

**Национальный исследовательский университет  
«МЭИ»  
Институт радиотехники и электроники  
Кафедра радиотехнических систем  
Методы оптимального приема сигналов в аппаратуре  
потребителей СРНС**

Курсовая работа  
по дисциплине  
«АППАРАТУРА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ  
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ»

ФИО студента: Лебедев Д.Д.  
Группа: ЭР-15-16  
Вариант №: 10  
ФИО преподавателя: Корогодин И.В.  
Оценка: \_\_\_\_\_

**Москва, 2021 г.**

## **Введение**

Издревле человек искал способы как добраться до определенного места, искал ориентиры, плыл по звездам, пользовался позиционными методами определения своего местоположения и т.п. На сегодняшний день любой человек имея смартфон в кармане, может определить где он находится и как ему добраться до пункта назначения. Все это возможно благодаря СРНС. Они стали неотъемлемой частью жизни в различных сферах. Наиболее распространенными являются системы ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Galileo (Евросоюз), Beidou (Китай).

**Цель проекта** - добавление в программное обеспечение приемника функции расчета положения спутника Beidou на заданное время по данным его эфемерид.

Требования к разрабатываемому программному модулю:

- 1) требования назначения;
- 2) отсутствие утечек памяти;
- 3) малое время выполнения;
- 4) низкий расход памяти;
- 5) корректное выполнение при аномальных входных данных.

Для достижения цели выполняется ряд задач, соответствующих этапам проекта и контрольным мероприятиям:

- 1) обработка данных от приемника, работа со сторонними сервисами для подготовки входных и проверочных данных для разрабатываемого модуля;
- 2) моделирование модуля в Matlab/Python;
- 3) реализация программного модуля на C/C++, включая юниттестирование в Check. Этапы курсовой работы отличаются осваиваемыми инструментами.

## ЭТАП 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОРОННИХ СРЕДСТВ

### 1.1 Общие сведения

Навигационная система «Бэйдоу» - китайская спутниковая система навигации.

В задание дан номер спутника BEIDOU- 10, а также бинарный и текстовый файл со значениями эфемерид для различных спутников, полученный от трехдиапазонной антенны Harxon HX-CSX601A, установленной на крыше корпуса Е МЭИ.

Она через 50-метровый кабель, сплиттер, bias-tee и усилитель подключена к трем навигационным приемникам:

- Javad Lexon LGDD,
- SwiftNavigation Piksi Multi,
- Clonicus разработки ЛНС МЭИ.

Эти приемники осуществляют первичную обработку сигналов Beidou B1I, выдавая по интерфейсам соответствующие потоки данных - наблюдения псевдодальностей и эфемериды спутников. Данные от приемника Clonicus, записанные 16 февраля 2021 года.

C10	37948	IGSO-5	BDS-2	02.12.11	3378	Используется по ЦН
-----	-------	--------	-------	----------	------	--------------------

Рисунок 1 – состояние 10-го спутника системы BEIDOU с  
«Информационноаналитического центра координатно-временного и  
навигационного обеспечения»

Из рисунка 1 можно выяснить, что спутник используется по цели назначения, его номер 37948, тип космического аппарата, тип системы и дату запуска.

## 1.2 Определение формы орбиты и положения спутника на ней с помощью сервиса Celestrak

Для выполнения этого пункта перейдем на сайт Celestrak (<https://celestrak.com>). Настроим параметры и выберем необходимый спутник, после чего будет построена Земля и орбита спутника вокруг нее (рисунок 2).

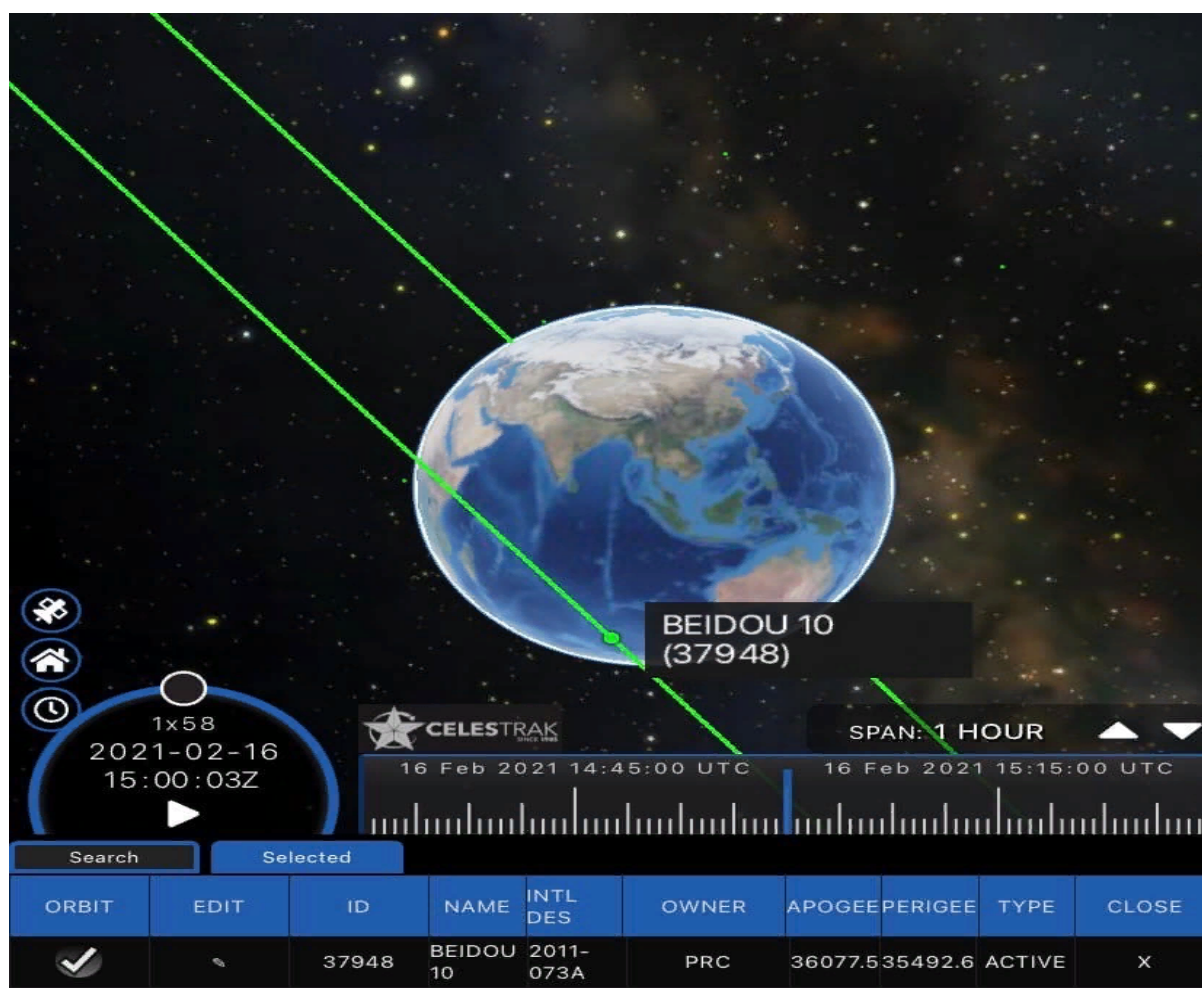


Рисунок 2 – Результат моделирования на Celestrak

Значения совпадают, значит это действительно нужный нам спутник, проведем моделирование на момент времени 15:00, 16 февраля 2021, так как на данном сервисе отсчет времени происходит по UTC(+0).

### 1.3 Расчет графика угла места собственного спутника от времени по данным Trimble GNSS Planning Online

Зададим предварительные параметры для моделирования GNSS Planning Online, координаты установим в соответствии с расположением антенны – и они будут соответствовать значению корпуса Е, также начальное время будет соответствовать 15:00, временной пояс будет равен UTC (+0) на всем этапе моделирования в сервисе GNSS Planning Online, высота выбирается примерно, с учетом разных критериев и будет равна 150м.

The screenshot displays the 'Выбор Спутника' (Satellite Selection) and 'Настройки' (Settings) sections of the Trimble GNSS Planning Online interface.

**Выбор Спутника (Satellite Selection):**

Система:	активная	Спутники	Выбранный	Здоровый
GPS	<input checked="" type="checkbox"/>	0	32	
ГЛОНАСС	<input checked="" type="checkbox"/>	0	23	
Галилей	<input checked="" type="checkbox"/>	0	20	
BeiDou	<input checked="" type="checkbox"/>	1	49	
QZSS	<input checked="" type="checkbox"/>	0	4	

**Мои Настройки (My Settings):**

- Время альманаха: 2021-02-15
- Часовой пояс: UTC +00:00
- Видимый период: 2021-02-15 15:00 - 2021-02-16 15:00
- Широта: N 55° 45' 24.1764"
- Долгота: E 37° 42' 11.271"
- Высота: 150 м
- Отсечка высоты: 10 °

**Настройки (Settings):**

- Широта: N 55° 45' 24.1764"
- Долгота: E 37° 42' 11.271"
- Высота: 150 м
- Отсечка высоты: 10 °
- День: 16.02.2021
- Время начала: 15:00 UTC +00:00
- Период [часов]: 24
- Часовой пояс: (UTC) координированное универсальное время

A map of Russia is visible on the right side of the settings panel, with a location pin placed near Moscow.

Рисунок 3 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

В настройках ограничим выходные данные, дабы не загромождать графики и выбираем 10 спутник.

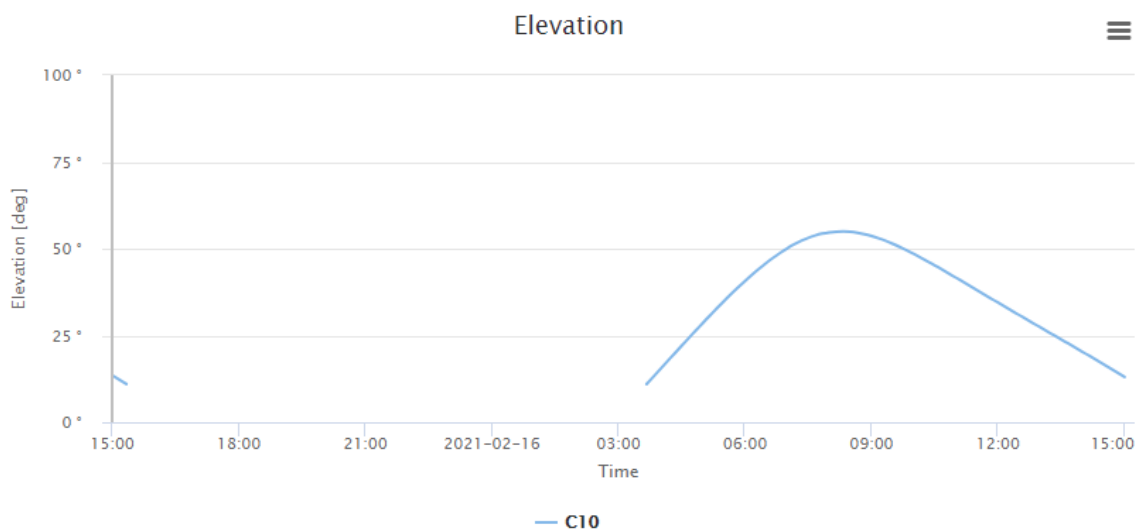


Рисунок 4 – График угла места спутника Beidou C10

По графику угла места можно сделать вывод, что спутник наблюдается с 3:40 до 15:10 по UTC(+0).

Далее переходим во вкладку Sky Plot и пользуемся возможностью пронаблюдать, траекторию спутника на небосводе в разное характерное время.

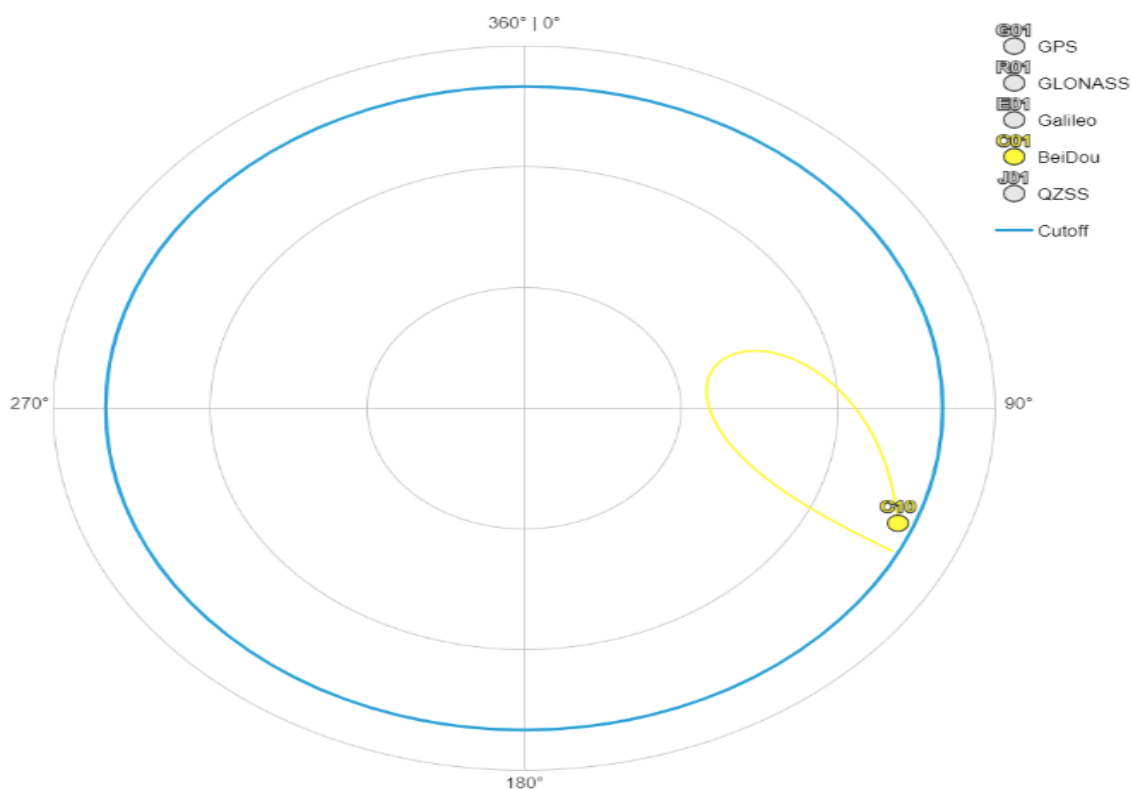


Рисунок 5 – SkyView спутника Beidou C10 в 15:00

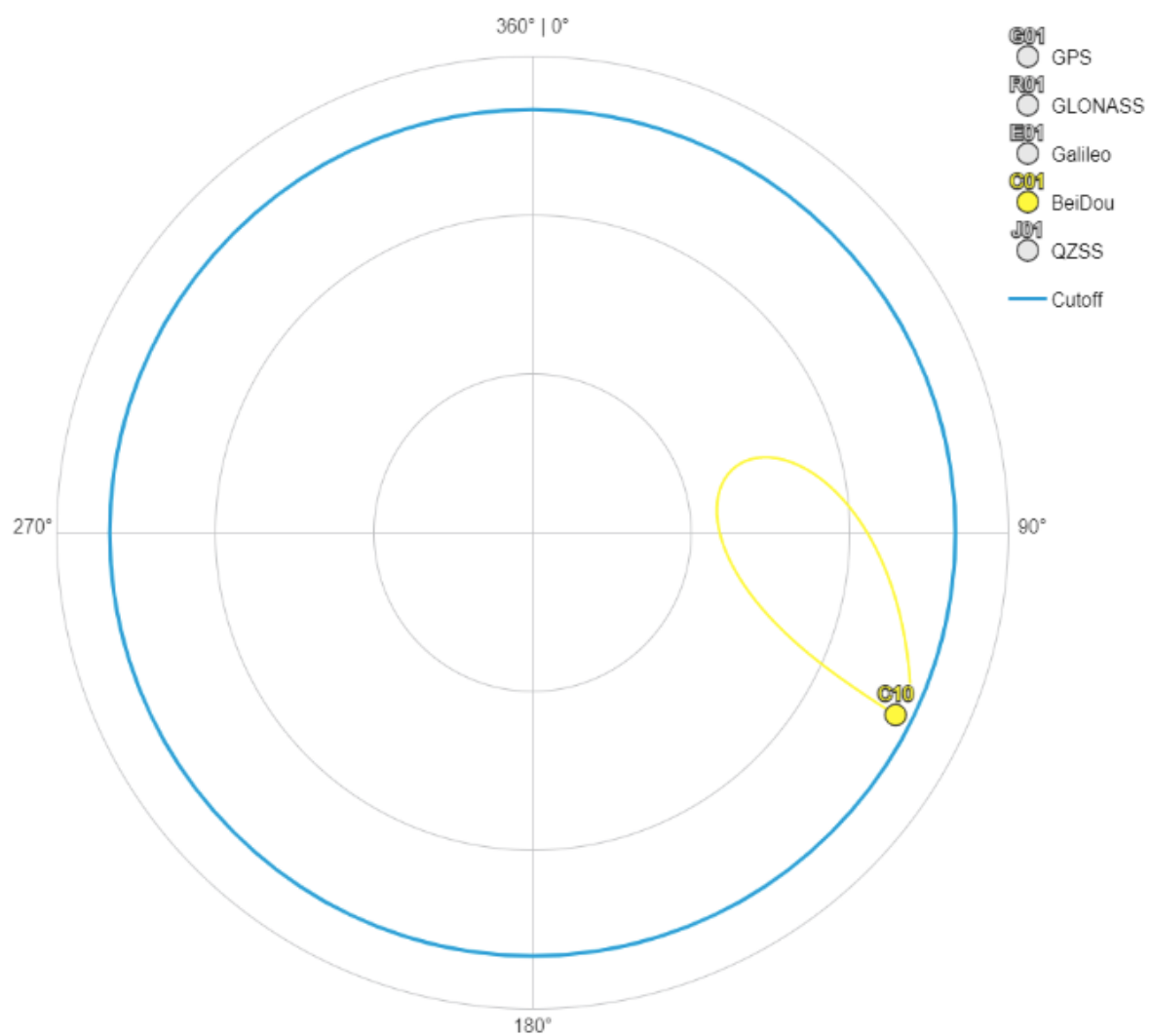


Рисунок 6 – SkyView спутника Beidou C10 в 3:40

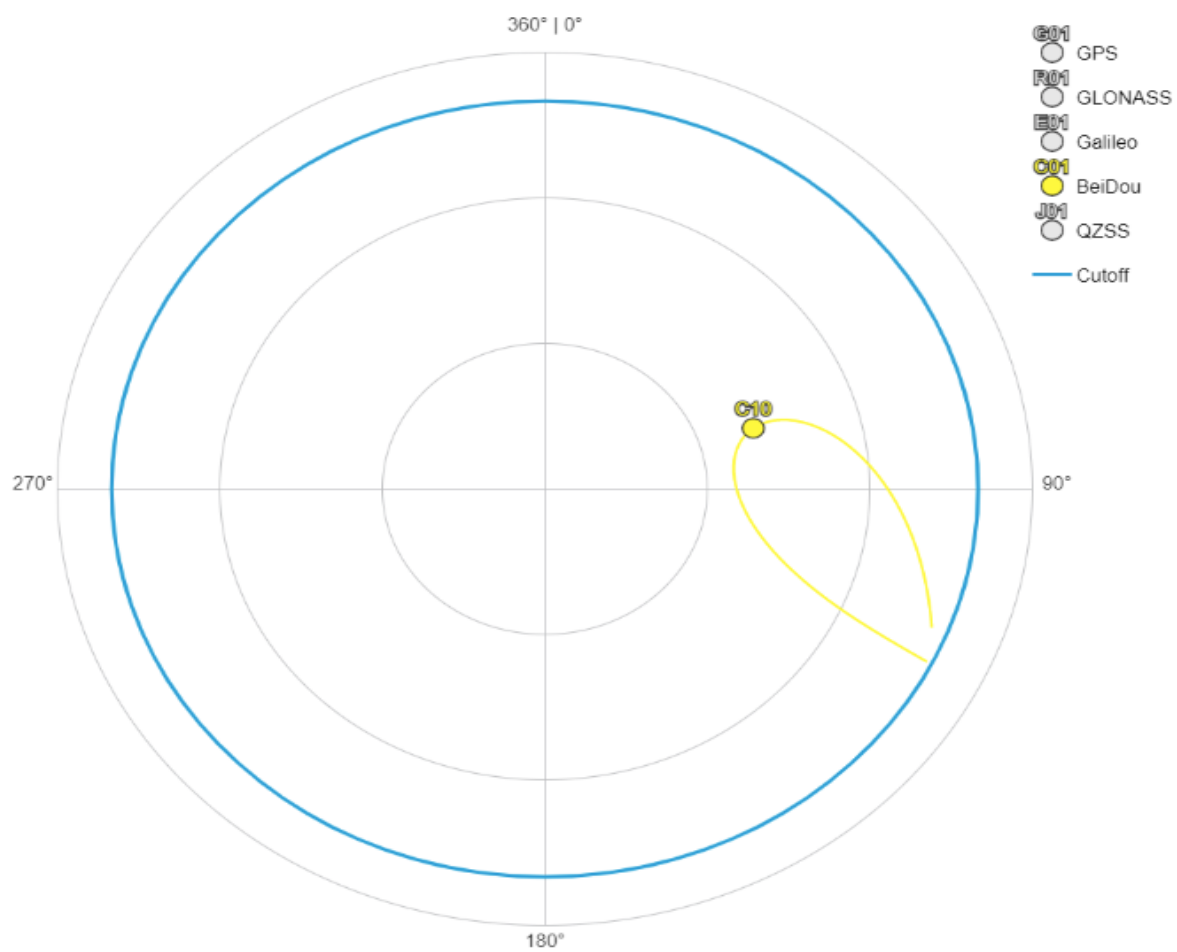


Рисунок 7 – SkyView спутника Beidou C10 в 10:00



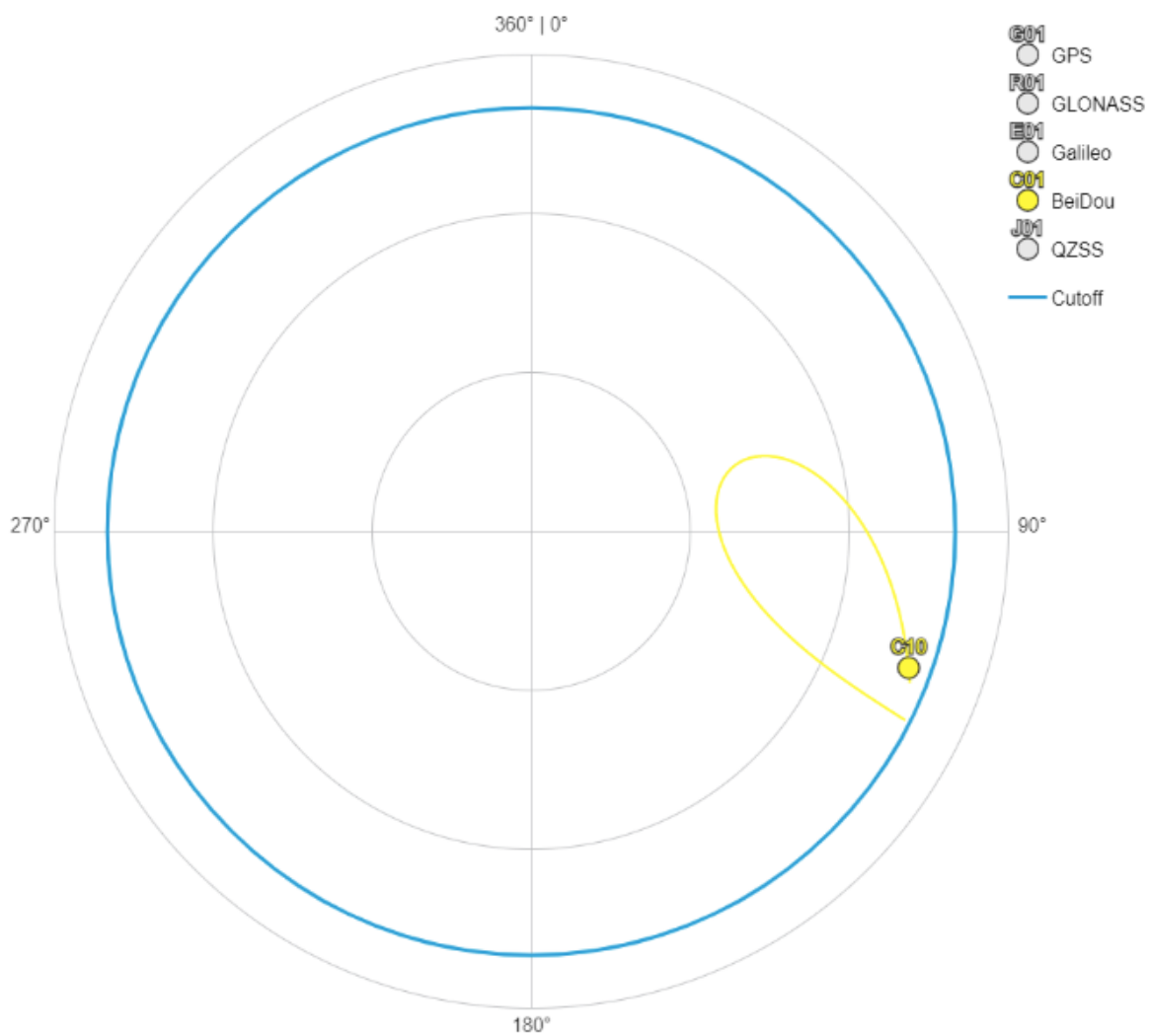


Рисунок 8 – SkyView спутника Beidou C10 в 15:10

По полученным данным подтверждаем, что спутник наблюдается с 3:40 до 15:10 по UTC(+0), в остальное время он находится вне зоны видимости.

## 1.4 Формирование списка и описание параметров, входящих в состав эфемерид

Таблица 1 – Значения эфемерид спутника С10

Параметр	Обозначение параметра	Значение
Satnum	PRN	10
toe (мс)	t <sub>oe</sub>	219600000.000
Crs (рад)	-	-1.7112500000000000e+02
Dn (рад/мс)	$\Delta n$	2.01794115271825003e-12
M0 (рад)	M <sub>0</sub>	-1.24602686448891453e+00
Cuc (рад)	-	-5.77326864004135132e-06
e	e	6.87512021977454424e-03
Cus (рад)	-	-3.77185642719268799e-08
$\sqrt{a} \left( m^{\frac{1}{2}} \right)$	$\sqrt{A}$	6.49323067474365234e+03
Cic (рад)	-	-1.38301402330398560e-07
Omega0 (рад)	$\Omega_0$	2.63308102577652559e+00
Cis (рад)	-	-1.04308128356933594e-07
i0 (рад)	i <sub>0</sub>	8.93007494398020185e-01
Crc (рад)	-	2.18765625000000000e+02
Omega (рад)	$\omega$	-2.55042188550297588e+00
OmegaDot (рад/мс)	$\dot{\Omega}$	-2.84118977552985422e-12
iDot (рад/сек)	i <sub>DOT</sub>	-5.40379651838676155e-13
Tgd (мс)	T <sub>gd</sub>	2.0400000000000000e+05
Toc (мс)	T <sub>oc</sub>	2.1960000000000000e+08

af2 (mc/mc^2 )	-	0.0000000000000000e+00
af1 (mc/mc)	-	6.05826500077455421e-12
af0 (mc)	-	-8.54813233017921448e-02
URA	-	0
IODE	-	257
IODC	-	0
codeL2	-	0
L2P	-	0
WN	-	789

## ЭТАП 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Цель 2-го этапа: требуется реализовать на языке Matlab или Python функцию расчета положения спутника Beidou на заданный момент по шкале времени UTC. В качестве эфемерид использовать данные, полученные на предыдущем этапе.

Построить трехмерные графики множества положений спутника Beidou с системным номером, соответствующим номеру студента по списку. Графики в двух вариантах: в СК ECEF WGS84 и соответствующей ей инерциальной СК. Положения должны соответствовать временному интервалу с 18:00 МСК 16 февраля до 06:00 МСК 17 февраля 2021 года. Допускается использовать одни и те же эфемериды на весь рассматриваемый интервал.

Построить SkyView за указанный временной интервал и сравнить результат с Trimble GNSS Planning Online, полученный на прошлом этапе.

В нашем случае данный этап будем реализовывать с помощью языка Matlab.

### 1) Построение траектории движения спутника

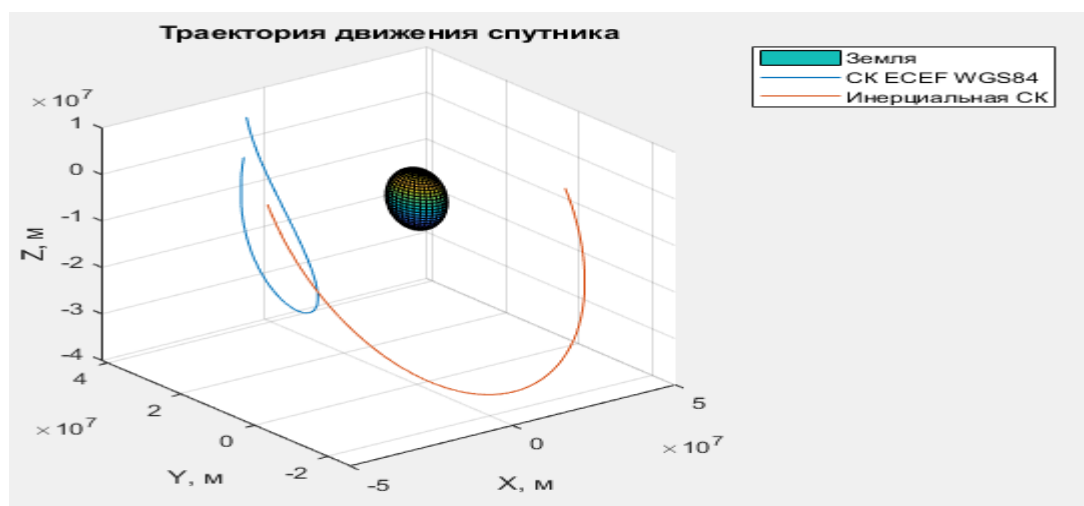
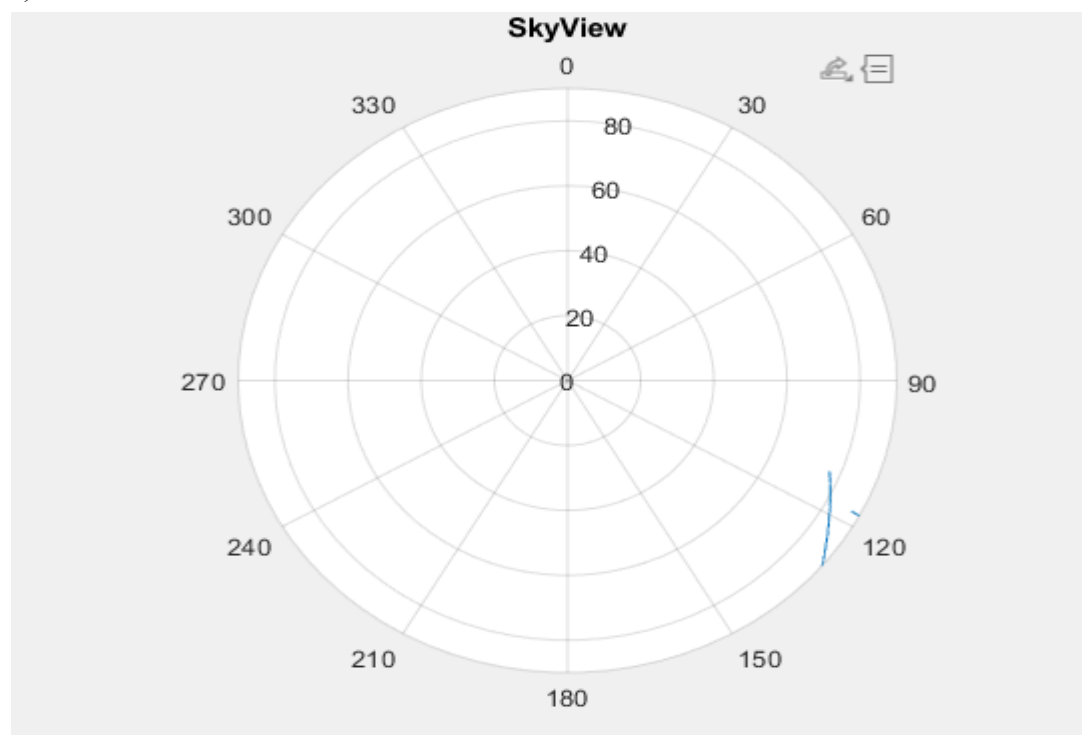


Рисунок 9 – Траектория движения спутника

## 2)Графики SkyView

а)



б)

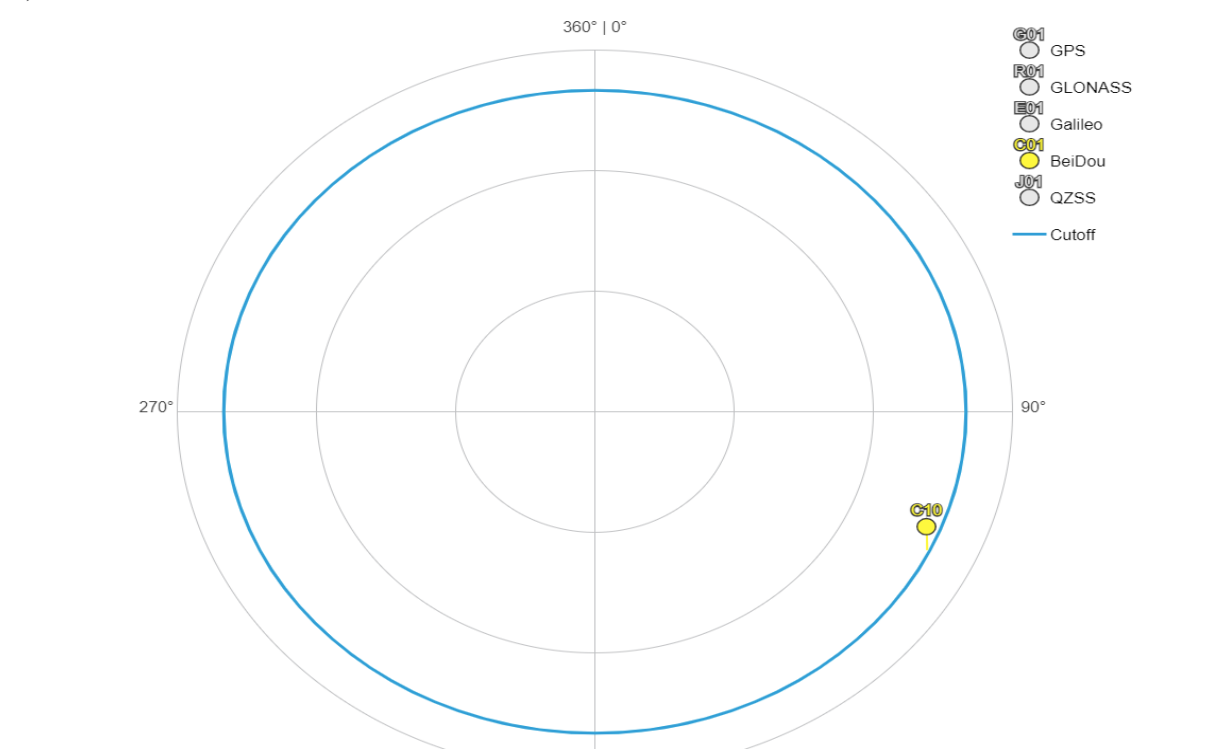


Рисунок 10 – а)SkyView полученный при моделировании  
б)SkyView из сервиса Trimble GNSS Planning

### 3)График угла места

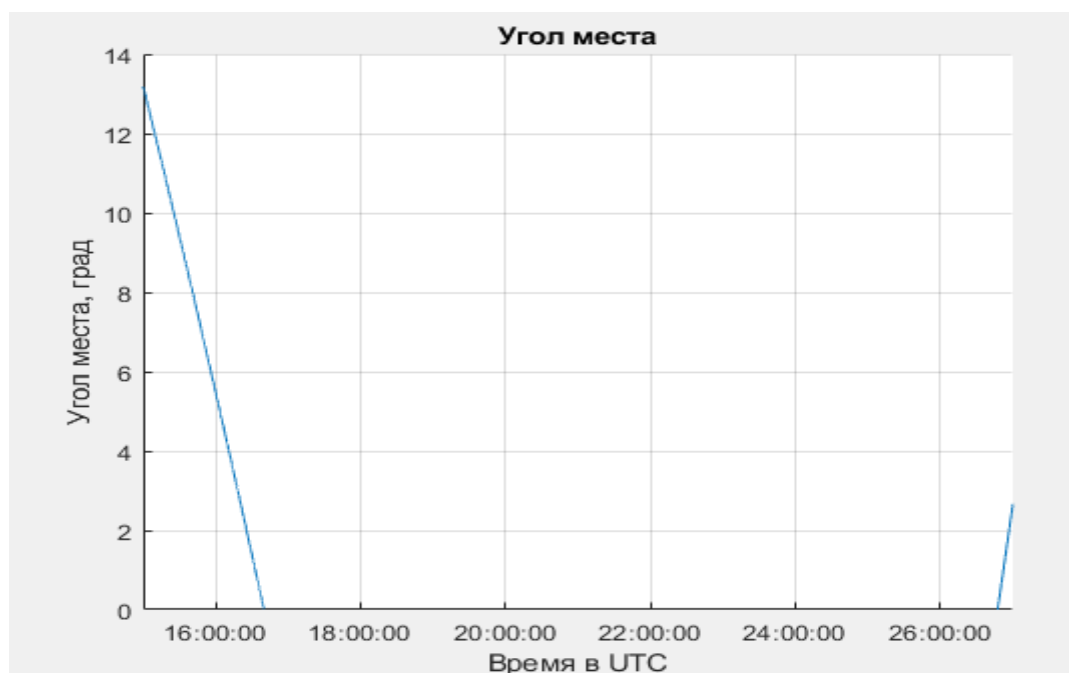


Рисунок 11 – График угла места

Данные полученные с помощью моделирования совпадают с данными полученными с помощью интернет сервиса Trimble GNSS Planning.

## Приложение

```
clear all;
clc;
close all;
%% Эфемериды
SatNum = 10;
toe = 219600;
Crs = -1.7112500000000000e+02;
Dn = 2.01794115271825003e-12;
M0 = -1.24602686448891453;
Cuc = -5.77326864004135132e-06;
e = 6.87512021977454424e-03;
Cus = -3.77185642719268799e-08;
sqrtA = 6.49323067474365234e+03;
Cic = -1.38301402330398560e-07 ;
Omega0 = 2.63308102577652559;
Cis = -1.04308128356933594e-07;
i0 = 8.93007494398020185e-01;
Crc = 2.187656250000000000e+02;
omega = -2.55042188550297588;
OmegaDot = -2.84118977552985422e-12;
iDot = -5.40379651838676155e-13;
Tgd = 2.040000000000000000e+05;
toc = 2.196000000000000000e+08;
af2 = 0 ;
af1 = 6.05826500077455421e-12;
af0 = -8.54813233017921448e-02;
URA = 0;
IODE = 257;
IODC = 0;
codeL2 = 0;
L2P = 0;
WN = 789;
%% Константы
mu = 3.986004418e14; % гравитационная постоянная
Omega_E = 7.2921151467e-5; % скорость вращения
%% Расчет
```

```

% Массив времени
time = 226800:1: 270000;
% Большая полуось
A = sqrt(A^2);
% Среднее движение
n = sqrt(mu/A^3) + Dn;
for k = 1:length(time)
    % Время
    t(k) = time(k) - toe;
    if t(k) > 302400
        t(k) = t(k) - 604800;
    end
    if t(k) < -302400
        t(k) = t(k) + 604800;
    end
    % Средняя аномалия
    M(k) = M0 + n*t(k);
    % Решение уравнения Кеплера
    E(k) = M(k);
    E0(k) = M(k)+1;
    epsilon = 1e-6;
    while abs(E(k) - E0(k)) > epsilon
        E0(k) = E(k);
        E(k) = M(k) + e*sin(E(k));
    end
    % Истинная аномалия
    v(k) = atan2( (sqrt(1 - e^2) * sin(E(k)))/(1 - e*cos(E(k))) , (cos(E(k))) - e)/(1 - e*cos(E(k))) );
    % Коэффициенты коррекции
    Phi(k) = omega + v(k);
    cor_cos(k) = cos(2*Phi(k));
    cor_sin(k) = sin(2*Phi(k));
    % Аргумент широты
    delta_u(k) = Phi(k) + Cus*cor_cos(k) + Cus*cor_sin(k);
    % Радиус
    delta_r(k) = A * (1 - e * cos(E(k))) + Crc*cor_cos(k) + Crs*cor_sin(k);
    % Наклон

```



```

delta_i(k) = i0 + iDot * t(k) + Cic*cor_cos(k) + Cis*cor_sin(k);
% Положение на орбите
x = delta_r(k) * cos(delta_u(k));
y = delta_r(k) * sin(delta_u(k));
% Долгота восходящего угла
Omega(k) = Omega0 + (OmegaDot - Omega_E) * t(k) - Omega_E*toe;
% Координаты
coordx(k) = x * cos(Omega(k)) - y * cos(delta_i(k)) * sin(Omega(k));
coordy(k) = x * sin(Omega(k)) + y * cos(delta_i(k)) * cos(Omega(k));
coordz(k) = y * sin(delta_i(k));
coordx1(k) = coordx(k)*cos(Omega(k)) + coordy(k)*sin(Omega(k));
coordy1(k) = - coordx(k)*sin(Omega(k)) + coordy(k)*cos(Omega(k));
coordz1(k) = coordz(k);
end
%%% Пересчет координат центра масс НКА в систему координат WGS-84
ppb = 1e-9;
mas = 1e-3/206264.8; % [рад]
MATRIX_WGS_84 = [-3*ppb -353*mas -4*mas;
353*mas -3*ppb 19*mas;
4*mas -19*mas -3*ppb];
crd_WGS_84 = [coordx; coordy; coordz];
for i = 1:length(crd_WGS_84(1,:))
    crd_WGS_84(:,i) = crd_WGS_84(:,i) + MATRIX_WGS_84 * crd_WGS_84(:,i)
+ [0.07; -0; -0.77];
end
crd_WGS_84 = crd_WGS_84.'; % Переход к вектору-строки
%%% построение графиков
R_Earth = 6371e3;
[XE,YE,ZE] = sphere(30);
figure
surf(XE*R_Earth,YE*R_Earth,ZE*R_Earth)
hold on
grid on
plot3(crd_WGS_84(:,1), crd_WGS_84(:,2), crd_WGS_84(:,3))
plot3(coordx1, coordy1, coordz1)
title('Траектория движения спутника', 'FontName', 'Arial')
xlabel('X, м', 'FontName', 'Arial')

```

```

ylabel('Y, м', 'FontName', 'Arial')
zlabel('Z, м', 'FontName', 'Arial')
hold off
lgd = legend('Земля','СК ECEF WGS84','Инерциальная СК');
lgd.FontName = 'Arial';
%% Координаты корпуса E и их перевод в систему WGS-84
Earth_radius = 6378136;
H = 500;% высота [м]
a = Earth_radius;
B = deg2rad(55.45241346);% широта
N = a/sqrt((1-e^2*(sin(B))^2));
L = deg2rad(37.42114473); % долгота
llh = [N E H];
crd_PRM = llh2xyz(llh);
%% Построение SkyPlot
for i = 1:length(crd_WGS_84(:,1))
    [X(i)                                Y(i)                                Z(i)]
    =ecef2enu(crd_WGS_84(i,1),crd_WGS_84(i,2),crd_WGS_84(i,3),B,L,H,wgs84
    Ellipsoid,'radians');
    if Z(i) > 0
        r(i) = sqrt(X(i)^2 + Y(i)^2 + Z(i)^2);
        teta(i) = acos(Z(i)/r(i));
        if X(i) > 0
            phi(i) = -atan(Y(i)/X(i))+pi/2;
        elseif (X(i)<0)&&(Y(i)>0)
            phi(i) = -atan(Y(i)/X(i))+3*pi/2;
        elseif (X(i)<0)&&(Y(i)<0)
            phi(i) = -atan(Y(i)/X(i))-pi/2;
        end
    else teta(i) = NaN;
        r(i) = NaN;
        phi(i) = NaN;
    end
end
% Скайплот
figure
ax = polaraxes;

```

```
polarplot(ax,phi,teta*180/pi)
ax.ThetaDir = 'clockwise';
ax.ThetaZeroLocation = 'top';
title('SkyView')
% Угол места
th = hours(time/60/60 - 2*24); % Перевод временной оси в формат hh:mm:ss
figure
grid on
hold on
plot(th,(-teta)*180/pi+90,'DurationTickFormat','hh:mm:ss')
xlim([th(1) th(end)])
title('Угол места', 'FontName', 'Arial')
xlabel('Время в UTC', 'FontName', 'Arial')
ylabel('Угол места, град', 'FontName', 'Arial')
```