

Национальный Исследовательский Университет

«МЭИ»

Институт Радиотехники и Электроники

Кафедра Радиотехнических Систем

Курсовой проект

по дисциплине

«Аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем»

Студент: Мялова К.А.

Группа: ЭР-15-16

Вариант: 8

Преподаватель: Корогодин И.В.

Москва

2021

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые радионавигационные системы время являются неотъемлемой частью нашей жизни. Они используются в различных сферах начиная от телефона до ракет. 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:

- 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 юниттестирование в Check.

Конечная цель всего курсового проекта - получить библиотеку функций на «C++», позволяющую рассчитывать положение спутника Beidou по его эфемеридам.

ЭТАП 1 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОРОННИХ СРЕДСТВ

1.1 Описание задания

Дан номер спутника BEIDOU, вариант – С14, значения эфемерид для спутников указаны в бинарном и текстовом файлах. Значения получены от антенны Haxxon 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 вечером 16 февраля 2021 года.

C14	38775	ME0-6	BDS-2	19.09.12	3089	Используется по ЦН
-----	-------	-------	-------	----------	------	--------------------

Рисунок 1 – Состояние 14-го спутника BEIDOU с «Информационно аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения»

Компас М6	C14	18.09.2012 19:10	CZ-3B/E	2012-050B	38775	СОО, ~21 500 км	действующий
-----------	-----	------------------	---------	-----------	-------	-----------------	-------------

Рисунок 2 – Состояние 14-го спутника BEIDOU с сайта Википедия

По рисункам 1 и 2 видно номер спутника – 38775, название спутника – «Компас М6».

1.2 Определение орбиты и положения спутника на ней с помощью сервиса CelesTrak

Для выполнения данного пункта нужно перейти на сайт CelesTrak (<https://celestrak.com>), настроить параметры и выбрать нужный спутник, после чего будет определена орбита и его положение.

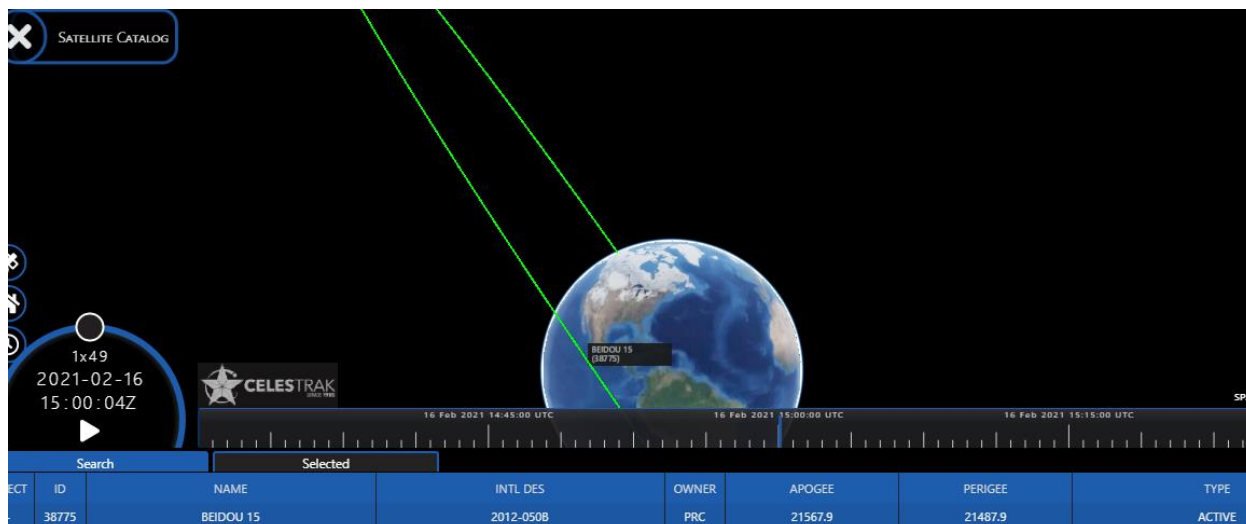


Рисунок 3 – Положение спутника на орбите

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

Введём параметры для моделирования GNSS Planning Online, координаты установим в соответствии с расположением антенны соответственно значению корпуса Е МЭИ, также начальное время будет соответствовать 18:00, временной пояс +3 (UTC +3) на всем этапе моделирования в сервисе GNSS Planning Online.

Система: активная	Спутники	
	Выбранный	Здоровый
GPS	<input checked="" type="checkbox"/>	32
ГЛОНАСС	<input checked="" type="checkbox"/>	23
Галилей	<input checked="" type="checkbox"/>	22
Бейду	<input checked="" type="checkbox"/>	49
QZSS	<input checked="" type="checkbox"/>	4

Мои Настройки	
Время альманаха:	2021-02-16
Часовой пояс:	UTC +03:00
Видимый период:	2021-02-16 18:00 - 2021-02-17 06:00
Широта:	N 55° 45' 23.5491"
Долгота:	E 37° 42' 13.4571"
Высота:	200 м
Отсечка высоты:	10 °

Настройки	
Широта:	N 55° 45' 23.5491"
Долгота:	E 37° 42' 13.4571"
Высота:	200 м
Отсечка высоты:	10 °
День:	16.02.2021
Время начала:	18:00 UTC +03:00
Период [часов]:	12
Часовой пояс:	(UTC+03:00) Москва, Санкт-Петербург

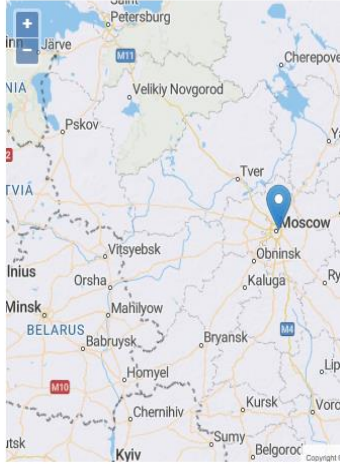


Рисунок 4 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

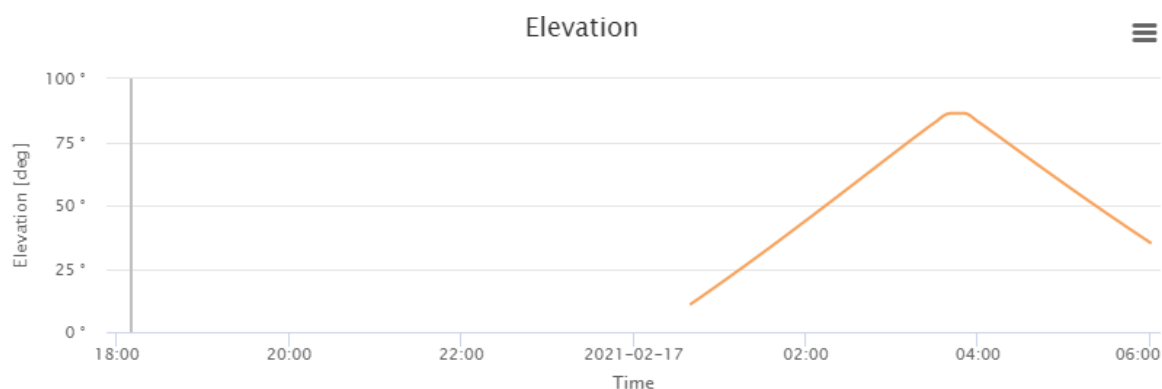


Рисунок 5 – График угла места собственного спутника от времени

Из графика видно, что спутник на указанном временном интервале с 18:00 до 06:00 был в области видимости с 00:40 до 06:00.

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

Проведем моделирование Sky Plot во временном интервале 18:00-06:00 и зафиксируем положение спутника в критических точках.

2 графика положения спутника:

- 16 февраля 2021 в 00:40:

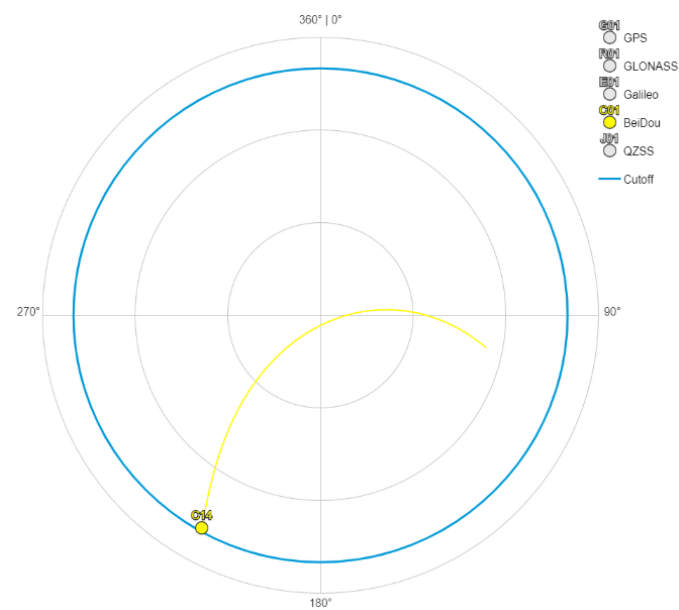


Рисунок 7 – Диаграмма угла азимута спутника

- 17 февраля в 06:00:

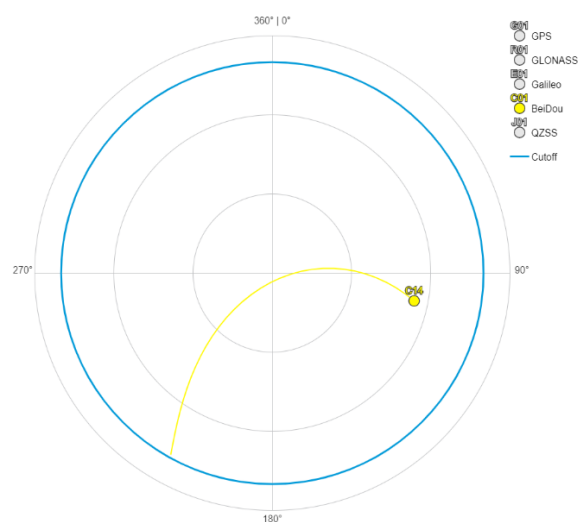


Рисунок 8 – Диаграмма угла азимута спутника

1.5 Формирование списка и описание параметров, входящих в состав эфемерид

Таблица 1 – Значения эфемерид спутника С14

Параметр	Обозначение параметра	Значение
SatNum	PRN	14
Toe (мс)	t_{oe}	219600000.000
Crs (рад)	-	-7.2312500000000000e+01
Dn (рад/мс)	Δn	4.05445468865117675e-12
M0 (рад)	M_0	2.55684508480358019e+00
Cuc (рад)	-	-3.59397381544113159e-06
e	e	1.28501909784972668e-03
Cus (рад)	-	5.57675957679748535e-06
$\text{sqrt}A \text{ (м}^{\frac{1}{2}}\text{)}$	\sqrt{A}	5.28261658287048340e+03
Cic (рад)	-	1.95577740669250488e-08
Omega0 (рад)	Ω_0	-2.81773662124041036e-01
Cis (рад)	-	5.91389834880828857e-08
i0 (рад)	i_0	9.62975188353317302e-01
Crc (рад)	-	2.4753125000000000e+02
Omega (рад)	ω	-6.40880762456192743e-01
OmegaDot (рад/мс)	$\dot{\Omega}$	-7.00850621812976967e-12
iDot (рад/сек)	i_{DOT}	-1.62149611325022453e-13
Tgd (мс)	T_{gd}	6.9000000000000000e+04
Toc (мс)	T_{oc}	2.1960000000000000e+08
af2 (мс/мс ²)	-	8.13151611188773069e-22
af1 (мс/мс)	-	8.97282248502051516e-11
af0 (мс)	-	1.49921745061874390e-01
URA	-	0
IODE	-	2570

IODC	-	9
codeL2	-	0
L2P	-	0
WN	-	789

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

На предыдущем этапе были получены эфемериды спутника. 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 эту 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 предыдущим этапе.

Построить трехмерные графики множества положений спутника Beidou.

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 предыдущем этапе.

Построим траектории движения спутника (рисунок 9).

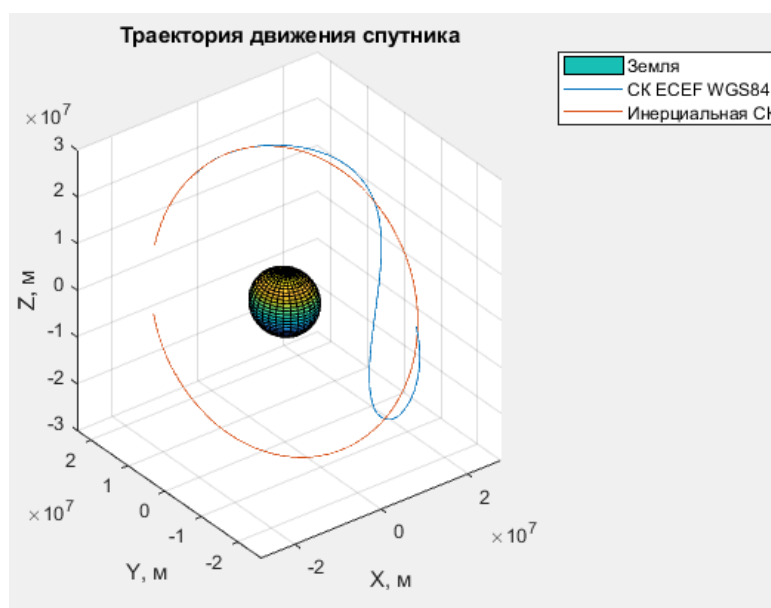


Рисунок 9 – Траектории движения спутника

Расчет графиков SkyView изображен на рисунке 10.

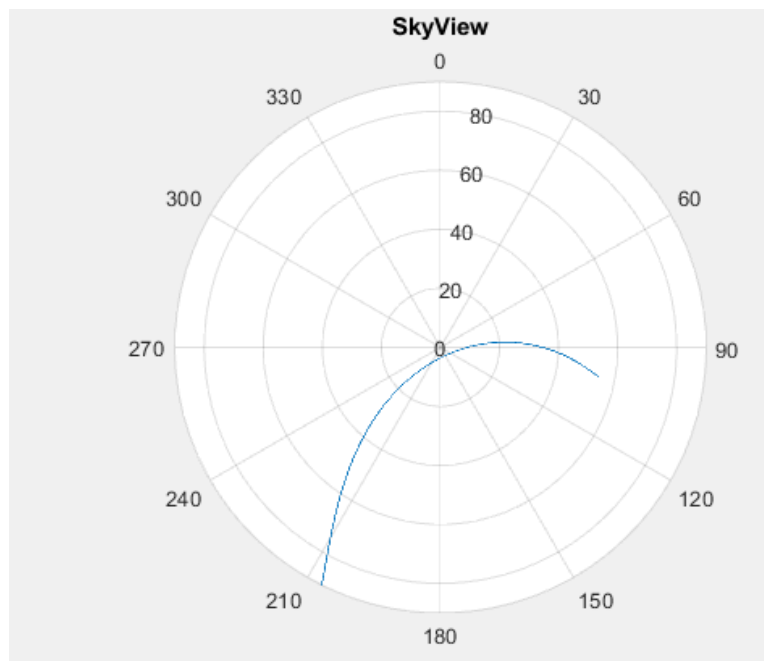


Рисунок 10 – SkyView

Построим график угла места (рисунок 11).

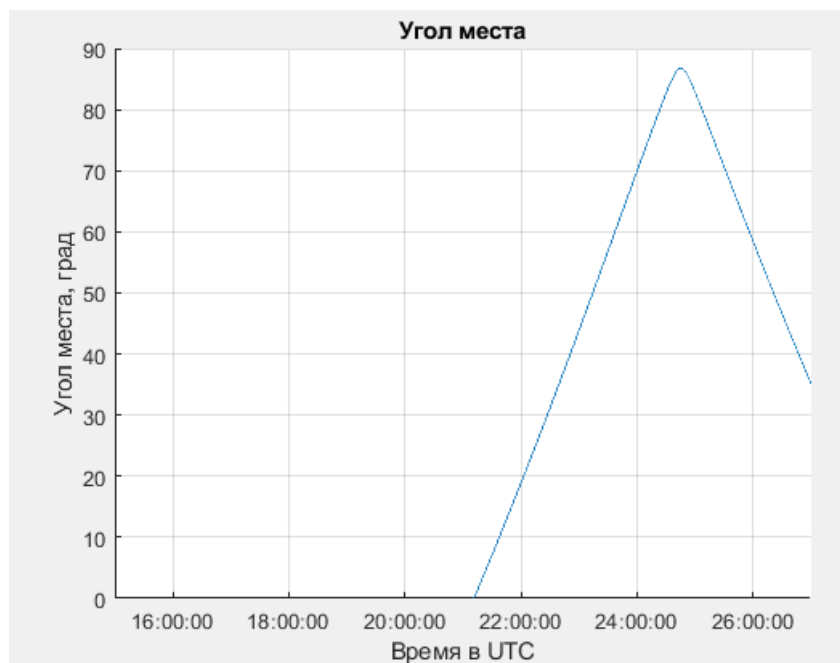


Рисунок 11 – График угла места

Данные результатов моделирования совпадают с данными Trimble GNSS Planning Online с погрешностью из-за того, что использовались одни и те же эфемериды на весь интервал расчета.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1

```
clear all;

clc;

close all;

%% Эфемериды

SatNum = 14;

toe = 219600000.000 * 10^-3;

Crs = -7.2312500000000000e+01;

Dn = 4.05445468865117675e-12;

M0 = 2.55684508480358019e+00;

Cuc = -3.59397381544113159e-06;

e = 1.28501909784972668e-03;

Cus = 5.57675957679748535e-06;

sqrtA = 5.28261658287048340e+03;

Cic = 1.95577740669250488e-08 ;

Omega0 = -2.81773662124041036e-01;

Cis = 5.91389834880828857e-08;

i0 = 9.62975188353317302e-01;

Crc = 2.4753125000000000e+02;

omega = -6.40880762456192743e-01;

OmegaDot = -7.00850621812976967e-12;

iDot = -1.62149611325022453e-13;

Tgd = 6.9000000000000000e+04;

toc = 2.1960000000000000e+08;

af2 = 8.13151611188773069e-22 ;

af1 = 8.97282248502051516e-11;

af0 = 1.49921745061874390e-01;

URA = 0;

IODE = 2570;
```

```

IODC = 9;
codeL2 = 0;
L2P = 0;
WN = 789;

%% Константы
mu = 3.986004418e14; % гравитационная постоянная
Omega_E = 7.2921151467e-5; % скорость вращения

%% Расчет
tstart = (24*2 + 18 - 3)*60*60; % время старта 18:00 МСК 16 февраля
tstop = (24*3 + 6 - 3)*60*60; % время окончания 6:00 МСК 17 февраля
% Массив времени
t_arr = tstart:1:tstop;

% Большая полуось
A = sqrt(A^2);

% Среднее движение
n0 = sqrt(mu/A^3);
n = n0 + Dn;
for k = 1:length(t_arr)
    % Время
    t(k) = t_arr(k) - toe;
    if t(k) > 302400
        t(k) = t(k) - 604800;
    end
    if t(k) < -302400
        t(k) = t(k) + 604800;
    end
end

```

% Средняя аномалия

$$M(k) = M_0 + n \cdot t(k);$$

% Решение уравнения Кеплера

$$E(k) = M(k);$$

$$E_old(k) = M(k) + 1;$$

$$\epsilon = 1e-6;$$

while abs(E(k) - E_old(k)) > epsilon

$$E_old(k) = E(k);$$

$$E(k) = M(k) + e \cdot \sin(E(k));$$

end

% Истинная аномалия

$$\nu(k) = \operatorname{atan2}\left(\frac{\sqrt{1 - e^2} \cdot \sin(E(k))}{1 - e \cdot \cos(E(k))}, \cos(E(k))\right) - e / (1 - e \cdot \cos(E(k)));$$

% Коэффициенты коррекции

$$\Phi(k) = \omega + \nu(k);$$

$$\operatorname{cor_cos}(k) = \cos(2 \cdot \Phi(k));$$

$$\operatorname{cor_sin}(k) = \sin(2 \cdot \Phi(k));$$

% Аргумент широты

$$\delta_u(k) = \Phi(k) + C_{uc} \cdot \operatorname{cor_cos}(k) + C_{us} \cdot \operatorname{cor_sin}(k);$$

% Радиус

$$\delta_r(k) = A \cdot (1 - e \cdot \cos(E(k))) + C_{rc} \cdot \operatorname{cor_cos}(k) + C_{rs} \cdot \operatorname{cor_sin}(k);$$

% Наклон

$$\delta_i(k) = i_0 + i_{\text{Dot}} \cdot t(k) + C_{ic} \cdot \operatorname{cor_cos}(k) + C_{is} \cdot \operatorname{cor_sin}(k);$$

```

% 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 Е 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,wgs84Elli
psoid,'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(t_arr/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')
```