

Национальный исследовательский университет

«Московский энергетический институт»

Институт радиотехники и электроники

Кафедра радиотехнических систем

Курсовая работа

По дисциплине: «Аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем»

«Разработка модуля расчёта координат спутника Beidou»

Выполнил студент: Казанцев К.О.

Группы: ЭР-15-16

Вариант №: 8

Дата: _____

Подпись: _____

ФИО преподавателя: Корогодин И.В.

Оценка: _____

МОСКВА, 2021 г.

Описание работы

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 юнит-тестирование в Check.

Этапы курсовой работы отличаются осваиваемыми инструментами.

Этап 1. Использование сторонних средств

1.1. Описание этапа

Конечная цель всего курсового проекта - получить библиотеку функций на Си++, позволяющую рассчитывать положение спутника Beidou по его эфемеридам. На первом этапе подготовим вспомогательные данные для разработки: эфемериды и оценки положения спутника от сторонних сервисов (чтобы было с чем сравниваться на след. этапах)

На крыше корпуса Е МЭИ установлена трехдиапазонная антенна Narxon НХ-CSX601А. 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 вечером 16 февраля 2021 года, доступны в рабочем репозитории (директория logs) в нескольких форматах.

Во-первых, это дампы бинарного потока данных от приемника в формате NVS BINR. Во-вторых, текстовый файл данных пакета 0xF7, полученный из данного дампа с бинарным файлом и протоколом. Он получен подобным printf'ом для каждого спутника с периодом передачи эфемерид, рисунок 1, источник [1].

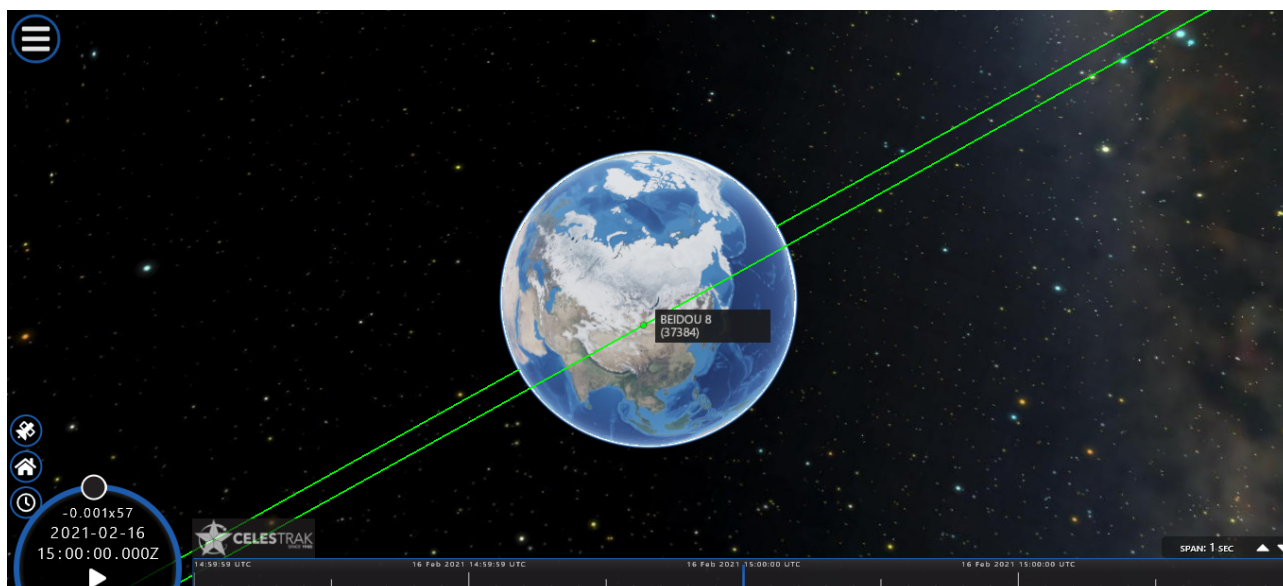


Рисунок 3 – Определение формы орбиты и положения спутника на ней на начало рассматриваемого интервала времени по данным сервиса CelesTrak: общий вид + положение спутника на 18:00 МСК 16 февраля 2021

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

Перейдем на сайт <https://www.gnssplanning.com>. Зададим параметры, как показано на рисунке 4.

My Settings	
Time of almanac:	2021-02-16
Time zone:	UTC +00:00
Visible period:	
	2021-02-16 15:00 - 2021-02-17 03:00
Latitude:	N 55° 45' 23.5679"
Longitude:	E 37° 42' 12.0145"
Height:	500 m
Elevation cutoff:	10 °

Рисунок 4 – Заданные параметры

Данные координаты соответствуют месту, что отмечено на рисунке 5.

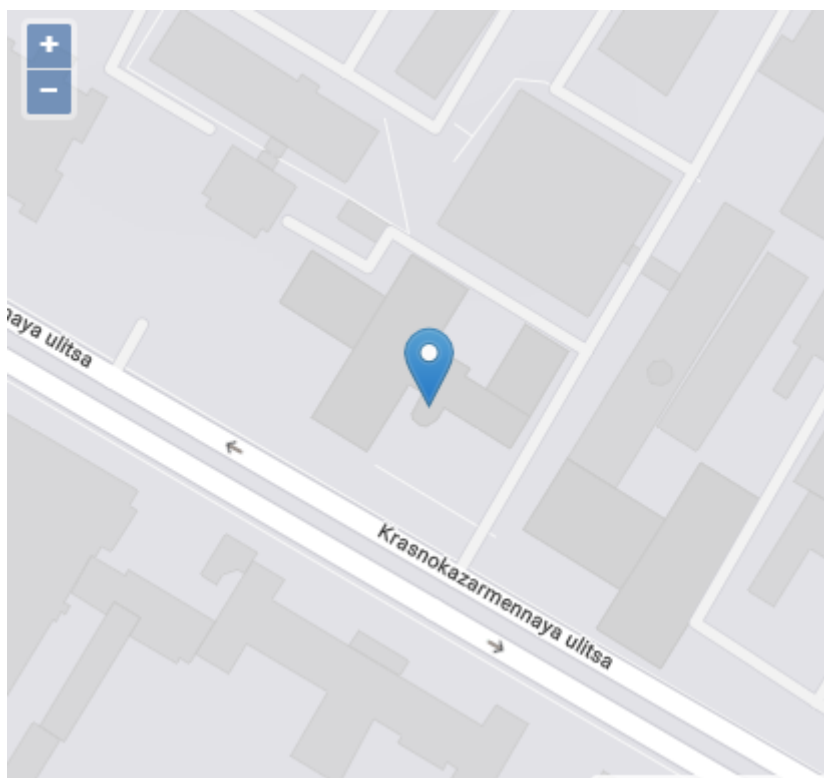


Рисунок 5 – Примерное место размещения антенны

Выберем нужный нам спутник, как на рисунке 6, а остальные — уберем.

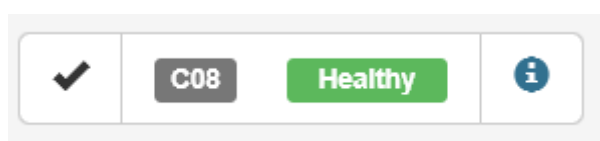


Рисунок 6 – Выбор нужного спутника

В результате получаем график, отображенный на рисунке 7.

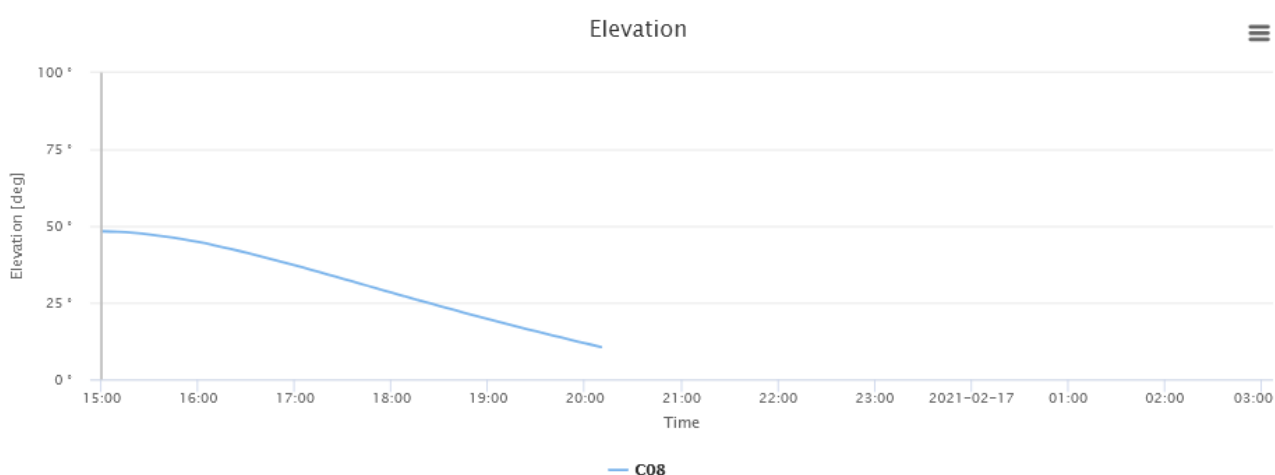


Рисунок 7 – График угла места

По полученной зависимости на рисунке 7 можно узнать, что на момент начала наблюдения (15:00) спутник был виден, а затем, находясь в видимости чуть более 5-ти часов, «скрылся». Данное наблюдение можно будет подтвердить в следующем подпункте.

1.4. Расчет диаграммы угла места и азимута спутника (SkyView, он же SkyPlot) по данным Trimble GNSS Planning Online

Не меняя заранее установленных настроек, переходим во вкладку SkyPlot. Данный сервис нам показывает изображение, дублированное на рисунке 8.

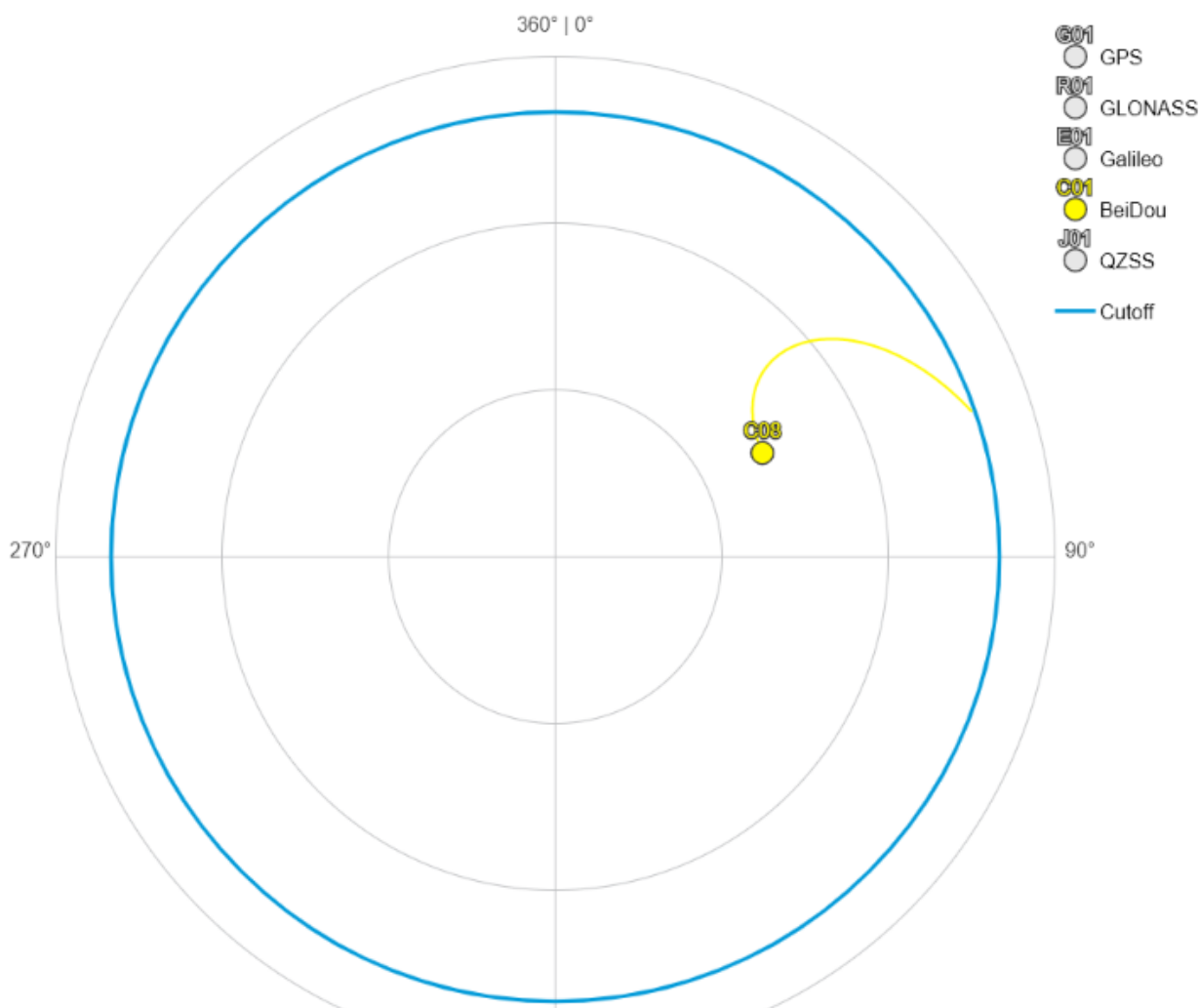


Рисунок 8 – SkyView спутника Beidou C08

Желтая линия на рисунке 8 доказывает, что спутник наблюдался с самого начала. Данная траектория описывает поведение спутника в момент его видимости. По истечении 5-ти часов он стал для нас невидим.

1.5. Формирование списка и описание параметров, входящих в состав эфемерид в сигнале B1I Beidou

Используя [2, стр. 34], составим описание параметров и занесем в таблицу 1.

Таблица 1 – Описание параметров эфемерид системы BEIDOU

Parameter	Definition	Units
t_{oe}	Ephemeris reference time	s
\sqrt{A}	Square root of semi-major axis	$m^{1/2}$
e	Eccentricity	—
ω	Argument of perigee	π
Δn	Mean motion difference from computed value	π/s
M_0	Mean anomaly at reference time	π
Ω_0	Longitude of ascending node of orbital of plane computed according to reference time	π
$\dot{\Omega}$	Rate of right ascension	π/s
i_0	Inclination angle at reference time	π
IDOT	Rate of inclination angle	π/s
C_{uc}	Amplitude of cosine harmonic correction term to the argument of latitude	rad
C_{us}	Amplitude of sine harmonic correction term to the argument of latitude	rad

C_{rc}	Amplitude of cosine harmonic correction term to the orbit radius	m
C_{rs}	Amplitude of sine harmonic correction term to the orbit radius	m
C_{ic}	Amplitude of cosine harmonic correction term to the angle of inclination	rad
C_{is}	Amplitude of sine harmonic correction term to the angle of inclination	rad

1.6. Формирование таблицы эфемерид собственного спутника

Откроем файл с данными. Используя рисунок 1, сформируем таблицу 2. Найдем в документе нужный нам спутник и заполним таблицу.

Таблица 2 – Значения параметров эфемерид спутника C08

Обозначение параметра, размерность	Значение из файла
PRN	8
t_{oe} , мс	237600000
C_{rs} , рад	1.9867187500000000e+02
Δn , рад/мс	8.62178763712945218e-13
M_0 , рад	-1.55333764299921384e+00
C_{uc} , рад	6.31529837846755981e-06
e	5.34449948463588953e-03
C_{us} , рад	8.50530341267585754e-06
$\sqrt{(A)}, \sqrt{(M)}$	6.49309631156921387e+03
C_{ic} , рад	-6.75208866596221924e-08
Ω_0 , рад	-1.48546375932237629e+00
C_{is} , рад	-1.37835741043090820e-07

i_0 , рад	1.03971822793466973e+00
C_{rc} , рад	1.3250000000000000e+01
ω , рад	-2.69237391183751207e+00
Ω , рад	-2.10187326574395889e-12
IDOT, рад/сек	5.20021660989499327e-13
T_{gd} , мс	2.4000000000000000e+05
T_{oc} , мс	2.3760000000000000e+08
$af2$, мс/мс ²	0.0000000000000000e+00
$af1$, мс/мс	6.34869934401649516e-12
$af0$, мс	-9.12912070751190186e-01
URA	0
IODE	257
IODC	0
codeL2	0
L2P	0
WN	789

Этап 2. Моделирование

2.1 Описание этапа

Эфемериды - параметры некоторой модели движения спутника. В разных ГНСС эти модели разные, а значит отличается и формат эфемерид, и алгоритмы расчета положения спутника.

Одна из самых простых и удобных моделей — в системе GPS. Beidou наследует данную модель. 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 (антенна на крыше корпуса Е) и сравнить результат с Trimble GNSS Planning Online, полученный на прошлом этапе.

2.2 Реализация в Matlab

Для расчета были использованы данные из таблицы 2, полученные на прошлом этапе. Начальная точка во времени была определена следующим образом: Так как 16-ое число является началом 2-ой недели, то можем отнять от 16-ти 14 дней. Поскольку время у нас московское, то вычтем 3 часа (UTC+3) и переведем в секунды.

В итоге получаем: $((16 - 7 * 2) + 18 - 3) * 60^2 = 226800 \text{ с}$

2.3 Результаты моделирования

В данном разделе будут представлены результаты работы программы Matlab, код которой можно будет найти в приложении 1.

2.3.1 Траектории спутника

Алгоритм расчета был взят из [4]. Скорость вращения земли (Ω_e) была взята из [5, стр. 2]. Построенные траектории в различных СК можно увидеть на рисунках 9 и 10.

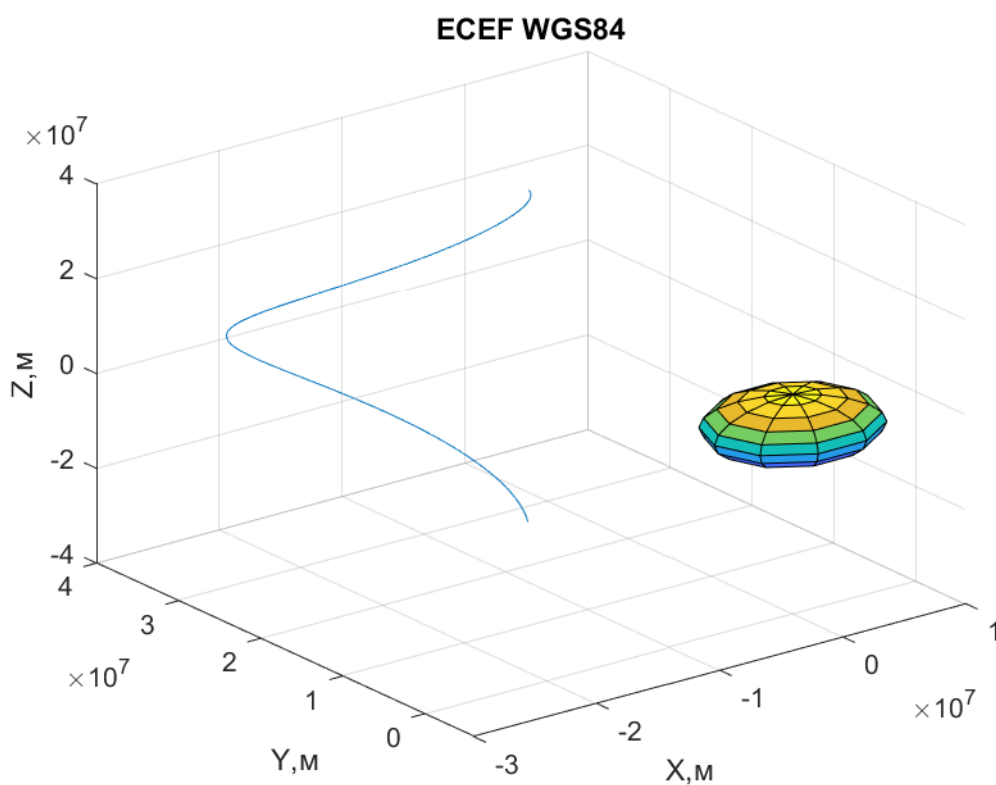


Рисунок 9 – Траектория спутника в СК ECEF WGS84

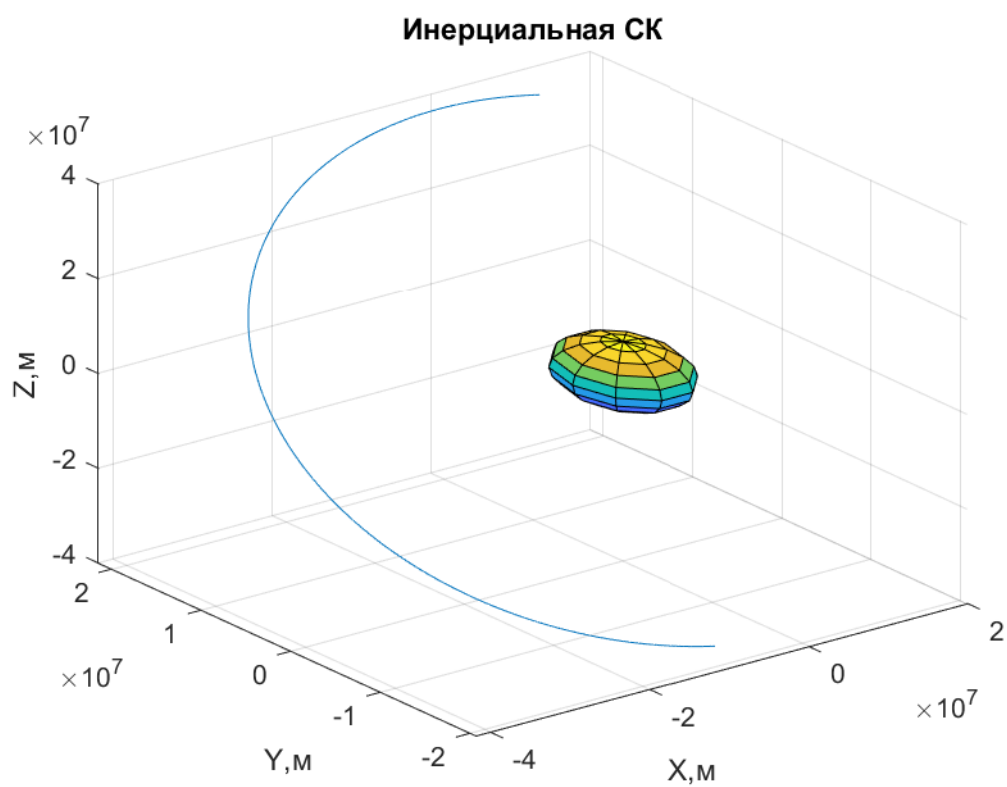


Рисунок 10 – Траектория спутника в инерциальной СК

2.3.2 SkyView

Далее, для сравнения с построенным в 1-ом этапе, был рассчитан SkyView. Полученный результат продемонстрирован на рисунке 11.

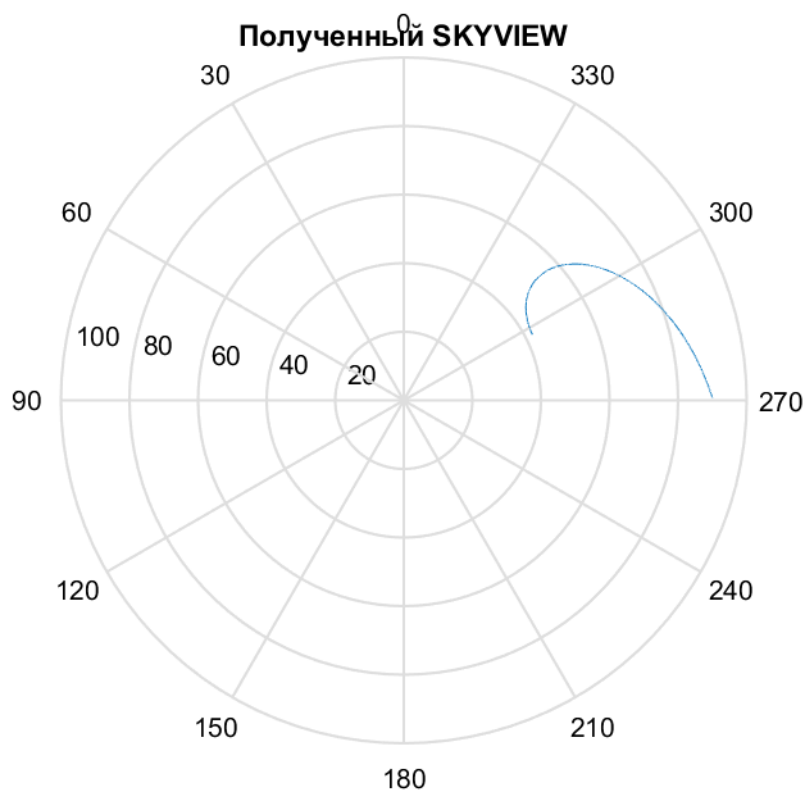


Рисунок 11 – Рассчитанный SkyView

2.4 Выводы

SkyView из этапа 1 и 2 практически совпадают. Использование одних и тех же эфемеридов может приводить к неточностям, для более точного определения следует использовать более «свежие», по мере их получения. Были замечены очевидные различия между СК, но при этом они обе образуют замкнутую траекторию, что говорит о правильности их расчета.

Список источников

- 1) [https://www.srns.ru/wiki/Аппаратура_потребителей_спутниковых_радионавигационных_систем_\(дисциплина\)](https://www.srns.ru/wiki/Аппаратура_потребителей_спутниковых_радионавигационных_систем_(дисциплина))
- 2) BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space, Interface Control Document, Open Service Signal B1I (Version 3.0), China Satellite Navigation Office, February 2019.
- 3) <https://ru.wikipedia.org/wiki/Бэйдоу>
- 4) https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_and_Galileo_Satellite_Coordinates_Computation
- 5) http://www2.unb.ca/gge/Resources/beidou_icd_english_ver2.0.pdf

Приложение 1

Полный код Matlab для второго этапа

```
Toe = 237600;
Crs = 1.9867187500000000e+02;
mu = 3.986004418e+14;
dn = 8.62178763712945218e-13;
Cuc = 6.31529837846755981e-06;
e = 5.34449948463588953e-03;
Cus = 8.50530341267585754e-06;
A = 6.49309631156921387e+03^2;
Cic = -6.75208866596221924e-08;
Wo = -1.48546375932237629e+00;
Cis = -1.37835741043090820e-07;
Io = 1.03971822793466973e+00;
Crc = 1.3250000000000000e+01;
Mo = -1.55333764299921384e+00;
We = 7.2921150e-5;
W = -2.69237391183751207e+00;
Wdot = -2.10187326574395889e-12;
idot = 5.20021660989499327e-13;
T = 226800;
wur = 55.45235679;
dl = 37.42120145;
H = 200;
for j=1:43201;
no = sqrt(mu/(A^3));
Tk=T-Toe;
n=no+dn;
M = Mo+n*Tk;
```



```

E=0;
for l=1:100;
E=M+e*sin(E);
end
nu = atan2(sqrt(1-e^2)*sin(E),cos(E)-e);
F1 = nu+W;
du = Cus*sin(2*F1)+Cuc*cos(2*F1);
dr = Crs*sin(2*F1)+Crc*cos(2*F1);
di = Cis*sin(2*F1)+Cic*cos(2*F1);
F2 = F1+du;
r = A*(1-e*cos(E))+dr;
i = Io+di+idot*Tk;
poX = r*cos(F2);
poY = r*sin(F2);
Omega = Wo+(Wdot-We)*(Tk)-We*Toe;
x = poX*cos(Omega)-poY*cos(i)*sin(Omega);
y = poX*sin(Omega)+poY*cos(i)*cos(Omega);
z = poY*sin(i);
Resfix(j,:) = [x y z];
phi = We*Tk;
xc = x*cos(phi)-y*sin(phi);
yc = x*sin(phi)+y*cos(phi);
zc = z;
ResECI(j,:)=[xc yc zc];
[East, North, Up] = ecef2enu(x, y, z, wur, dl,H, wgs84Ellipsoid);
R = sqrt(East^2 + North^2 + Up^2);
el(j) = rad2deg(-asin(Up/R))+90;
az(j) = atan2(North, East);
T=T+1;

```

```

end
[X, Y, Z] = sphere(10);
figure; plot3(Resfix(:,1), Resfix(:,2), Resfix(:,3));
hold on;
surf(X*6.371*10^6, Y*6.371*10^6, Z*6.371*10^6);
grid on;
xlabel('X,м');
ylabel('Y,м');
zlabel('Z,м');
title('ECEF WGS84');
figure; plot3(ResECI(:,1), ResECI(:,2), ResECI(:,3));
hold on;
surf(X*6.371*10^6, Y*6.371*10^6, Z*6.371*10^6);
grid on;
xlabel('X,м');
ylabel('Y,м');
zlabel('Z,м');
title('Инерциальная СК');
s = 1;
for y = 1:length(el);
if el(y) <= 90;
    Cel(s) = el(y);
    Caz(s) = az(y);
    s = s+1;
end
end
figure;
polar(2*pi-Caz, Cel);
camroll(90);

```

```
grid on;  
title('Полученный SKYVIEW');
```