

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
КАФЕДРА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине

АППАРАТУРА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ  
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

ФИО студента: Лихачёв М.С

Группа: ЭР-15-16

Вариант №: 12

Дата: \_\_\_\_\_

Подпись: \_\_\_\_\_

ФИО преподавателя: Корогодин И.В.

Оценка: \_\_\_\_\_

Москва  
2021

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

Требования к разрабатываемому программному модулю:

- требования назначения;
- отсутствие утечек памяти;
- малое время выполнения;
- низкий расход памяти;
- корректное выполнение при аномальных входных данных.

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

- обработка данных от приемника, работа со сторонними сервисами для подготовки входных и проверочных данных для разрабатываемого модуля;
- моделирование модуля в Matlab/Python;
- реализация программного модуля на C/C++, включая юнит-тестирование в Check.

## Этап 1. Использование сторонних средств

**Цель 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 Narxон НХ-CSX601А. Она через 50-метровый кабель, сплиттер, bias-tee и усилитель подключена к трем навигационным приемникам:

- Javad Lexion LGDD,
- SwiftNavigation Piksi Multi,
- Clonicus разработки ЛИС 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.

**Исходные данные:** Спутник № 12 системы Beidou.

С помощью «Википедии» определим номер НОРАД и сравним его с номером из «Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения».

12	Компас М3	C11	29.04.2012 20:50	CZ-3B/E	2012-018A	38250	COO, ~21 500 км	действующий
13	Компас М4	C12			2012-018B	38251	COO, ~21 500 км	

Рисунок 1 – Состояние космического аппарата Beidou на Википедии

#### СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ БЭЙДОУ НА 05.03.21

PRN	НОРАД	Тип КА	Тип системы	Дата запуска	Факт. сущ. (дней)	Примечание
C12	38251	МEO-4	BDS-2	30.04.12	3231	Используется по ЦН

Рисунок 2 – Состояние космического аппарата Beidou на «Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения»

Номера спутника совпадают и равны 38251, название спутника - «Компас М4».

**Определение орбиты и положения спутника на ней с помощью сервиса CelesTrak.**

При помощи сервиса CelesTrak можно получить изображение формы орбиты и положение спутника на ней. Изображения по требованию в задании необходимо получить на период 18:00 МСК 16 февраля 2021. 18:00 по МСК соответствует 15:00 по UTC (UTC +3). Так как сервис CelesTrak работает в формате времени UTC, установим время 15:00 UTC 16 февраля 2021.

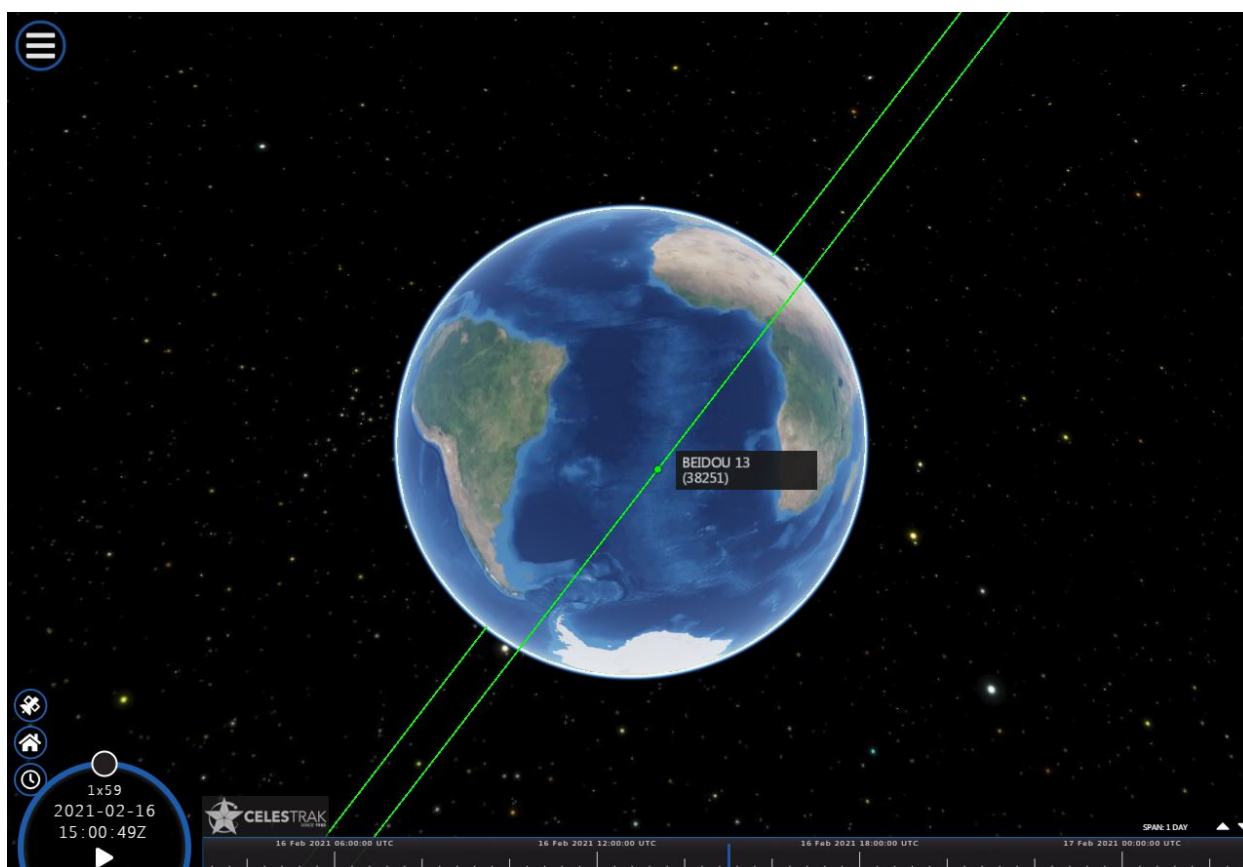


Рисунок 3 — Положение спутника на орбите

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

Рассчитаем график угла места собственного спутника от времени по данным Trimble GNSS Planning Online на интервал времени с 18:00 МСК 16 февраля до 06:00 МСК 17 февраля 2021 года.

The screenshot displays the Trimble GNSS Planning Online interface. On the left, the 'Satellite Selection' panel shows a table of active satellites. On the right, the 'Settings' panel contains various configuration options for the simulation, including coordinates, height, elevation cutoff, date, start time, period, and time zone. A map on the right shows the location of the receiver.

Satellite Selection		
Satellites: 49/131		
System: active	Satellites	
	Selected	Healthy
GPS	0	32
GLONASS	0	23
Galileo	0	22
BeiDou	49	49
QZSS	0	4

My Settings	
Time of almanac:	2021-02-16
Time zone:	UTC +03:00
Visible period:	2021-02-16 18:00 - 2021-02-17 18:00
Latitude:	N 55° 45' 23.5244"
Longitude:	E 37° 42' 12.0821"
Height:	500 m
Elevation cutoff:	10 °

Settings	
Latitude:	N 55° 45' 23.7744"
Longitude:	E 37° 42' 12.1739"
Height:	500 m
Elevation cutoff:	10 °
Day:	16.02.2021
Start time:	18:00 UTC +03:00
Period [hours]:	12
Time zone:	(UTC+03:00) Moscow, St. Petersburg

Рисунок 4 — Настройки Trimble GNSS Planning Online

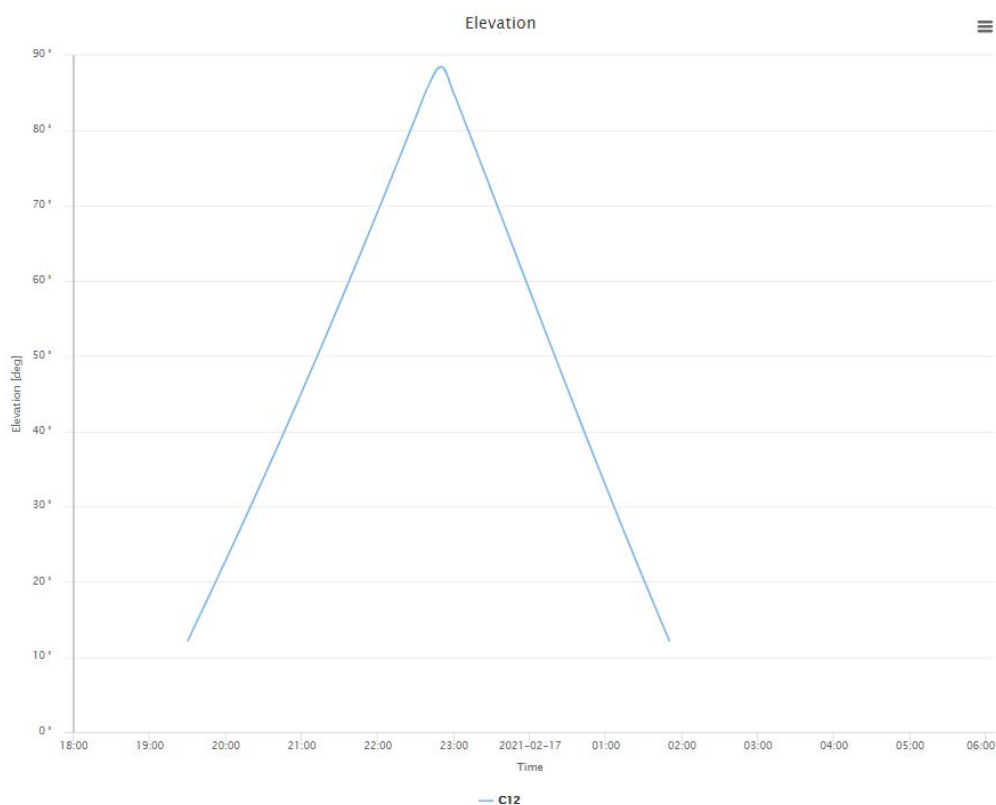


Рисунок 5 — График угла места спутника C12 от времени

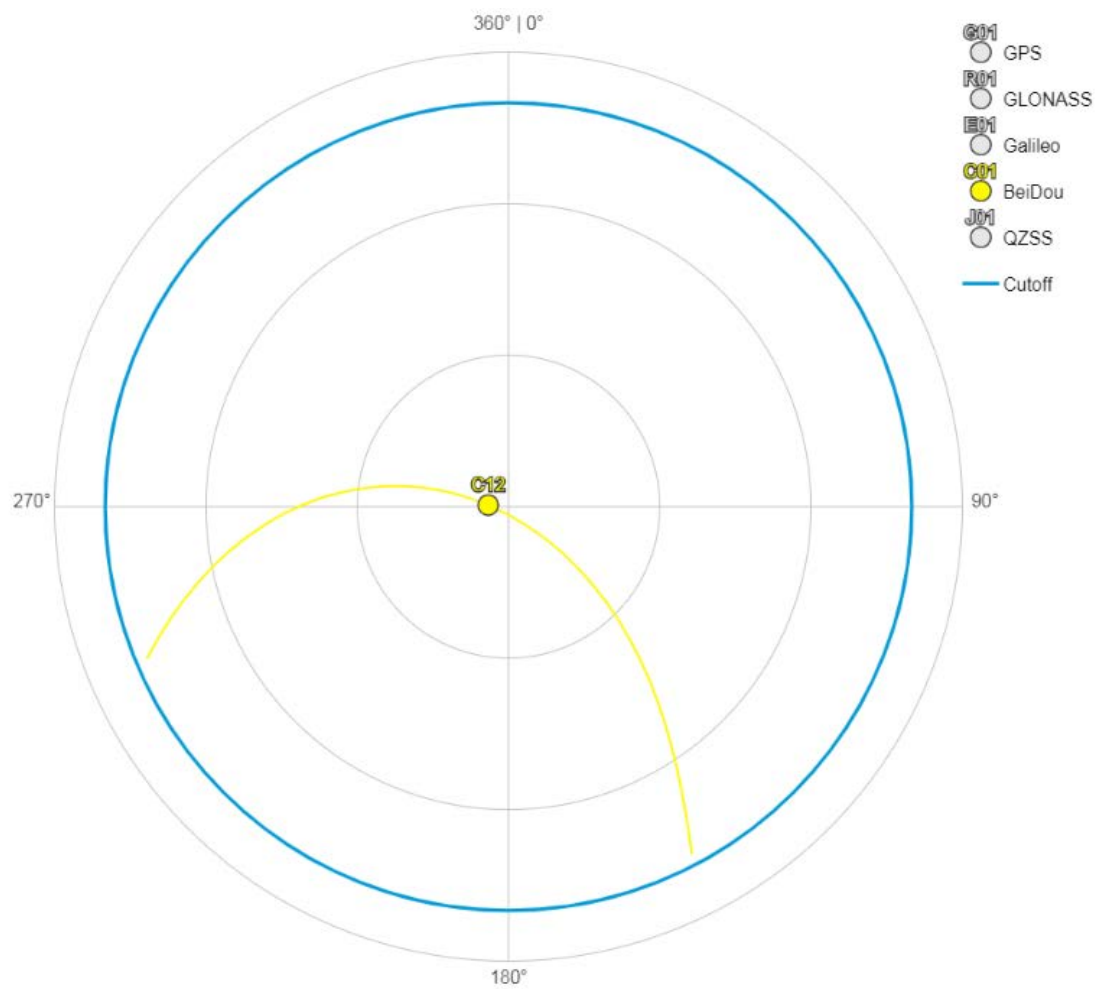


Рисунок 6 – SkyView спутника Beidou C12

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

Таблица 1 – Описание параметров, входящих в состав эфемерид

Параметры	Определение
$t_{oe}$	Отсчет времени эфемерид
$\sqrt{A}$	Квадратный корень из большой полуоси орбиты
$e$	Эксцентриситет
$\omega$	Аргумент перигея
$\Delta n$	Среднее отклонение движения от расчетного значения
$M_0$	Средняя аномалия в исходное время
$\Omega_0$	Долгота восходящего узла орбитальной плоскости, вычисленная по опорному времени
$\dot{\Omega}$	Скорость прямого восхождения
$i_0$	Угол наклона в исходное время
$IDOT$	Скорость угла наклона
$C_{uc}$	Амплитуда косинусной поправки к аргументу широты
$C_{us}$	Амплитуда синусной поправки к аргументу широты
$C_{rc}$	Амплитуда косинусной поправки к радиусу орбиты
$C_{rs}$	Амплитуда синусной поправки к радиусу орбиты
$C_{ic}$	Амплитуда косинусной поправки к углу наклона
$C_{is}$	Амплитуда синусной поправки к углу наклона

## Формирование таблицы эфемерид собственного спутника

Данные спутника берутся из текстового файла, полученного из дампа бинарного потока данных от приемника в формате NVS BINR.

Таблица 2 – Значения эфемерид спутника C12

Параметры	Значение	Размерность
SatNum	12	-
toe, $t_{oe}$	241200000.000	мс
Crs, $C_{rs}$	3.9687500000000000e+00	рад
Dn, $\Delta n$	3.06691347665144498e-12	рад/мс
M0, $M_0$	-3.07094212214015183e+00	рад
Cuc, $C_{uc}$	1.85333192348480225e-07	рад
e	1.23757799156010151e-03	-
Cus, $C_{us}$	1.09374523162841797e-05	рад
sqrtA, $\sqrt{A}$	5.28261268997192383e+03	м <sup>1/2</sup>
Cic, $C_{ic}$	2.60770320892333984e-08	рад
Omega0, $\Omega_0$	-2.36115369616889925e+00	рад
Cis, $C_{is}$	2.37487256526947021e-08	рад
i0, $i_0$	9.89305735914883022e-01	рад
Crc, $C_{rs}$	1.51968750000000000e+02	рад
omega, $\omega$	-1.81447090177903547e+00	рад



OmegaDot, $\dot{\Omega}$	-6.44633994450513345e-12	рад/мс
iDot, $\dot{IDOT}$	-8.67893294096485793e-14	рад/с
Tgd, $T_{GD}$	3.1000000000000000e+04	мс
toc, $t_{oc}$	2.4120000000000000e+08	мс
af2, $a_{f2}$	1.89735386041466636e-22	мс/мс <sup>2</sup>
af1, $a_{f1}$	2.65760746742671472e-11	мс/мс
af0, $a_{f0}$	8.02835941314697266e-01	мс
URA	0	-
IODE	3598	-
IODC	13	-
codeL2	0	-
L2P	0	-
WN	789	-

## Этап 2. Моделирование

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. 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.

Рассчитаем количество секунд от начала текущей недели:

$$(24 \cdot 2 + 15) \cdot 3600 = 226800$$

Рассчитаем количество секунд с 18:00 МСК 16 февраля до 06:00 МСК 17 февраля 2021 года: 43200 с

Моделирование проводится в программе Matlab. Код программы приведен в приложении 1.

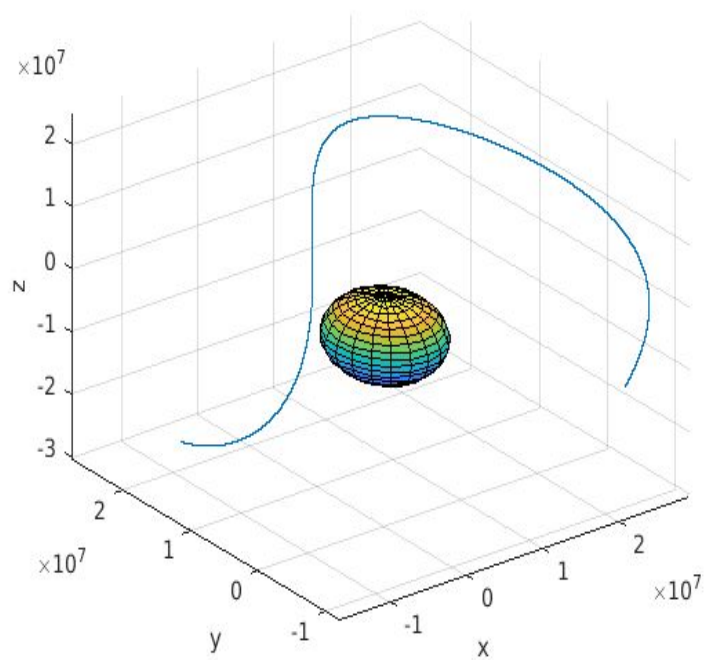


Рисунок 7 - Траектория движения спутника Beidou в системе ECEF

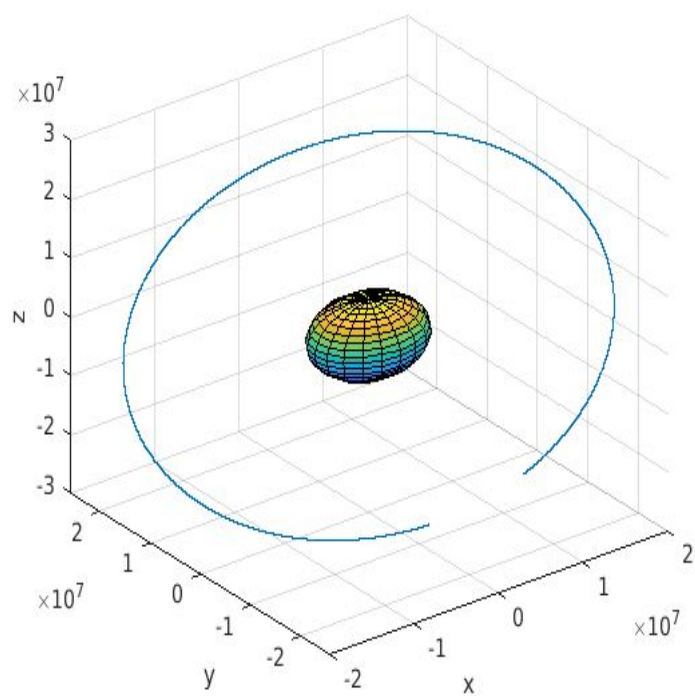


Рисунок 8 - Траектория движения спутника Beidou в системе ECI

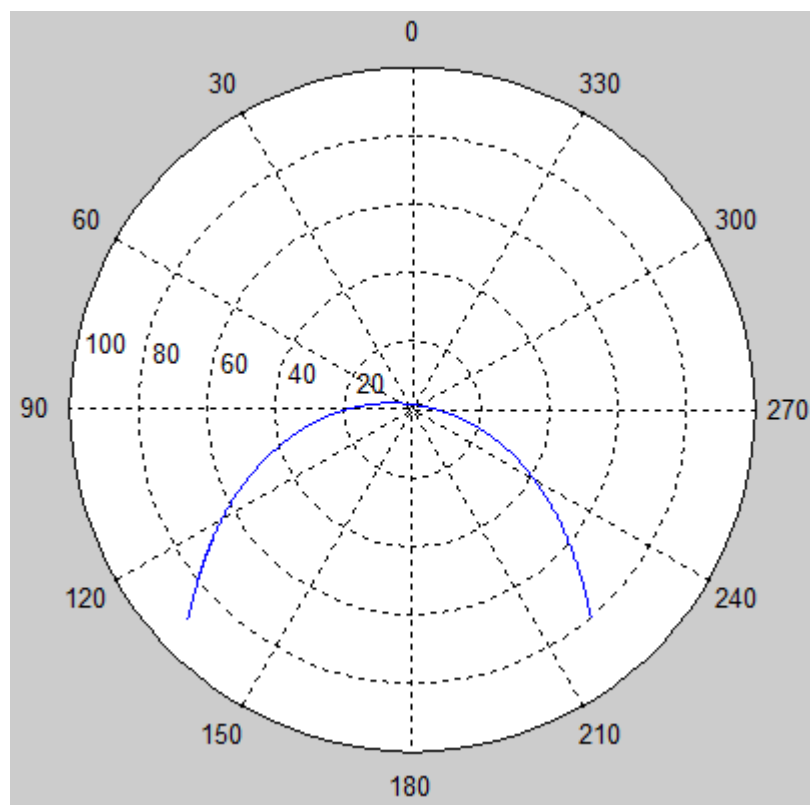


Рисунок 9 - SkyView спутника Beidou

Сравнивая графики SkyView на рисунках 6 и 9, можно сказать, что результаты совпадают с небольшими отличиями, которые могут быть связаны из - за использования одних эфемерид при моделировании.

## Приложение

### Приложение 1

```
clc
close all
%% Параметры
toe = 241200;
Crs = 3.9687500000000000e+00;
Dn = 3.06691347665144498e-12;
M0 = -3.07094212214015183e+00;
Cuc = 1.85333192348480225e-07;
e = 1.23757799156010151e-03;
Cus = 1.09374523162841797e-05;
A = 5.28261268997192383e+03^2;
Cic = 2.60770320892333984e-08;
Omega_0 = -2.36115369616889925e+00;
Cis = 2.37487256526947021e-08;
i0 = 9.89305735914883022e-01;
Crc = 1.5196875000000000e+02;
omega = -1.81447090177903547e+00;
OmegaDot = -6.44633994450513345e-12;
iDot = -8.67893294096485793e-14;
mu = 3.986004418e+14;
Omega_e = 7.2921151467e-5;
n0 = sqrt(mu/A^3);
n = n0 + Dn;
%% Расчет положения спутника Beidou
for i = 1:43200
    t = 226800 + i;
    tk = t - toe;
    Mk = M0 + n*tk;
    E = zeros(1,4);
    E(1,1) = Mk;
    for k = 2:4
        E(1,k) = Mk + e*sin(E(1,k - 1));
        E(1,k-1) = E(1,k);
    end
    Ek = E(1,4);
    vk = atan2(sqrt(1 - e^2)*sin(Ek),cos(Ek) - e);
    Fk = vk + omega;
    del_uk = Cus*sin(2*Fk) + Cuc*cos(2*Fk);
    del_rk = Crs*sin(2*Fk) + Crc*cos(2*Fk);
    del_ik = Cis*sin(2*Fk) + Cic*cos(2*Fk);
    uk = Fk + del_uk;
    rk = A*(1 - e*cos(Ek)) + del_rk;
    ik = i0 + del_ik + iDot*tk;
    xk = rk*cos(uk);
    yk = rk*sin(uk);
    Omega_k = Omega_0 + (OmegaDot - Omega_e)*tk - Omega_e*toe;
    Xk = xk*cos(Omega_k) - yk*cos(ik)*sin(Omega_k);
    Yk = xk*sin(Omega_k) + yk*cos(ik)*cos(Omega_k);
```

```

Zk = yk*sin(ik);
Kx(1,i) = Xk;
Ky(1,i) = Yk;
Kz(1,i) = Zk;
Theta = Omega_e*tk;
Xk1 = Xk*cos(Theta) - Yk*sin(Theta);
Yk1 = Xk*sin(Theta) + Yk*cos(Theta);
Zk1 = Zk;
Kx1(1,i) = Xk1;
Ky1(1,i) = Yk1;
Kz1(1,i) = Zk1;
H = 500;
a = 6378137;
b = 55.45237744;
[East, North, Up] = ecef2enu(Xk, Yk, Zk, b, a, H,
wgs84Ellipsoid);
R = sqrt(East^2 + North^2 + Up^2);
Thetal(i) = rad2deg(-asin(Up/R))+90;
phil(i) = atan2(East, North);
t=t+1;
end
%% Графики
figure (1)
[x_sphere, y_sphere, z_sphere] = sphere(20);
x_Earth=a*x_sphere;
y_Earth=a*y_sphere;
z_Earth=a*z_sphere;
surf(x_Earth,y_Earth,z_Earth); hold on;
plot3(Kx(1,:), Ky(1,:), Kz(1,:));
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('z');
figure (2)
surf(x_Earth,y_Earth,z_Earth); hold on;
plot3(Kx1(1,:), Ky1(1,:), Kz1(1,:));
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('z');
m = 1;
figure(3)
for y = 1:length(Thetal);
if Thetal(y) <= 90;
Theta2(m) = Thetal(y);
phi2(m) = phil(y);
m = m+1;
end
end
polar(phi2, Theta2);
camroll(90);
grid on;

```