5$ с учетом доплеровского сдвига; P_i -мощность сигнала i -го спутника ГЛОНАСС; $D_{i,ГЛ}(t)$ -данные i -го спутника ГЛОНАСС; $C(t)$ - код спутника ГЛОНАСС; $\omega_{i,L1}$ - круговая частота i - спутника ГЛОНАСС, соответствующая частоте $L1$ с учетом доплеровского сдвига; $\omega_{i,L2}$ - круговая частота i -го спутника ГЛОНАСС, соответствующая частоте $L2$ с учетом доплеровского сдвига; $P_{i,Geo}$ -мощность сигнала геостационарного спутника; $C_{i,Geo}(t)$ - код геостационарного спутника.

В выражениях (1.1-1. 2) составляющие сигнала $D(t)$ (индексы опущены) в идеализированном виде представляют данные, передаваемые навигационными спутниками в виде символов с амплитудой ± 1 , длительностью 20 миллисекунд и частотой следования 50 Гц. Составляющие $C_i(t)$ есть псевдослучайные последовательности символов с амплитудой ± 1 , длительностью 0.97752 микросекунд, частотой следования 1.023 МГц, периодом повторения 1 миллисекунда. Составляющие $P_i(t)$ есть псевдослучайные последовательности символов с амплитудой ± 1 , длительностью 0.097752 микросекунд, частотой следования 10.23 МГц, периодом повторения 7 суток. В формулах (1. 3, 1. 4) составляющая сигнала $D(t)$ (индексы опущены) в идеализированном виде представляют данные, передаваемые спутниками в виде символов с амплитудой ± 1 , длительностью 20 миллисекунд и частотой следования 50 Гц. Составляющие $C(t)$ есть псевдослучайные последовательности символов с амплитудой ± 1 , длительностью 1.9569 микросекунд, частотой следования 0. 511 МГц, периодом повторения 1 миллисекунда. В формуле (1. 5) составляющая сигнала $D(t)$ (индексы опущены) в идеализированном виде представляют данные, передаваемые геостационарными спутниками, в виде символов с амплитудой ± 1 и частотой следования 250 бит/с. Составляющие $C(t)$ есть псевдослучайные последовательности символов с амплитудой

Сигналы (1.1-1. 6) получили название - сигналов с расширенным спектром (spread-spectrum signal). Такие сигналы характеризуются следующими признаками: полоса частот, в которой передаются данные $D(t)$ значительно шире минимально необходимой; расширение спектра сигнала производится шумоподобными сигналами $C(t)$ или $P(t)$; восстановление данных в приемнике производится путем сопоставления принятого сигнала с его копией после синхронизации. Сигналы навигационных спутников, как на спутниках, так и в навигационных приемниках потребителя подвергаются специальной обработке для эффективной передачи, поиска, обнаружения, слежения, измерения в условиях помех данных без потери информации.

2 Исследование псевдослучайного кода сигналов спутников GPS

2.1 Генерация псевдослучайного кода сигнала спутника GPS

Запустите MatLab, откройте М-файл с функцией cod_GPS.

Функция cod_GPS (формирование псевдослучайного кода спутников GPS)

```
function [cod, cod_bin, column_7, n]=cod_GPS(Sv_id, n);
```

```
%{
```

```
Имя: cod_GPS
```

```
Функция предназначена для генерации псевдослучайного кода  
любого спутника GPS генерация 37 C/A кодов
```

```
Sv_id - номер спутника
```

```
cod - вектор, содержащий выходную последовательность
```

```
g2s - вектор, содержащий соответствующие значения сдвига кода g2 для  
получения кода C/A требуемого спутника (например,  
для Sv_id=25 – используется сдвиг = 513)
```

```
n- количество символов в последовательности
```

```
%}
```

```
%сдвиг кода в соответствии с ICD-GPS-200C для 37 значений
```

```
g2s=[5;6;7;8;17;18;139;140;141;251;252;254;255;256;257;258;...
```

```
469;470;471;472;473;474;509;512;513;514;515;516;859;...
```

```
860;861;862;863;950;947;948;950];
```

```
g2shift=g2s(Sv_id);
```

```
%{
```

```
генерация последовательности G1 согласно
```

```
n = 20;
```

```
%}
```

```
%начальное состояние регистра сдвига
```

```
shift_reg=-ones(1,10);
```

```
for i=1:n
```

```
    g1(i)=shift_reg(10); %последовательность G1
```

```
    % сложение (заменено умножением) по модулю 2 третьего и 10 разрядов
```

```
    % регистра
```

```
    modulo2=shift_reg(3)*shift_reg(10);
```

```
    % сдвиг разрядов 1:9
```

```
    shift_reg(2:10)=shift_reg(1:9);
```

```
    % присвоение modulo2 первому разряду регистра
```

```
    shift_reg(1)=modulo2;
```

```
end
```

```
g1;
```

```
% генерация кода G2 согласно
```

```
% начальное состояние регистра сдвига
```

```
shift_reg=-ones(1,10);
```

```
for i=1:n
```

```
    g2(i)=shift_reg(10); %последовательность G2
```

```
    % сложение (заменено умножением) по модулю 2 второго,3,6,8,9,10
```

```
    % разрядов регистра
```

```
    modulo2=shift_reg(2)*shift_reg(3)*shift_reg(6)*shift_reg(8)...
```

```
    *shift_reg(9)*shift_reg(10);
```

```
    % сдвиг разрядов 1:9
```

```
    shift_reg(2:10)=shift_reg(1:9);
```

```
    % присвоение modulo2 первому разряду регистра
```

```

shift_reg(1)=modulo2;
end
g2;
[G1_G2] = [g1; g2]';
% сдвиг G2 на соответствующее номеру спутника число бит
g2tmp(1:g2shift)=g2(n-g2shift+1:n);
g2tmp(g2shift+1:n)=g2(1:n-g2shift);
%Сохранение сдвинутого кода
g2=g2tmp;
% формирование C/A кода поразрядным умножением G1 и G2
cod=g1.*g2;
%формирование кода спутника GPS в двоичных символах
cod_bin=-(cod-1)/2;
% формирование контрольного числа согласно в соответствии с ICD-GPS-200C
str=sprintf('%d',cod_bin(1:10));
column_7=dec2base(bin2dec(str),8,4);

```

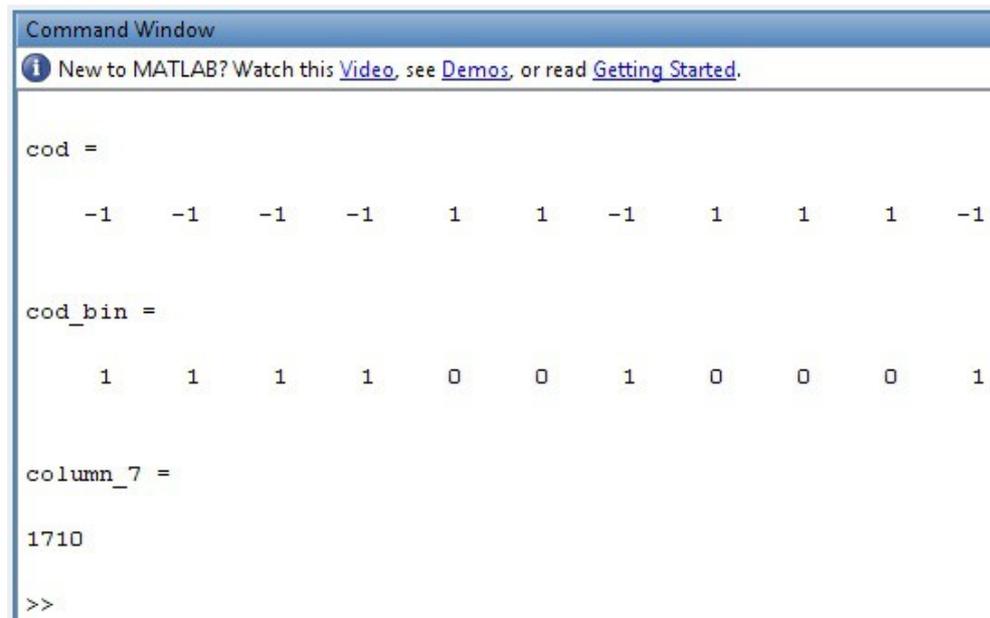
Создайте или откройте М-файл PR1_cod_GPS.m.

```

%Пример PR1_cod_GPS.m
%Входные данные
Sv_id=3;% номер спутника
n=1023;% количество символов
[cod, cod_bin,column_7,n]=cod_GPS(Sv_id,n);
% Выходные данные
cod=cod(1:11) % 11 символов
cod_bin=cod_bin(1:11) % 11 символов в бинарном виде (0 и 1)
column_7 %восьмеричное число первых 10 символов спутника № 2

```

Запустите М-файл PR1_cod_GPS.m на выполнение командой Debug\Run PR1_cod_GPS.m



```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

cod =

    -1    -1    -1    -1     1     1    -1     1     1     1    -1

cod_bin =

     1     1     1     1     0     0     1     0     0     0     1

column_7 =

1710

>>

```

Рисунок 1 - Результат выполнения m- файла PR1_cod_GPS.m

Запишите полученный сгенерированный код спутника и занесите его в отчет. Получите коды спутников с другими номерами, поэкспериментируйте с количеством символов и выходными данными.

Для одновременного расчета кодов нескольких спутников можно использовать следующий М-файл

Файл PR2_cod_GPS.m

```
clear
%Пример PR2_cod_GPS.m
%Расчет кодов любого или всех спутников
n=1023;
for Sv_id=1:37
[cod(Sv_id,:),cod_bin(Sv_id,:),col_7(Sv_id,:),n]=cod_GPS(Sv_id,n);
end
cod1=cod(1:23,10:30) %вывод в командное окно кодов 23 спутников в символах +1 и -1
cod2=cod_bin(1:23,10:30)' %вывод в командное окно кодов 23 спутников в символах 1 и 0
col_7(1:5,:) % вывод в командное окно восьмеричных значений кодов 1...5 спутников
%{
```

Сохраните полученные результаты выполнения

cod1 =

cod2 =

ans =

Для визуализации кода сигнала спутника GPS создайте и запустите на выполнение следующий М-файл:

Файл Pr3_cod_GPS.m

```
clear
%Пример Pr3_cod_GPS
%Визуализация кода GPS
n=1023;
for Sv_id=1:37
[cod(Sv_id,:),cod_bin(Sv_id,:),column_7,n]=cod_GPS(Sv_id,n);
col_7(Sv_id,:)= column_7;
end
M_P=cod_bin(2,1:30);
M_P1=cod(2,1:30);
stem(M_P), axis([ 0 30 -0.1 1.1])
xlabel('Код GPS в двоичных символах', 'FontName','Times New Roman ', 'FontSize',12')
grid
figure
stem(M_P1),axis([ 0 30 -1.1 1.1])
xlabel('Код GPS в символах "1", "-1"', 'FontName','Times New Roman ', 'FontSize',12')
grid
```

Результат выполнения файла приведен на рисунке 2

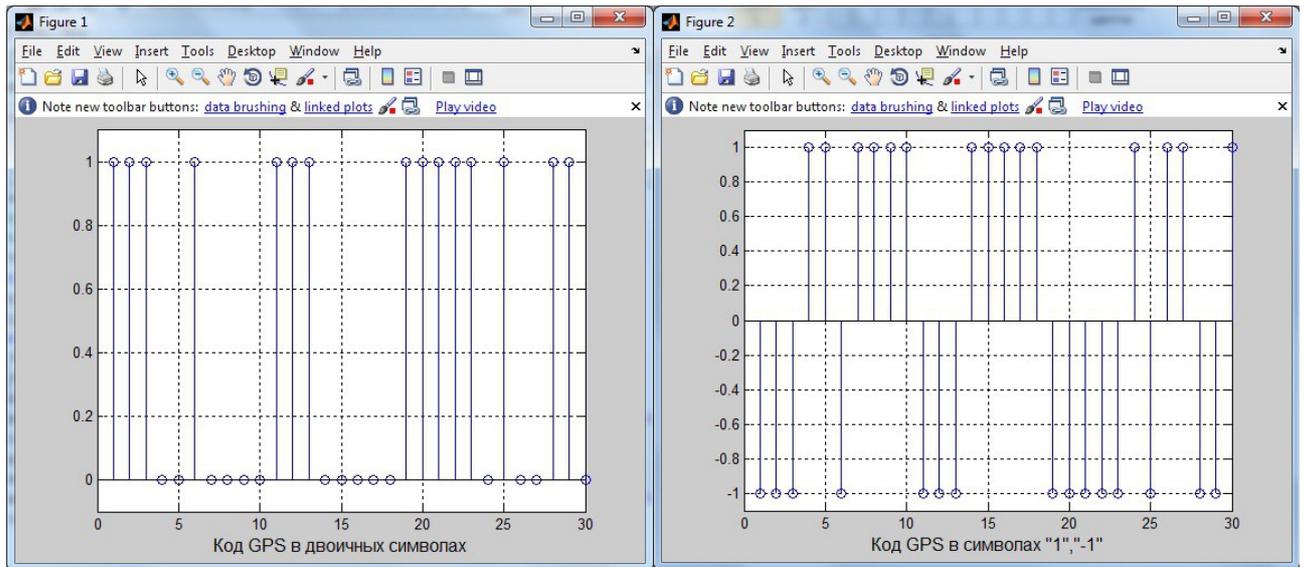


Рисунок 2 - Пример визуализации кода спутника GPS с помощью среды Matlab

Постройте коды спутников с другими номерами, используя приведенный выше пример.

2.2 Дискретизация псевдослучайного кода сигнала спутника GPS

При генерации цифровых сигналов кодов спутников используют дискретизацию сигналов с определенной частотой. Для построения сигналов с заданной частотой дискретизации воспользуйтесь следующим М-файлом.

Файл Pr4_cod_GPS.m

```
clear
```

```
%Пример Pr4_cod_GPS.m
```

```
%Дискретизация кода спутника GPS
```

```
n=1023;
```

```
for Sv_id=1:37
```

```
[cod(Sv_id,:),cod_bin(Sv_id,:),column_7,n]=cod_GPS(Sv_id,n);
```

```
col_7(Sv_id,:)= column_7;
```

```
end
```

```
Cod3 = cod(3,:);
```

```
%Дискретизация
```

```
Fd=1.023*10^6;%символьная скорость
```

```
FsFd=4;% отношение частоты дискретизации к символьной скорости
```

```
Fs=Fd*FsFd;% частота дискретизации
```

```
t=(0:length(Cod3)*FsFd-1)/Fs;% дискретное время
```

```
F_mod1 = Cod3(floor(Fd*t)+1);%код
```

```

A_2=F_mod1(1:n);%код GPS
subplot(1,2,1), stem( cod(3,1:30)),axis([ 0 30 -1.1 1.1])
xlabel('a', 'FontSize',12, 'FontName','TimesNewRoman')
grid
subplot(1,2,2), stem( A_2(1:60)),axis([ 0 60 -1.1 1.1])
xlabel('b','FontSize',12,'FontName','TimesNewRoman')
grid

```

Результат выполнения файла изображен на рисунке 3.

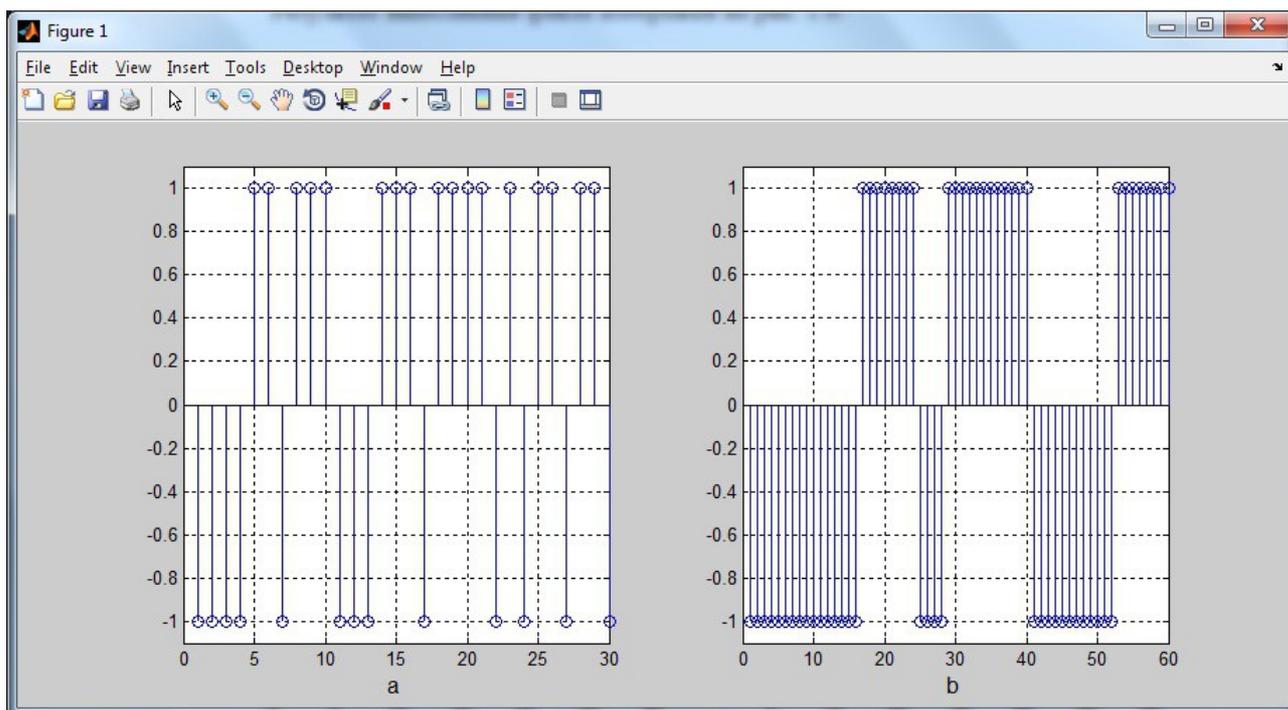


Рисунок 3 - Пример визуализации дискретизации кода спутника GPS с помощью среды Matlab (сигнал спутника без дискретизации — а и с параметром дискретизации 4 -б)

Поэкспериментируйте с другими частотами дискретизации, измените номер спутника и повторите эксперимент.

2.3 Исследование автокорреляционной функции псевдослучайного кода сигнала спутника GPS

Псевдослучайные коды сигналов спутников GPS используют для повышения отношения сигнал/шум. С целью оценки эффективности использования шумоподобных сигналов проведите исследование их автокорреляционной функции. Для визуализации автокорреляционной функции кода сигнала спутника GPS создайте и запустите на выполнение следующий M-файл.

```

Файл Pr5_cod_GPS.m
clear

```

```

%Имя файла:Pr5_cod_GPS.m
%Автокорреляционная функция кода GPS
n=1023;
for Sv_id=1:37
[cod(Sv_id,:),cod_bin(Sv_id,:),column_7,n]=cod_GPS(Sv_id,n);
col_7(Sv_id,:)= column_7;
end
Cod4 = cod(4,:);
%Dискретизация
Fd=1.023*10^6;%символьная скорость
FsFd=2;% отношение частоты дискретизации к символьной скорости
Fs=Fd*FsFd;% частота дискретизации
t=(0:length(Cod4)*FsFd-1)/Fs;% дискретное время
F_mod1 = (1/sqrt(FsFd))*Cod4(floor(Fd*t)+1);%код
m=n*FsFd;
nn=1023*FsFd;
A_2=F_mod1(1:m);%код GPS
[CorA2,lags]=xcorr(A_2,nn);%автокорреляция кода GPS
subplot(1,2,1) ,plot(CorA2), axis([ 0 2*nn -100 1100])
xlabel('a','FontSize',12, 'FontName','TimesNewRoman')
grid on
subplot(1,2,2) , plot(CorA2), axis([ 0 nn -150 150])
xlabel('б', 'FontSize',12,'FontName','TimesNewRoman')
grid on

```

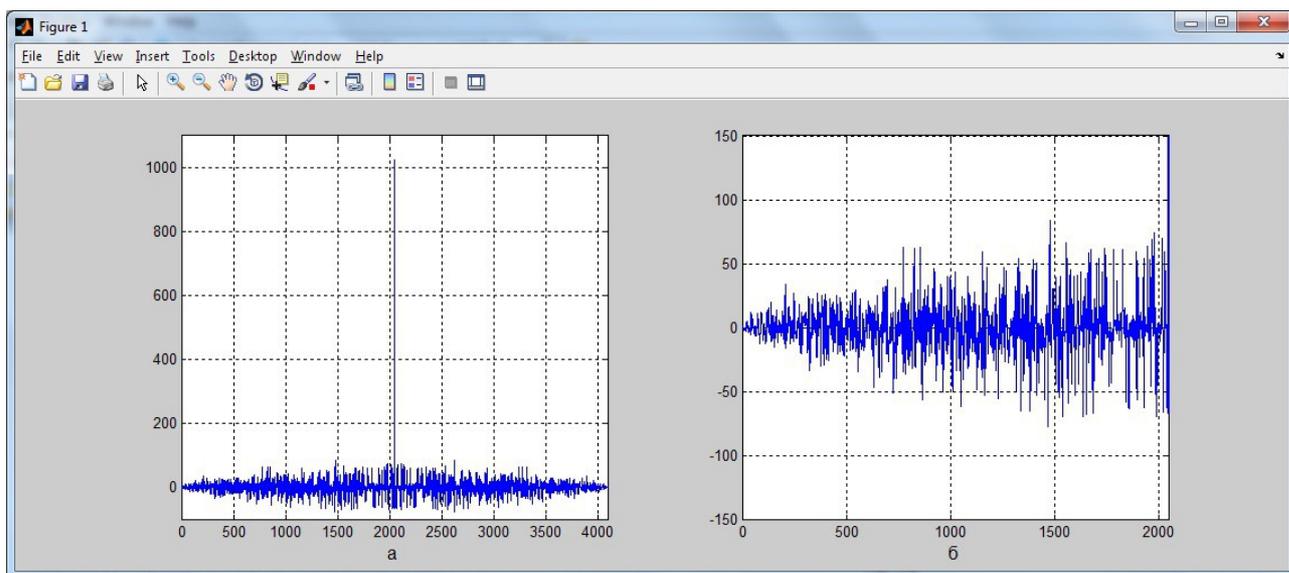


Рисунок 4 - Пример автокорреляционной функции кода GPS (автокорреляция кода сигнала спутника - а, боковые лепестки функции автокорреляции — б)

Результат выполнения файла изображен на рисунке 4. Определите величину превышения пика автокорреляционной функции по сравнению с уровнем боковых лепестков. Измените номер спутника и повторите эксперимент, определите, каким образом частота дискретизации влияет на вид функции автокорреляции.

2.4 Исследование взаимной корреляционной функции псевдослучайного кода сигнала спутника GPS

Сигналы других спутников GPS имеют схожую структуру с данным, поэтому необходимо оценить взаимное влияние шумоподобных кодов соседних спутников. С этой целью наиболее эффективной является оценка с помощью использования взаимной корреляционной функции. Для визуализации взаимной корреляционной функции кода сигнала спутника GPS создайте и запустите на выполнение следующий М-файл.

Файл Pr6_cod_GPS.m

```
clear
%Имя файла:Pr6_cod_GPS.m
%Взаимная корреляция кодов спутников GPS
n=1023;
for Sv_id=1:37
[cod(Sv_id,:),cod_bin(Sv_id,:),column_7,n]=cod_GPS(Sv_id, n);
col_7(Sv_id,:)= column_7;
end
Cod24 =cod(24,:);
Cod13 =cod(13,:);
%Dискретизация
Fd=1.023*10^6;%символьная скорость
FsFd=2;% отношение частоты дискретизации к символьной скорости
Fs=Fd*FsFd;% частота дискретизации
t=(0:length(Cod24)*FsFd-1)/Fs;% дискретное время
F_mod1 = (1/sqrt(FsFd))*Cod24(floor(Fd*t)+1);%код
F_mod3 = (1/sqrt(FsFd))*Cod13(floor(Fd*t)+1);%код
m=n;
m=n*FsFd;
nn=1023*FsFd;
A_2=F_mod1(1:m);%код GPS
A_3=F_mod3(1:m);%код GPS
Cor_13_24 = xcorr(A_2,A_3,nn);%взаимная корреляция кода 13 и 24
Cor_13_24_1 = xcorr(A_2(1:1023),A_3(1:1023),nn/2);
%Графика сигналов
subplot(1, 2, 1), plot(Cor_13_24),axis([ 0 2*nn -100 100])
xlabel('a ', 'FontSize',12,'FontName','TimesNewRoman')
grid on
subplot(1, 2, 2), plot(Cor_13_24_1),axis([0 nn -100 100])
xlabel('б ', 'FontSize',12,'FontName','TimesNewRoman')
grid on
```

Результат выполнения файла изображен на рисунке 5.

Определите максимальный уровень шумового сигнала при взаимном влиянии сигналов спутников. Сравните его с уровнем боковых лепестков автокорреляционной функции. Измените номера спутников и повторите эксперимент.

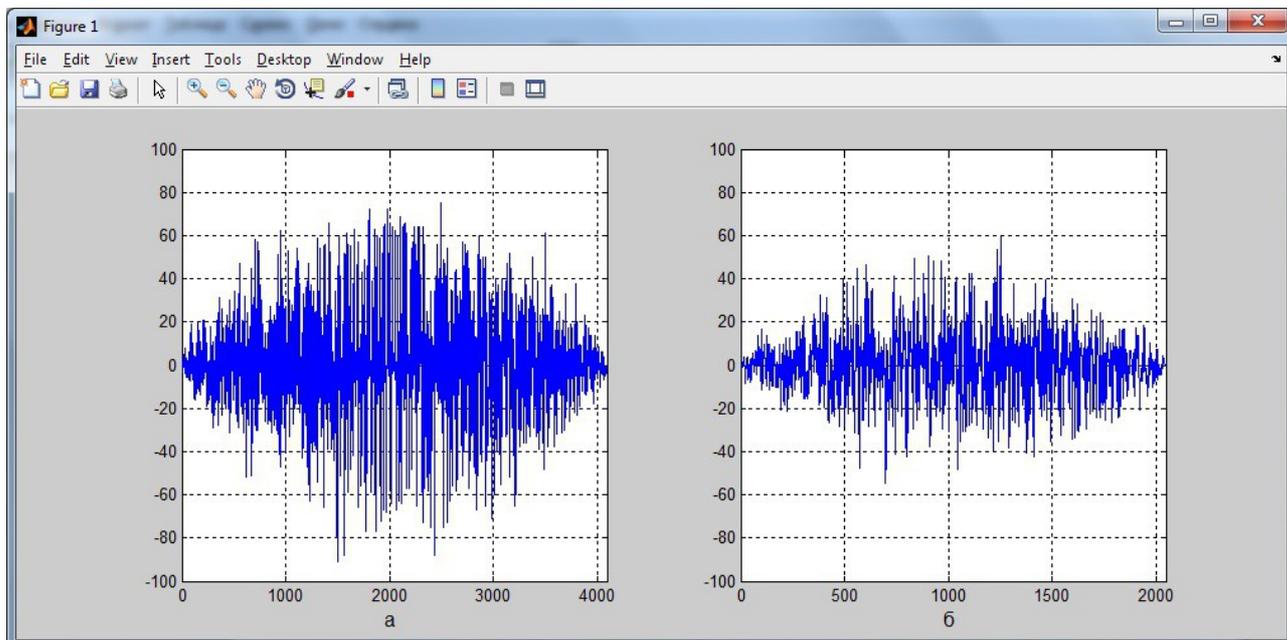


Рисунок 5 - Взаимная корреляционная функция сигналов спутников (а - на всем интервале одного периода кода; б- на половине интервала одного периода кода)

2.5 Исследование взаимной корреляционной функции псевдослучайного кода и копии кода сигнала спутника GPS

Проведите исследование взаимной корреляционной функции псевдослучайного кода и копии кода спутника GPS. Этот случай имеет место в случае прихода кодов одного и того же спутника к приемнику различными путями. Для визуализации взаимной корреляционной функции кода и копии кода сигнала спутника GPS создайте и запустите на выполнение следующий М-файл.

Файл Pr7_cod_GPS.m

```
clear
%Имя файла:Pr7_cod_GPS.m
%Взаимная корреляция кода и копии кода спутников GPS
n=1024*2;
for Sv_id=1:37
[cod(Sv_id,:),cod_bin(Sv_id,:),column_7,n]=cod_GPS(Sv_id,n);
col_7(Sv_id,:)= column_7;
end
Cod24 = cod(24,:);
%Дискретизация
Fd=1.023*10^6;%символьная скорость
FsFd=2;% отношение частоты дискретизации к символьной скорости
Fs=Fd*FsFd;% частота дискретизации
t=(0:length(Cod24)*FsFd-1)/Fs;% дискретное время
F_mod1 = (1/sqrt(FsFd))*Cod24(floor(Fd*t)+1);%код
m=n*FsFd;
nn=1023*FsFd;
A_2=F_mod1(1:m);%код GPS
Cor_24 = xcorr(A_2(500:2546),nn);%автокорреляция кода спутника
Cor_24_24_2 = xcorr(A_2(500:2546),A_2(500:2546),nn);%автокорреляция кода спутника с точной копией
```

```

Cor_24_24 = xcorr(A_2(498:2540),A_2(500:2546),nn);%взаимная корреляция кода с задержан-
ной на 2 отсчета копией кода
Cor_24_24_1 = xcorr(A_2(502:2548),A_2(500:2536),nn);%взаимная корреляция кода с опере-
жающей на 2 отсчета копией кода
%Графика сигналов
subplot(4, 1, 1), stem(Cor_24_24),axis([ 2040 2055 -100 1100])
xlabel('а ', 'FontSize',12, 'FontName', 'TimesNewRoman')
grid on
subplot(4, 1, 2), stem(Cor_24),axis([ 2040 2055 -100 1100])
xlabel('б ', 'FontSize',12, 'FontName', 'TimesNewRoman')
grid on
subplot(4,1,3), stem(Cor_24_24_2),axis([ 2040 2055 -100 1100])
xlabel('в ', 'FontSize',12, 'FontName', 'TimesNewRoman')
grid on
subplot(4, 1, 4), stem(Cor_24_24_1),axis([2040 2055 -100 1100])
xlabel('г ', 'FontSize',12, 'FontName', 'TimesNewRoman')
grid on

```

Результат выполнения файла изображен на рисунке 6.

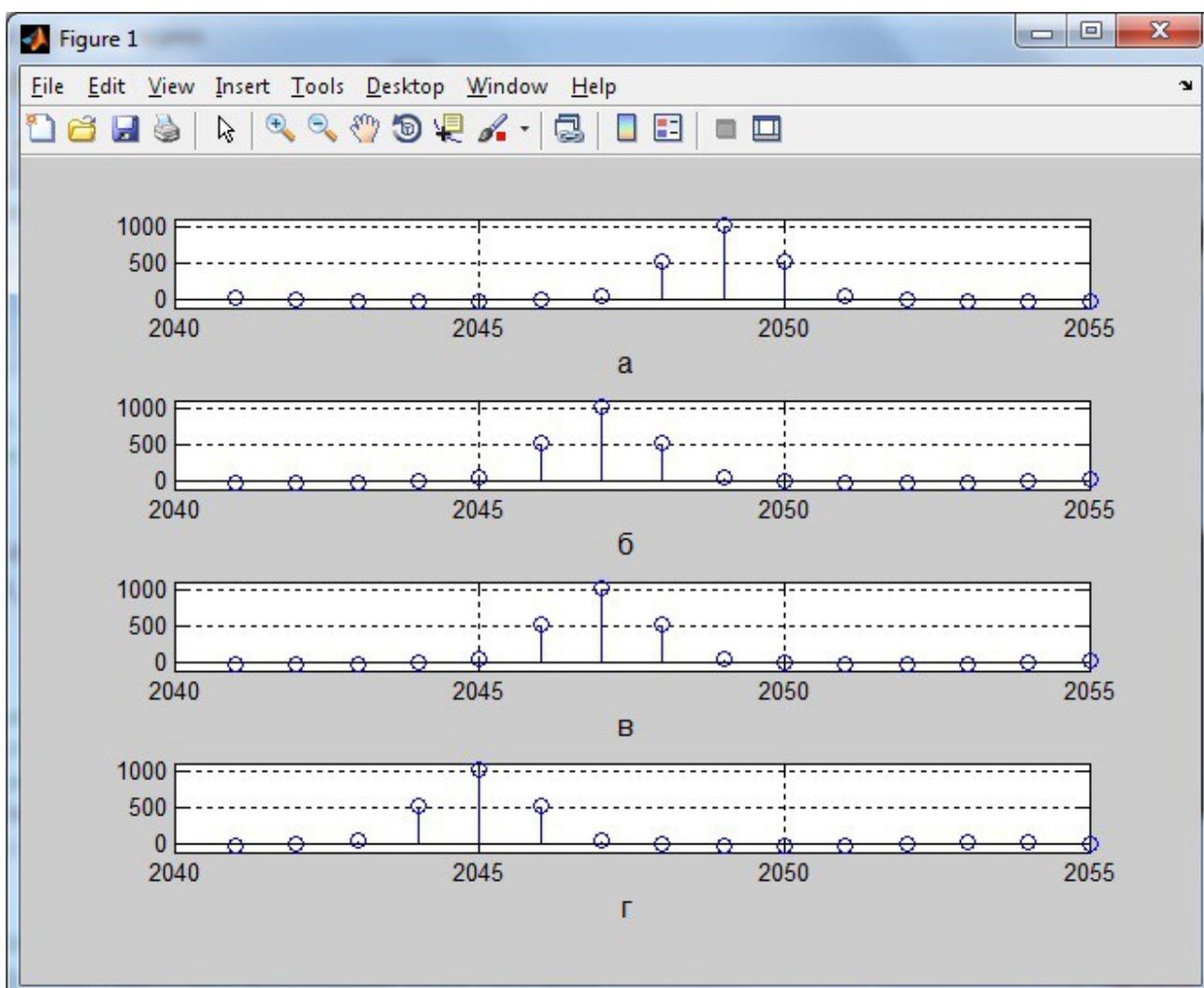


Рисунок 6 - Взаимная корреляционная функция псевдослучайного кода и копии кода сигнала спутника GPS (а - копия опережает код на 2 отсчета; б - автокорреляция кода сигнала; в - взаимная корреляция кода и копии; в-копия отстает от кода сигнала на 2 отсчета)

Измените номер спутника и повторите эксперимент.

2.6 Исследование взаимной корреляционной функции суммы псевдослучайных кодов сигналов спутников GPS

Проведите исследования корреляционных свойств суммы сигналов. Для этого используйте файл Pr8_CodGPS.m.

Файл Pr8_cod_GPS.m

```
clear
%Имя файла:Pr8_CodGPS.m
% программа позволяет исследовать корреляционные свойства суммы сигналов
% спутников GPS
n=1023;
for Sv_id=1:37
[cod(Sv_id,:),cod_bin(Sv_id,:),column_7,n]=cod_GPS(Sv_id,n);
col_7(Sv_id,:)= column_7;
end
Cod9 = cod(9,:);
col_7(37,:);
Cod26 =cod(26,:);
M_P=cod_bin(37,:);
% Сумма кодов видимых спутников 2, 4, 5, 9,14, 17, 24, 30
Cod_Sym= cod(2,:)+cod(4,:)+cod(5,:)+cod(9,:)+cod(14,:)+...
cod(17,:)+cod(24,:)+cod(30,:);
%Dискретизация
Fd=1.023*10^6;%символьная скорость
FsFd=2;% отношение частоты дискретизации к символьной скорости
Fs=Fd*FsFd;% частота дискретизации
t=(0:length(Cod9)*FsFd-1)/Fs;% дискретное время
F_mod26 = (1/sqrt(FsFd))*Cod26(floor(Fd*t)+1);%код спутника 26, находящегося вне
зоны видимости
F_mod9 = (1/sqrt(FsFd))*Cod9(floor(Fd*t)+1);%код
% сумма кодов 8 спутников 2, 4, 5, 9,14, 17, 24, 30
Sym_Cod = (1/sqrt(FsFd))*Cod_Sym(floor(Fd*t)+1);
%k=0;%сдвиг кода
m=n*FsFd;
nn=1023*FsFd;;
A_26=F_mod26(1:m);%код GPS
A_9=F_mod9(1:m);%код GPS
Cor_Sym = xcorr(Sym_Cod,nn);%автокорреляция сумма кодов 8 спутников
Cor_26_Sym = xcorr(Sym_Cod,A_26,nn);%взаимная корреляция
Cor_9_Sym = xcorr(Sym_Cod,A_9,nn);%взаимная корреляция
%Графика сигналов
subplot(4,1,1) , plot(Sym_Cod),axis([ 0 2100 -10 10])
xlabel('a','FontSize',12,'FontName','TimesNewRoman')
grid on
subplot(4,1,2) , plot(Cor_Sym),axis([ 0 2*nn -1000 10000])
xlabel('б','FontSize',12, 'FontName','TimesNewRoman')
grid on
subplot(4,1,3) , plot(Cor_26_Sym),axis([ 0 2*nn -400 400])
xlabel('в','FontSize',12, 'FontName','TimesNewRoman')
```

```

grid on
subplot(4,1,4) , plot(Cor_9_Sym),axis([ 0 2*nn -100 1100])
xlabel('r','FontSize',12, 'FontName','TimesNewRoman')
grid on

```

Результат выполнения файла изображен на рисунке 7.

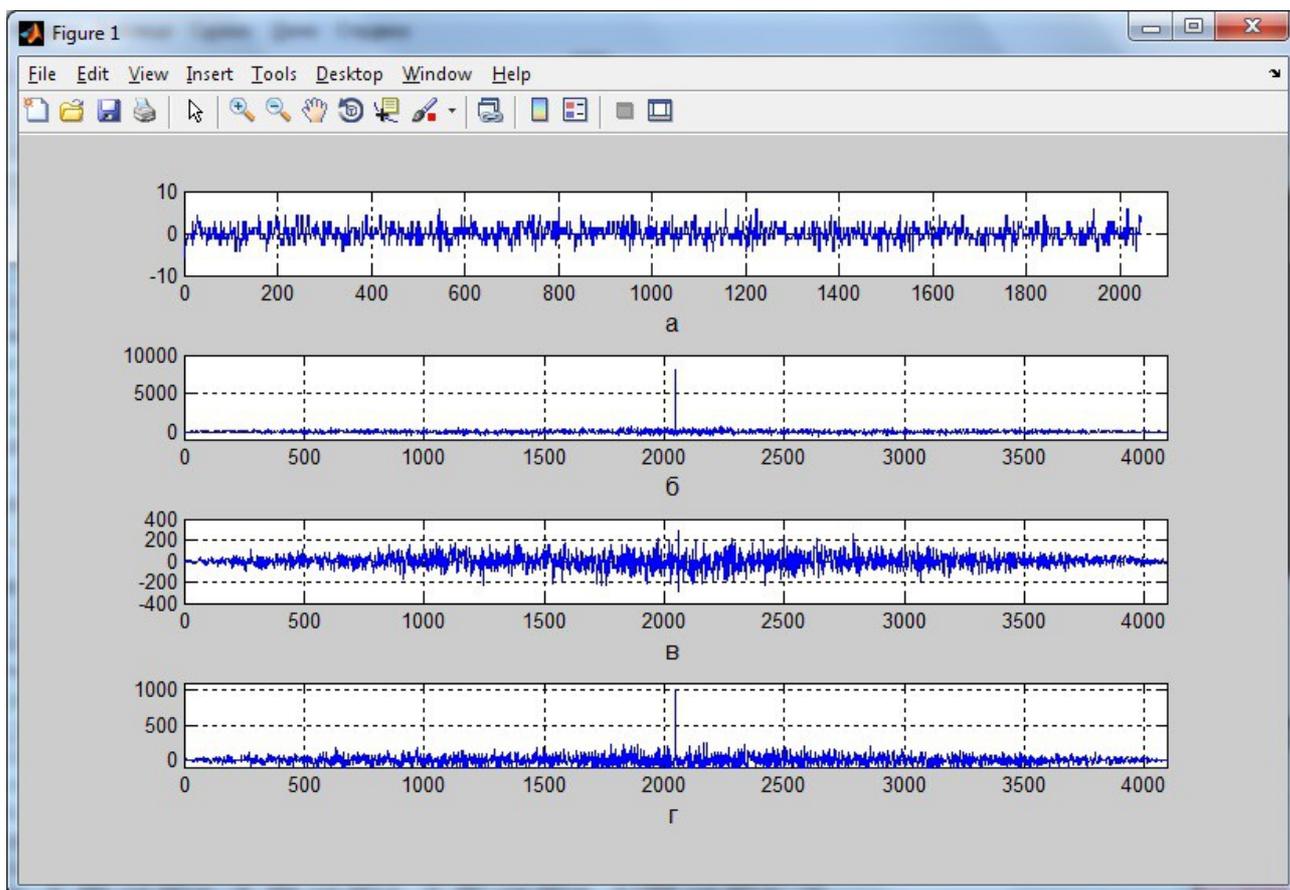


Рисунок 7 - Взаимные корреляционные характеристики сумм сигналов: а- сумма кодов 8 спутников; б - автокорреляция суммы кодов 8 спутников; в-корреляция суммы кодов 8 спутников и спутника 26; 'г-корреляция суммы кодов 8 спутников и спутника 9.

Объясните отличие вида автокорреляционной функции на рисунке 7, в и 7, г. Проведите сравнение вида автокорреляционной функции для различных номеров спутников, входящих в группировку и не входящего в нее.

2.7 Исследование взаимной корреляционной функции сигнала с шумом и копии сигнала спутников GPS

Пример m- файла для исследования корреляционных свойств сигнала с шумом и копии сигнала. В файле в качестве источника шума использована функция MatLab «randn». Программа иллюстрирует качественную картину влияния шума на взаимную корреляцию сигнала с шумом и копии сигнала. Для получения количественных значений в m- файл следует подставить конкретные значения соотношения сигнал/шум.

Файл Pr09_cod_GPS.m

```

clear
%Имя файла:Pr09_CodGPS.m
% программа взаимной корреляции сигнала с шумом и копии сигнала
% спутников GPS
n=1023;
for Sv_id=1:37
[cod(Sv_id,:),cod_bin(Sv_id,:),column_7,n]=cod_GPS(Sv_id,n);
col_7(Sv_id,:)= column_7;
end
Cod37 = cod(37,:);
col_7(37,:);
Noise=0;%коэффициент усиления генератора шума
Noise1= Noise*(randn(n,1))';%генерация шума

Noise2= 4*(randn(n,1))';%генерация шума
Noise5= 8*(randn(n,1))';%генерация шума
Noise10=12*(randn(n,1))';%генерация шума
%Дискретизация
Fd=1.023*10^6;%символьная скорость
FsFd=2;% отношение частоты дискретизации к символьной скорости
Fs=Fd*FsFd;% частота дискретизации
t=(0:length(Cod37)*FsFd-1)/Fs;% дискретное время
Cod37 = (1/sqrt(FsFd))*Cod37(floor(Fd*t)+1);%код
Noise_mod=(1/sqrt(FsFd))*Noise1(floor(Fd*t)+1);%шум
Noise_mod2=(1/sqrt(FsFd))*Noise2(floor(Fd*t)+1);%шум
Noise_mod5=(1/sqrt(FsFd))*Noise5(floor(Fd*t)+1);%шум
Noise_mod10=(1/sqrt(FsFd))*Noise10(floor(Fd*t)+1);%шум
%Noise_mod=(1/sqrt(FsFd))*Noise1(floor(Fd*t)+1);%шум
%Noise_mod=(1/sqrt(FsFd))*Noise1(floor(Fd*t)+1);%шум
Cod37Noise = Cod37 +Noise_mod;% код плюс шум
Cod37Noise2 = Cod37 +Noise_mod2;% код плюс шум
Cod37Noise5 = Cod37 +Noise_mod5;% код плюс шум
Cod37Noise10 = Cod37 +Noise_mod10;% код плюс шум
m=n*FsFd;
nn=1023*FsFd;
Cod37Noise = Cod37Noise(1:m);%код GPS+ шум
Cod37Noise2= Cod37Noise2(1:m);%код GPS+ шум
Cod37Noise5= Cod37Noise5(1:m);%код GPS+ шум
Cod37Noise10= Cod37Noise10(1:m);%код GPS+ шум
Cod37=Cod37(1:m);%код GPS
Cor_Cod37_Noise = xcorr(Cod37,Cod37Noise ,nn);%взаимная корреляция копии кода
GPS и сигнала с шумом
Cor_Cod37_Noise2 = xcorr(Cod37,Cod37Noise2 ,nn);%взаимная корреляция копии кода
GPS и сигнала с шумом
Cor_Cod37_Noise5 = xcorr(Cod37,Cod37Noise5 ,nn);%взаимная корреляция копии кода
GPS и сигнала с шумом
Cor_Cod37_Noise10 = xcorr(Cod37,Cod37Noise10 ,nn);%взаимная корреляция кода
GPS и шума
%Графика
subplot(4,1,1) ,stem(Cor_Cod37_Noise), axis([1500 2500 -100 1200])
xlabel('a','FontSize',12,'FontName', 'TimesNewRoman')

```

```

grid on
subplot(4,1,2) ,stem(Cor_Cod37_Noise2 ),axis([ 1500 2500 -100 1300])
xlabel('б','FontSize',12,'FontName','TimesNewRoman')
grid on
subplot(4,1,3) ,stem( Cor_Cod37_Noise5),axis([ 1500 2500 -100 1300])
xlabel('в','FontSize',12,'FontName','TimesNewRoman')
grid on
subplot(4,1,4) ,stem(Cor_Cod37_Noise10),axis([ 1500 2500 -100 1300])
xlabel('г','FontSize',12,'FontName','TimesNewRoman')
grid on

```

Результат выполнения М-файла изображен на рисунке 8.

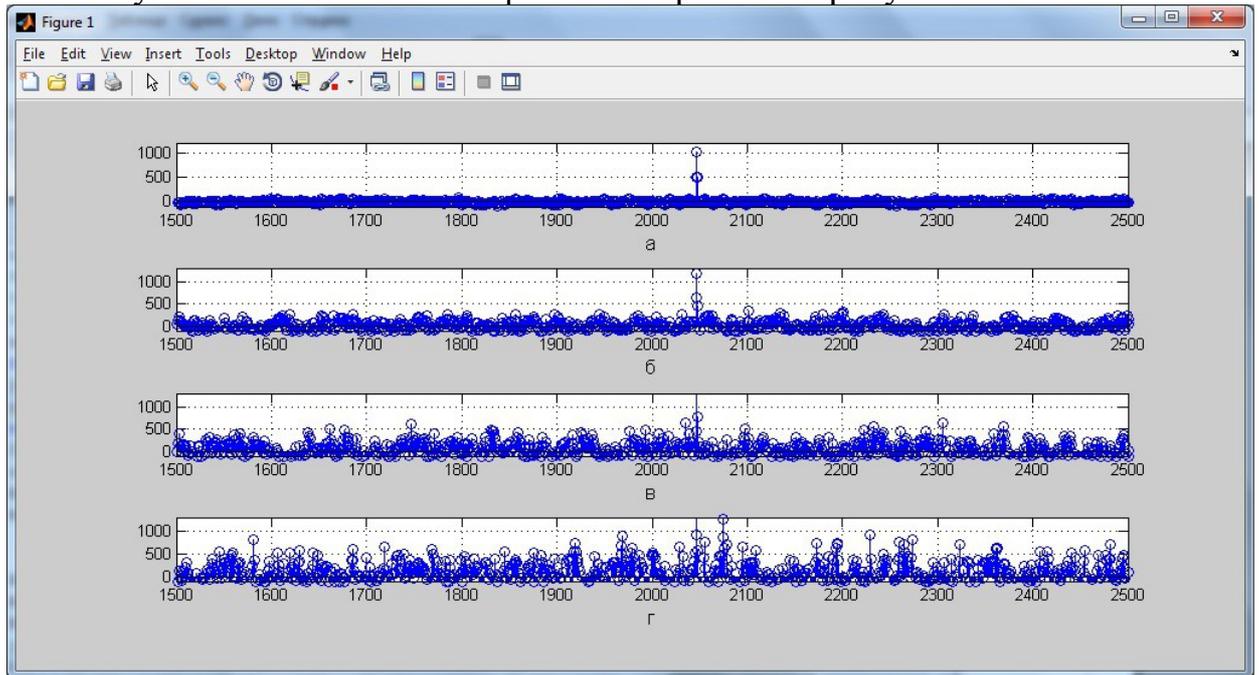


Рисунок 8 - Взаимная корреляционная функция сигнала с шумом и копии сигнала спутника GPS (а - шум отсутствует; б - шум в 4 раза больше сигнала; в - шум в 8 раз больше сигнала; г- шум в 12 раз больше сигнала)

Объясните превышение величины полезного сигнала над шумом для каждого случая, изображенного на рисунке 8. Определите величину шума, при которой величина пика будет равна величине шума.

3 Исследование псевдослучайного кода сигналов спутников ГЛОНАСС

Проведите исследование псевдослучайного кода сигналов спутников ГЛОНАСС по аналогичной методике.

Для этого используйте функцию `cod_GLONASS` (формирование M- последовательности спутников ГЛО-НАСС), откройте М-файл и проанализируйте значение параметров.

```

function [codGL, codGL_bin,Out,n]=cod_GLONASS(n);
%Имя функции: cod_GLONASS
%Функция cod_GLONASS вычисляет псевдослучайный код ГЛОНАСС

```

```

%(M-последовательность). Входные данные: n- количество символов в M-последова-
тельности.
%Выходные данные: codGL- M- последовательность в символах "1", "-1" ,
%codGL_bin- M-последовательности в символах "0", "1",
%Out- столбцы кодов для сравнения, n- длина кода
shift_reg=ones(1,9);%Начальное состояние регистра сдвига
for i=1:n
codGL_bin(i)=shift_reg(7); % Выход M-последовательности в символах "0", "1"
modulo2 = xor(shift_reg(9),shift_reg(5));%Сложение по модулю 2 символов с 9 и 5 вы-
ходов регистра сдвига
shift_reg(2:9)=shift_reg(1:8); %Смещение данных в регистре сдвига
shift_reg(1)=modulo2; % Сложение по модулю 2 на входе 1 регистра сдвига
end
codGL=2*codGL_bin-1;%M- последовательность в символах "1", "-1"
Out=[codGL_bin' codGL' ]; % Столбцы кодов для сравнения

```

```

Файла:BPS_K.m
%Имя m--файла:BPS_K.m
%программа расчета характеристик сигнала спутника ГЛОНАСС
clear;
n=511;%количество символов в M-последовательности
[codGL, codGL_bin,Out,n]=cod_GLONASS(n);%функция, формирующая M-последова-
тельность
Dat= codGL_bin;
fDat=0.511*10^6;% скорость передачи данных
fc=4*fDat ; %carrier frequency-несущая частота
fd=32*fDat; %частота дискретизации
fd_fDat=fd/fDat; %отношение частоты дискретизации к символьной скорости
t=(0:length(Dat)*fd_fDat-1)/fd; % дискретное время
t1=(0:length(codGL)*fd_fDat-1)/fd;% дискретное время
BPSK=cos(2*pi*fc*t + pi*Dat(floor(fDat*t)+1));%модулированный сигнал
%y= pmmmod(Dat(floor(fDat*t)+1),fc,fd,pi) ;%модулированный сигнал (вариант)
y=BPSK;
%преобразование частоты
x1=y.*cos(2*pi*fc*t); 33
x=y.*cos(2*pi*fc*t);
[b1,a1]=butter(3,fc*2/fd);%фильтр нижних частот с максимально-плоской характери-
стикой
[b,a]=ellip(10,2,60,fc*2/(32*fDat));%фильтр нижних частот с эллиптической характери-
стикой
%фильтрация высокочастотных составляющих
x1=filtfilt(b1,a1,x1);
x=filtfilt(b,a,x);
m=3.20;
%Графика
fig1=figure;
%%%%%%%%%%%%%%
%Сигналы спутников ГЛОНАСС
%Несущая
subplot(3,1,1),plot(t,cos(2*pi*fc*t))
xlabel('a','FontSize',12,'FontName', 'TimesNewRoman')
grid on
xlim([3.07*10^(-4) m*10^(-4)])

```

```

ylim([-1.5 1.5])
%Несущая, модулированная М-последовательностью
subplot(3,1,2),plot(t,BPSK)
xlabel('б','FontSize',12,'FontName', 'TimesNewRoman')
grid on
xlim([3.07*10^(-4) m*10^(-4)])
ylim([-1.5 1.5])
%M-последовательность
subplot(3,1,3),stem(t,Dat(floor(fDat*t)+1))
xlabel('в','FontSize',12,'FontName', 'TimesNewRoman')
grid on
xlim([3.07*10^(-4) m*10^(-4)])
ylim([-1.5 1.5])
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Фильтрация демодулированного сигнала ГЛОНАСС фильтром нижних частот с
%максимально плоской и эллиптической характеристиками
m=5;
%figure(fig1);
fig2=figure;
subplot(3,1,1), plot(t,Dat(floor(fDat*t)+1))
xlabel('а','FontSize',12,'FontName', 'TimesNewRoman')
grid on
xlim([3.07*10^(-4) m*10^(-4)])
ylim([-1.5 1.5])
34
subplot(3,1,2), plot(t,x1)
xlabel('б','FontSize',12,'FontName', 'TimesNewRoman')
grid on
xlim([3.07*10^(-4) m*10^(-4)])
ylim([-1.5 1.5])
subplot(3,1,3), plot(t,x)
xlabel('в','FontSize',12,'FontName', 'TimesNewRoman')
grid on
xlim([3.07*10^(-4) m*10^(-4)])
ylim([-1.5 1.5])
%Фильтры
fig3=figure;
freqz(b1,a1,512,32*fDat),
xlabel('а','FontSize',12,'FontName', 'TimesNewRoman')
fig4=figure;
freqz(b,a,512,32*fDat),
xlabel('а','FontSize',12,'FontName', 'TimesNewRoman')

```

Результаты выполнения файла -:BPS_K.m приведены на рисунках 9..12.

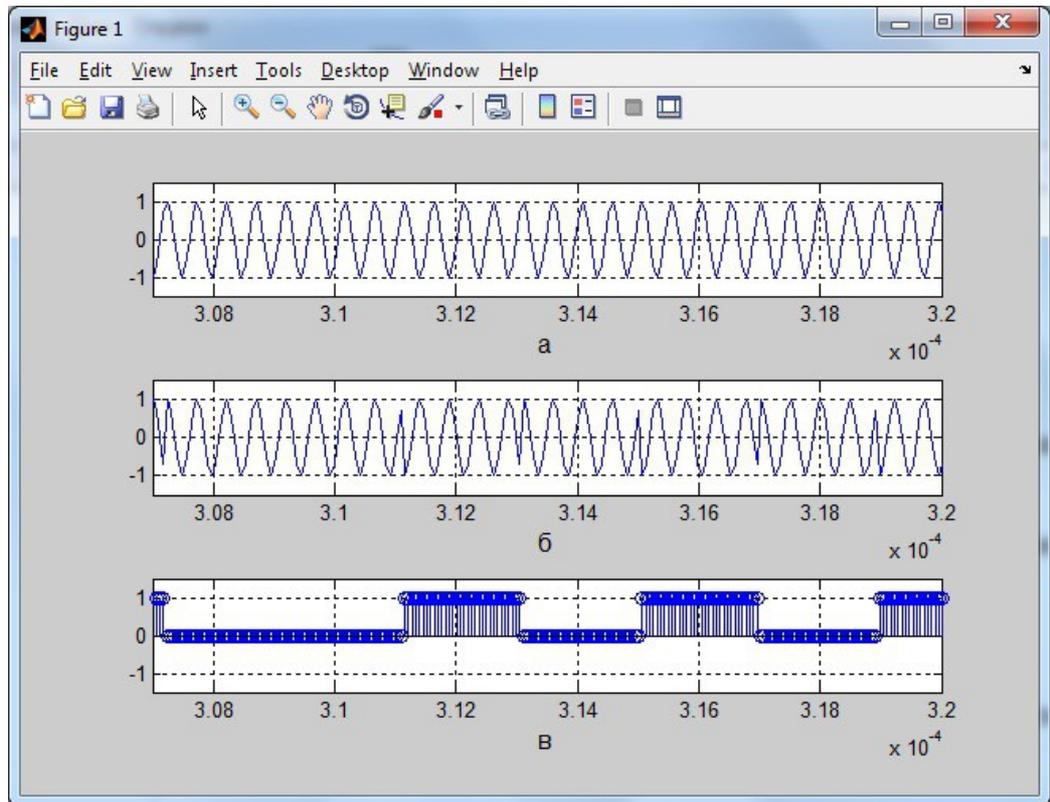


Рисунок 9 — Пример псевдслучайного кода сигналов спутников ГЛОНАСС: а - несущая; б- несущая, модулированная с помощью фазовой манипуляции; в- выборка дискретизированной М-последовательности

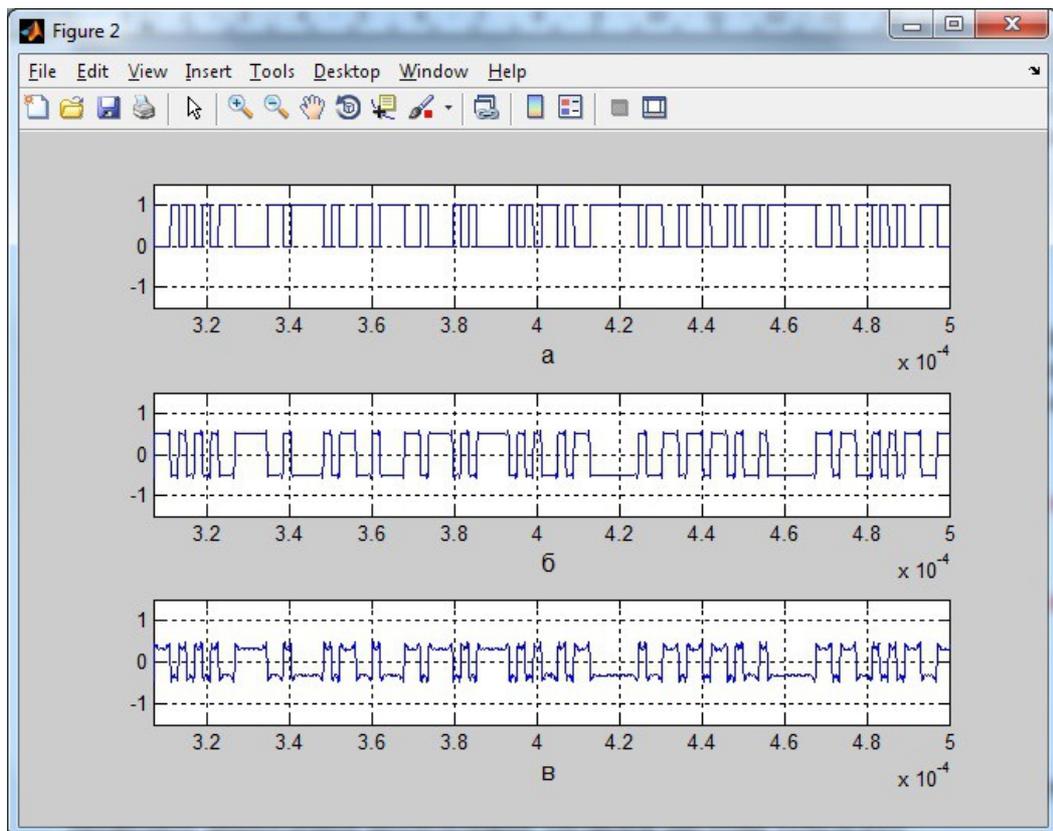


Рисунок 10 — Сигнал ГЛОНАСС: а- М-последовательность до модуляции; б- М-последовательность после модуляции и фильтрации фильтром с максимально плоской характеристикой; в - М-последовательность после модуляции и фильтрации фильтром с эллиптической характеристикой

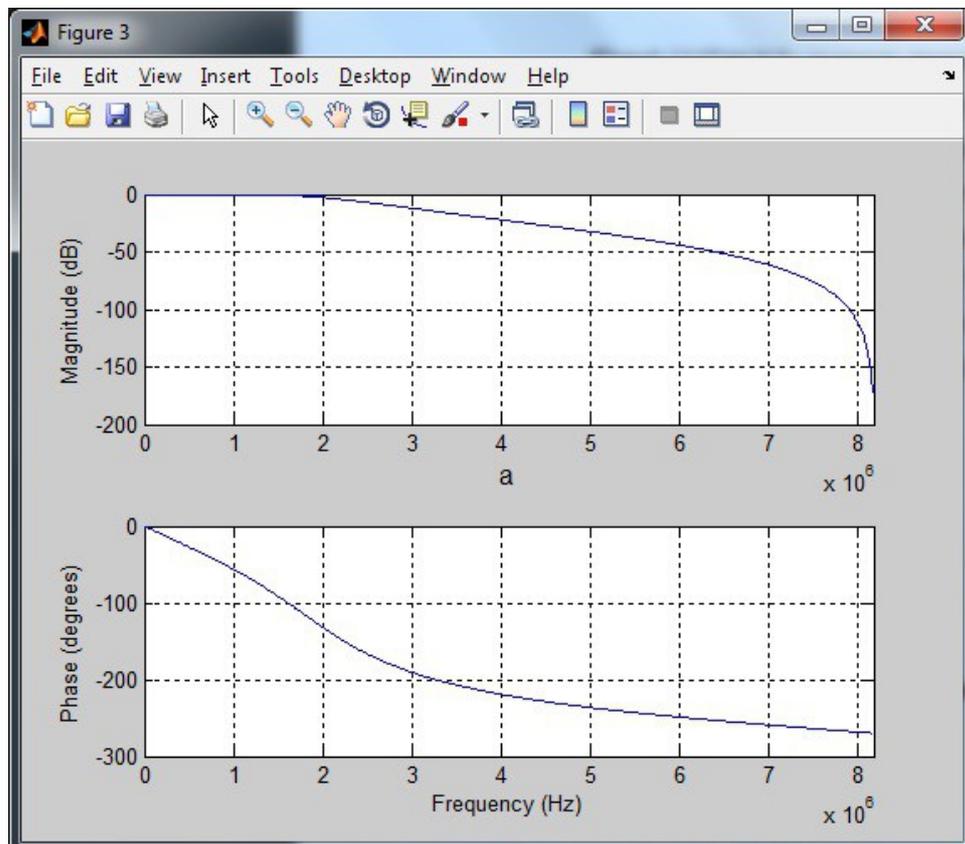


Рисунок 11 — Фильтр с максимально плоской характеристикой: верхний график- АЧХ; нижний график – ФЧХ

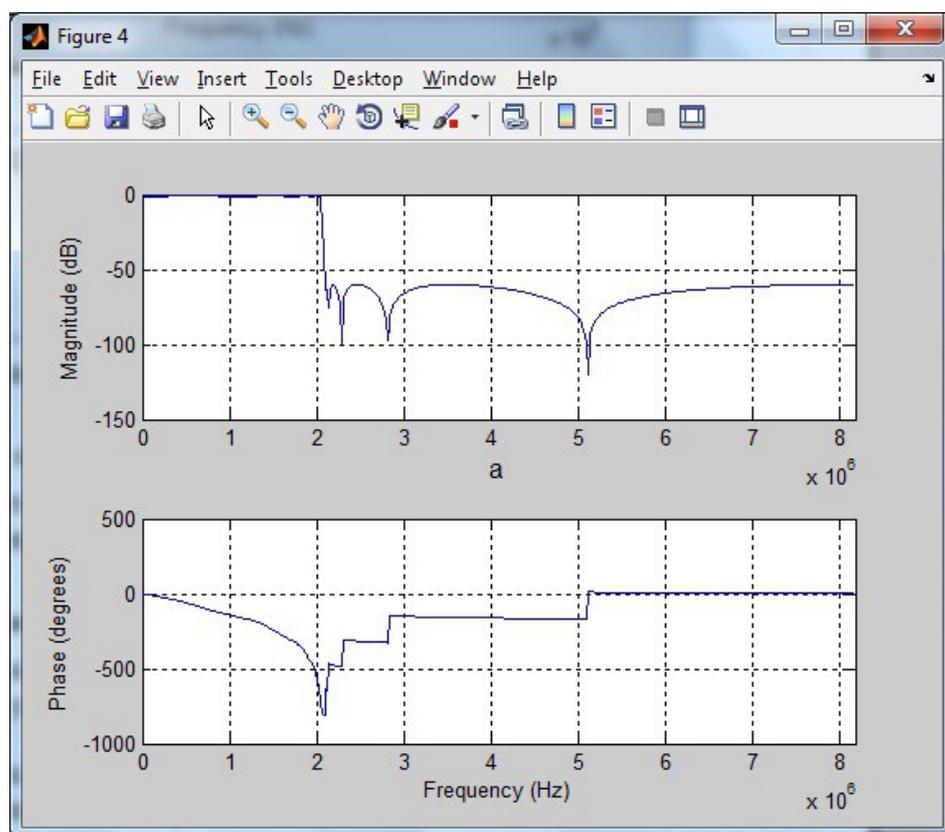


Рисунок 12 — Фильтр с эллиптической характеристикой: верхний график- АЧХ; нижний график - ФЧХ

Проведите сравнение эффективности фильтрации эллиптического фильтра и фильтра с максимально плоской АЧХ.

4 Исследование псевдослучайного кода сигналов спутников GALILEO

Псевдослучайные коды сигналов спутников GALILEO также используют фазовую манипуляцию. Ниже приведен пример М-файла, генерирующего указанный сигнал. По аналогии с предыдущим материалом, постройте самостоятельно сигнал и его автокорреляционную функцию.

```
function [RGs,IGs]=sE5
% Generates Galileo's signal E5 with AltBOC(15,10) modulation and
% parameters with one eighth (T/8) of the subcarriers' period.
%*****
fsamp=240*1.023e6; % Sampling frequency: 245.52 Mhz
fs=15*1.023e6; % Sub-Carrier frequency: 15.345 Mhz
fc=10*1.023e6; % Chiprate: 10.23 Mcps
SraI=50; % Symbol rate aI: 50 Sps
SrbI=250; % Symbol rate bI: 250 Sps
Tsamp=1/fsamp; % Sample time 10.861 ns
TraI=1/SraI; % aI symbol time 20 ms
TrbI=1/SrbI; % bI symbol time 4 ms
BaI=1; % 1 bits ---> 40ms duration
BbI=5; % 5 bits ---> 40ms duration

D=BaI*TraI; % Duration of simulation
% It'd be the same if D=BbI*TrbI
t=0:Tsamp:D-Tsamp;
%+++++cdma sequences+++++
[CaI,CaQ,CbI,CbQ]=draftcdmaE5;
CaI=expan(CaI,fsamp,fc);
CaQ=expan(CaQ,fsamp,fc);
CbI=expan(CbI,fsamp,fc);
CbQ=expan(CbQ,fsamp,fc);
% PROBLEM: Since the duration of pilot channels is longer, when it comes to
% multiply the signals in Matlab, all signals must have the same length.
% Therefore, quadrature channels' length will be truncated to in-phase length.
CaI=fulltime(CaI',BaI);
CaQ=CaQ(1:1:length(CaI));
CbI=fulltime(CbI',BbI);
CbQ=CbQ(1:1:length(CbI));
% However, the shorter signal could be padded with zeros so that they had
% the same length. But, doing so it would entail memory problems.
% It can also be possible to set a common length for all signals so that
% all of them are 100 ms long. Then, data channels should send enough bits
% to fill the whole duration. Therefore, doing so the timeline should be
% varied also, which is the origin of all the inconveniences.
%+++++data stream+++++
DaI=-1; %-sign(randn(1,BaI));
DbI=[1 -1 1 1 -1]; %-sign(randn(1,BbI));
DaI=expan(DaI,fsamp,SraI);
```

```

DbI=expan(DbI,fsamp,SrbI);
%-----signal components-----
sdaI=DaI'.*CaI; % e5aI
sdaQ=CaQ'; % e5aQ
sdbI=DbI'.*CbI; % e5bI
sdbQ=CbQ'; % e5bQ
asdaI=sdaQ.*sdbI.*sdbQ; % *e5aI = e5aQÂ·e5bIÂ·e5bQ
asdaQ=sdaI.*sdbI.*sdbQ; % *e5aQ = e5aIÂ·E5bIÂ·e5bQ
asdbI=sdbQ.*sdaI.*sdaQ; % *e5bI = e5bQÂ·e5aIÂ·e5aQ
asdbQ=sdbI.*sdaI.*sdaQ; % *e5bQ = e5bIÂ·e5aIÂ·e5aQ
% _____ signal parameters _____
% The parameters scE5-S and scE5-P represent the four-valued sub-carrier
% functions for the single signals and the product signals respectively:
sc_s=parameters('s'); %sc_s
sc_p=parameters('p'); %sc_p
samples=[sc_s(4) sc_s(3) sc_s(2) sc_s(1)];
dsc_s=[samples sc_s];
dsc_s=dsc_s(1:1:length(dsc_s)-4); %sc_s delayed Ts/4
samples=[sc_p(4) sc_p(3) sc_p(2) sc_p(1)];
dsc_p=[samples sc_p];
dsc_p=dsc_p(1:1:length(dsc_p)-4); %sc_p delayed Ts/4
% sub-carriers PLOT:
% figure(1);
% subplot(2,1,1),plot(t,sc_s); axis([2/fs 5/fs -1.3 1.3]); title('subcarrierAS'); xlabel('2
samples/value');
% subplot(2,1,2),plot(t,sc_p); axis([2/fs 5/fs -1.3 1.3]); title('subcarrierAP'); xlabel('2
samples/value');
% _____
%keeping on signal components...
A=1/(2*sqrt(2));
%e5(t)
s=A*(((sdaI+(j*sdaQ)).*(sc_s-(j*dsc_s)))+((sdbI+(j*sdbQ)).*(sc_s+(j*dsc_s)))+((asdaI+
(j*asdaQ)).*(sc_p-(j*dsc_p)))+((asdbI+(j*asdbQ)).*(sc_p+(j*dsc_p))));
Re=real(s);
Im=imag(s);
[Rss,lag]=xcorr(s,'coeff');
[RGs,fre]=shcenteredFFT(Re,fsamp);
[IGs,fim]=shcenteredFFT(Im,fsamp);
% PSD PLOT
figure(2);
subplot(2,1,1), plot(fre,abs(RGs)); title('E5 PSD'); ylabel('In-Phase');
xlabel('hertz');xlim([-125e6 125e6]);
subplot(2,1,2), plot(fim,abs(IGs)); title('E5 PSD'); ylabel('Quadrature');
xlabel('hertz');xlim([-125e6 125e6]);
% ACF PLOT
figure(3);
plot(lag,abs(Rss)); xlim([-40 40]);
title('ACF AltBOC(15,10)');

```

На основе методики исследования сигналов систем ГЛОНАСС и GPS проведите аналогичное исследование сигналов системы GALILEO.

5 Вопросы и задания для самостоятельной подготовки

1. Что такое псевдослучайный сигнал?
2. Есть ли разница между псевдослучайным сигналом и M- последовательностью?
3. Для чего кодируются сигналы навигационных спутников?
4. Запишите образующий полином для сигналов спутников ГЛОНАСС.
5. Запишите образующие полиномы для сигналов спутников GPS.
6. Какая связь между регистрами сдвига, формирующими коды сигналов спутников и образующими полиномами?
7. Опишите механизм формирования псевдослучайного кода спутников GPS.
8. Опишите механизм формирования M- последовательности спутников ГЛОНАСС.
9. Что обозначает понятие кодовое разделение сигналов?
10. Как идентифицируются спутники GPS?
11. Как идентифицируются спутники ГЛОНАСС?
12. Как понимать термин «отношение сигнал/шум»?
13. Опишите параметры функции корреляции.

6 Список использованных источников

1. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС (Интерфейсный контрольный документ, пятая редакция). – М.: Координационный научно – информационный центр Российской Федерации, 2002. – 57 с.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. Изд. 3-е, перераб.- М.: Радиотехника, 2005.- 687 с.
3. Дьяконов В. П. MATLAB 6. 5 SP1/7. 0+ Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров.- М. :СОЛОН Пресс, 2005.- 576 с.
4. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. – М.: ЭКО – ТРЕНДЗ, 2000. – 268 с.
5. Interface Control Document Global Positioning System (ICD-GPS-200C). Wash., 1997. –160 p.
6. OEM4 Family Installation and Operation User Manual Rev 11, Vol 1. NovAtel Inc., Canada, 2004.- 202 p.
7. Конин В. В., Кони́на Л. А. Спутниковые системы навигации. Лабораторный практикум на компьютере. Киев: НАУ, 2008. - 286 с.

Учебное издание

Исследование характеристик навигационных сигналов систем GPS,
GALILEO, ГЛОНАСС

Методические указания к лабораторному практикуму

Составители: И.А. Кудрявцев, Д.В. Корнилин.

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева
443086 Самара, Московское шоссе, 34.