

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»**

ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

КАФЕДРА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине

Аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем

«Разработка модуля расчет координат спутника Beidou»

ФИО СТУДЕНТА: САЛИН Г.А.

ГРУППА: ЭР-15-16

ВАРИАНТ №:20

ДАТА: _____

ПОДПИСЬ: _____

ФИО ПРЕПОДАВАТЕЛЯ: КОРОГОДИН И.В.

ОЦЕНКА: _____

МОСКВА, 2021

Содержание

Введение	3
1 Использование сторонних средств	4
1.1 Описание этапа	4
1.2 CelesTrak	4
1.3 Trimble GNSS Planning Online	6
1.4 Эфемериды в сигнале Beidou B1I	8
1.5 Заключение по результатам использования сторонних средств	10
2 Моделирование	11
2.1 Описание этапа	11
2.2 Алгоритм расчета координат	12
2.3 Результаты расчета координат спутника	13
2.4 Расчет SkyView	14
2.4 Заключение по результатам моделирования	16

Введение

Название проекта: Разработка модуля расчёта координат спутника Beidou.

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 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.

Этапы курсовой работы отличаются осваиваемыми инструментами.

1 Использование сторонних средств

1.1 Описание этапа

На крыше корпуса Е МЭИ установлена трехдиапазонная антенна Harxon HX-CSX601A. Она через 50-метровый кабель, сплиттер, bias-tee и усилитель подключена к трем навигационным приемникам:

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

Эти приемники осуществляют первичную обработку сигналов Beidou B11, 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 дам бинарного потока данных от приемника в формате NVS BINR.

Во-вторых, текстовый файл данных пакета 0xF7, полученный из данного дампа.

1.2 Celestrak

Определение формы орбиты и положения спутника на ней на начало рассматриваемого интервала времени (на 18:00 МСК 16 февраля 2021 года) по данным сервиса Celestrak.

Для определения имя и ID спутника воспользуемся таблицей из ru.wikipedia.org/wiki/Бэйдоу.

№ ↕	Спутник ↕	PRN ↕	Дата (UTC) ↕	Ракета ↕	NSSDC ID ↕	SCN ↕	Орбита ↕	Статус ↕
24	Бэйдоу-3 M1	C19	05.11.2017 11:44	CZ-3B/YZ-1	2017-069A	43001	COO, ~21 500 км	действующий
25	Бэйдоу-3 M2	C20			2017-069B	43002	COO, ~21 500 км	действующий

Рисунок 1 – Часть таблицы со списком спутников

Как видно из таблицы, спутник с номером 20 (PRN C20) имеет порядковый номер 25, имя спутника – Бэйдоу-3 M2 и ID 43002 (SCN в таблице).

Теперь зайдём на сайт celestrak.com. Выберем спутник Beidou-3 M2 с ID 43002, и установим заданное время. В сервисе используется время по UTC, которое отличается от времени по МСК на 3:00 часа, поэтому установим следующее время: 15:00:00 2021:02:16. Результаты приведены на рисунках 2 и 3.

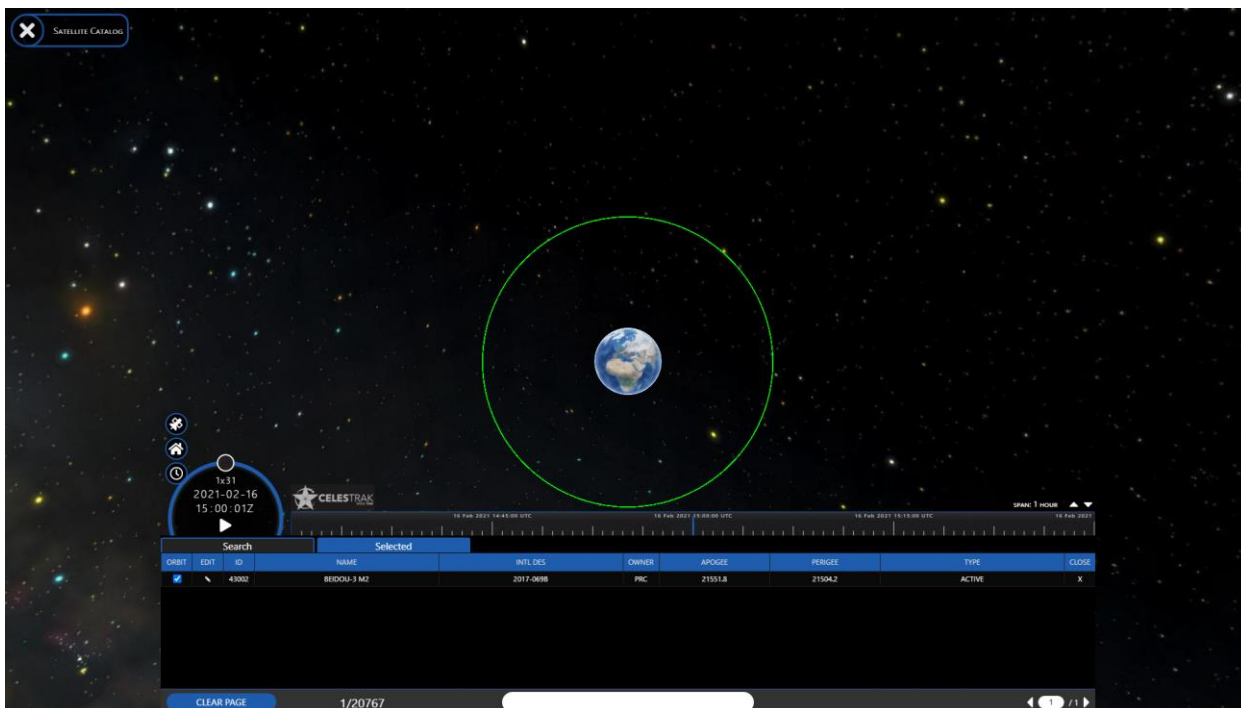


Рисунок 2 – Орбита спутника

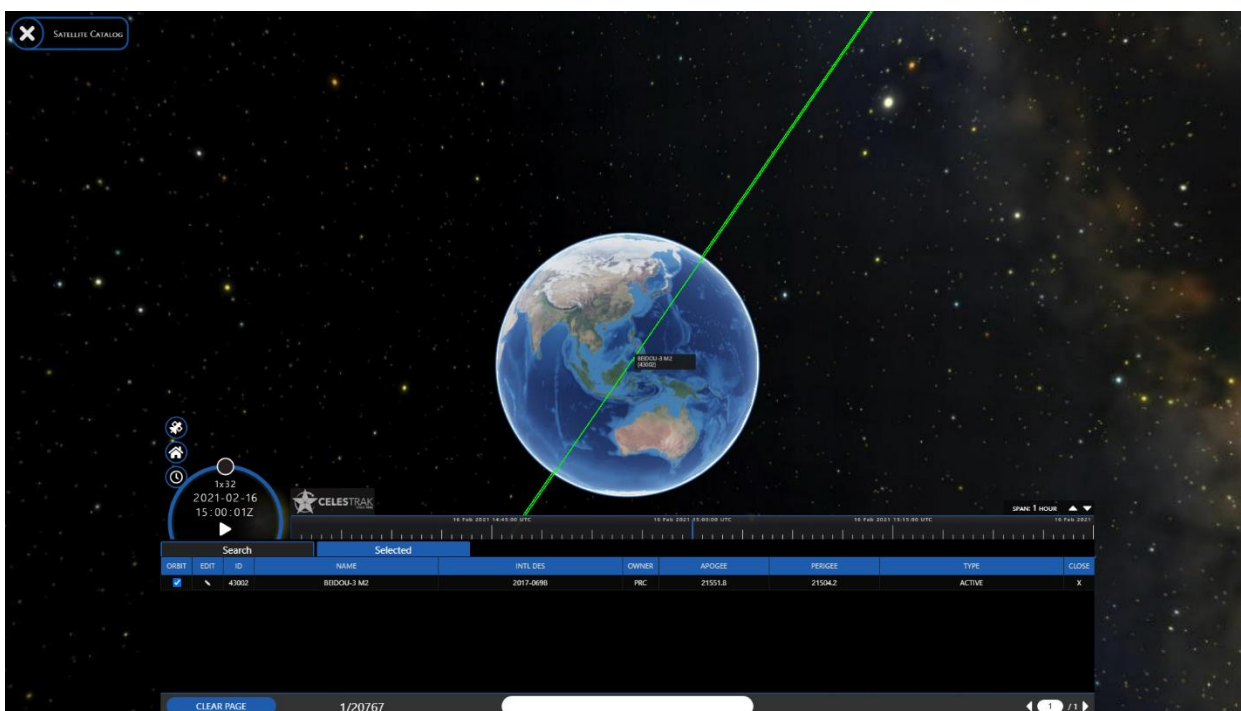


Рисунок 3 – Подспутниковая точка

По рисунку 2 видно, что орбита у спутника Beidou-3 M2 круговая.

По рисунку 3 видно, что подспутниковая точка на заданное время находилась в районе островов Филиппин.

1.3 Trimble GNSS Planning Online

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

Зайдем на сайт gnssplanning.com. По заданному интервалу и расположению приемной антенны устанавливаем следующие настройки (рисунок 4).

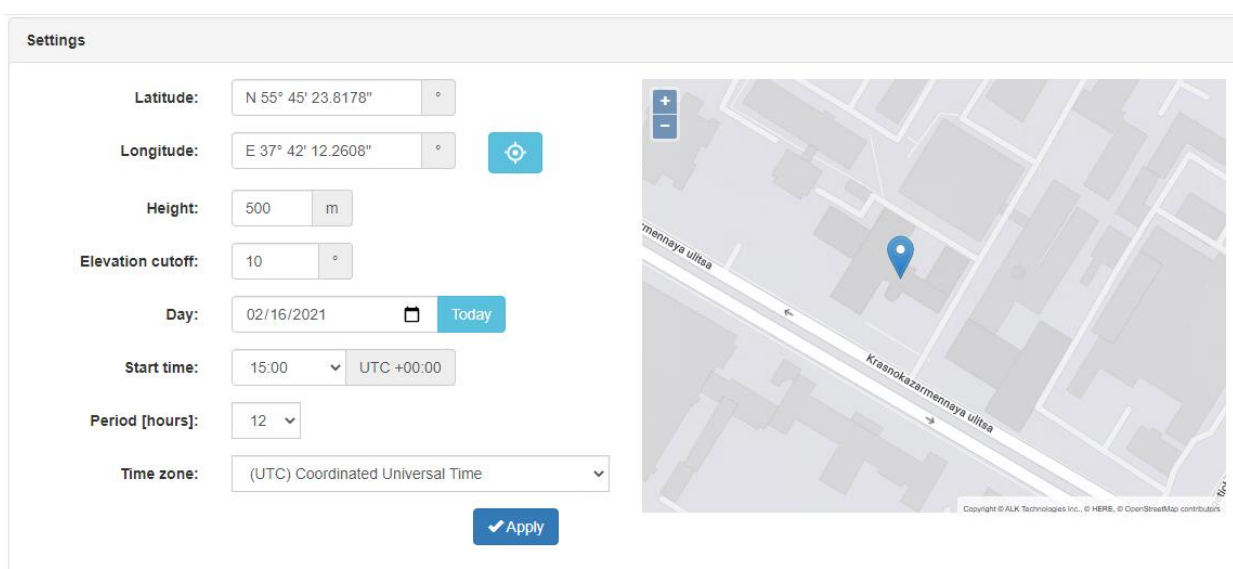


Рисунок 4 – Настройки сервиса Trimble GNSS Planning Online

Зная из предыдущего пункта имя спутника, выберем его и построим график угла места (рисунок 5), график SkyView (рисунок 6) и, для проверки, карту мира с траекторией движения спутника (рисунок 7).

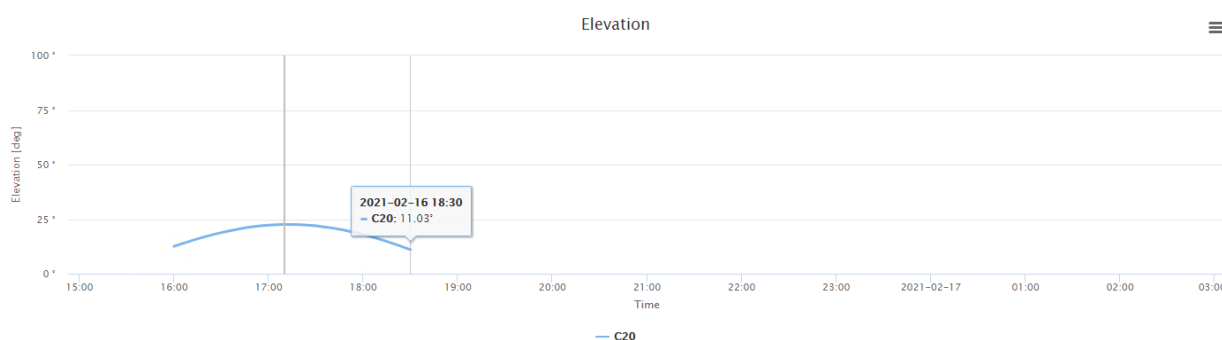


Рисунок 5 – График угла места

По рисунку 5 видно, что спутник попал в поле зрения приемной антенны в 16:00 по UTC (19:00 МСК) и пропал в 18:30 UTC (21:30 МСК). Угол места изменялся от 11.03 до 22.57 градусов.

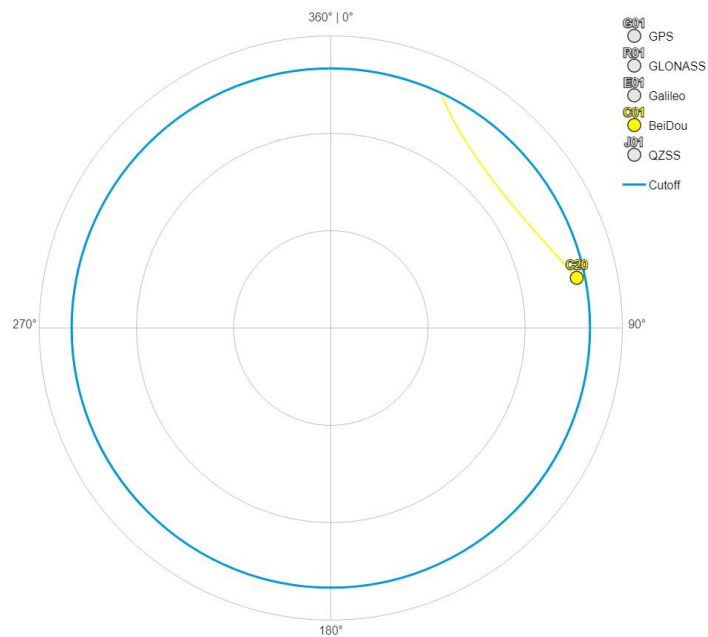


Рисунок 6 – График SkyView

График SkyView показывает, что спутник был виден антенной в азимуте от 0 до 90 градусов.

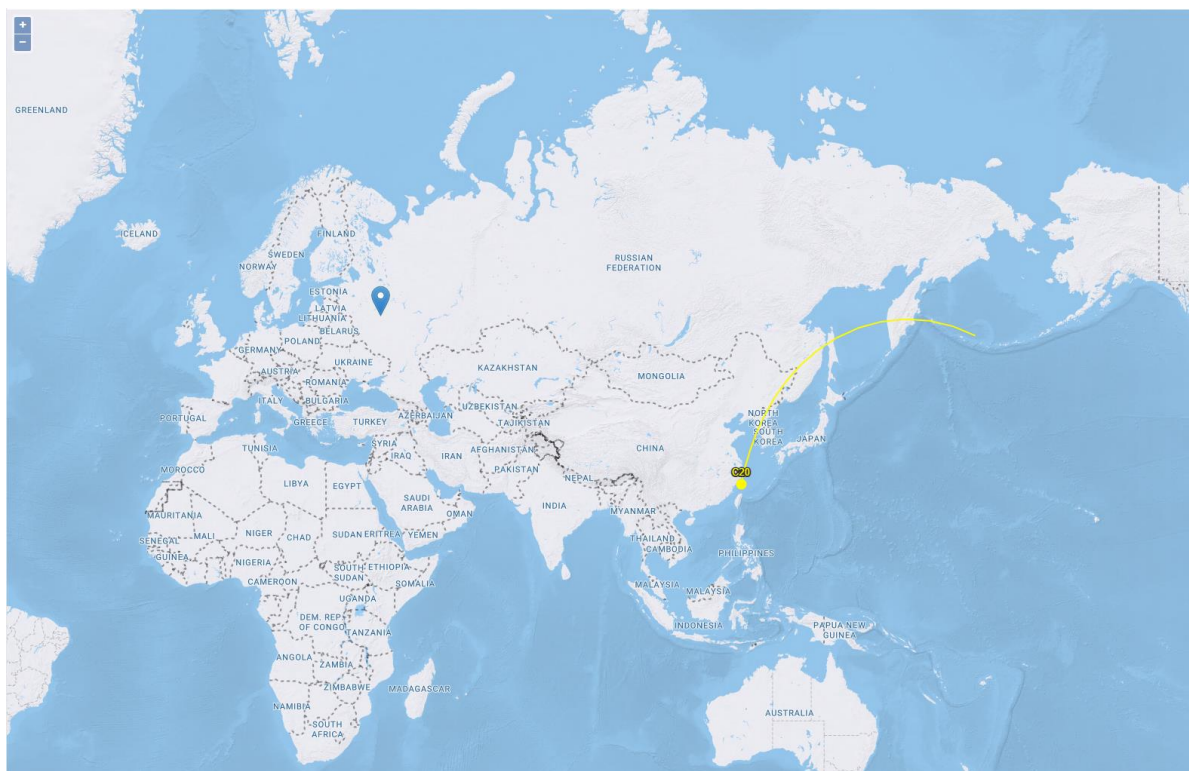


Рисунок 7 – Карта мира с траекторией движения спутника

В тот момент, когда спутник попал в поле зрения приемной антенны (19:00 МСК), его ПТ находилась чуть выше Филиппин, а когда исчез из поля зрения (21:30 МСК) – чуть восточнее полуострова Камчатка.

1.4 Эфемериды в сигнале Beidou B1I

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

Воспользуемся ИКД BeiDou: Navigation Satellite System Signal In Space, Interface Control Document, Open Service Signal B1I (Version 3.0), China Satellite Navigation Office, February 2019. Находим там таблицы 5-9 и 5-10, объединяем их и формируем таблицу с описанием параметров эфемерид.

Таблица 1 – Описание параметров, входящих в состав эфемерид 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
----------	--	-----

Формирование таблицы эфемерид спутника с подписанными размерностями.

Для этого откроем файл binr_0x00F7_BdsB1I.txt из директории logs/, найдем эфемериды спутника, и сведем их в таблицу 2.

Таблица 2 – Эфемериды спутника Beidou C20.

Параметр	Обозначение переменной	Единица измерения	Значение
PRN	SatNum	-	20
t_{oe}	toe	мс	226800000.000
C_{rs}	Crs	м	-7.392187500000000000e+01
Δn	Dn	рад/с	3.97195124013371981e-12
M_0	m0	рад	8.71704768059675339e-01
C_{uc}	Cuc	рад	-3.64007428288459778e-06
e	e	-	6.97147799655795097e-04
C_{us}	Cus	рад	5.95534220337867737e-06
\sqrt{A}	sqrtA	м ^{1/2}	5.28262682533264160e+03
C_{ic}	Cic	рад	-7.49714672565460205e-08
Ω_0	Omega0	рад	-2.82333800290329728e-01
C_{is}	Cis	рад	-6.84522092342376709e-08
i_0	i0	рад	9.65664043486355039e-01
C_{rc}	Crc	м	2.445000000000000000e+02
ω	omega	рад	-7.73836711576575076e-01
$\dot{\Omega}$	OmegaDot	рад/мс	-7.00779190266137795e-12

<i>IDOT</i>	iDot	π/c	-1.97151069276238744e-13
<i>T_{GD}</i>	Tgd	mc	2.3000000000000000e+05
<i>t_{oc}</i>	toc	mc	2.2680000000000000e+08
<i>a_{f2}</i>	af2	mc/mc ²	0.0000000000000000e+00
<i>a_{f1}</i>	af1	mc/mc	-4.24460466774689849e-12
<i>a_{f0}</i>	af0	mc	-9.16242361068725586e-01
<i>URA</i>	URA	-	0
<i>IODE</i>	IODE	-	257
<i>IODC</i>	IODC	-	1
<i>codeL2</i>	codeL2	-	0
<i>L2P</i>	L2P	-	0
<i>WN</i>	WN	-	789

1.5 Заключение по результатам использования сторонних средств

В результате использования сторонних средств, такие как сервисы CelesTrak и Trimble GNSS Planning Online, а также данных от приемника Clonius, были получены следующие результаты:

- Определена форма орбиты и положение собственного спутника на ней на 18:00 МСК 16 февраля 2021 года.
- Получены график угла места и диаграмма угла места и азимута (SkyView) собственного спутника на интервале времени с 18:00 МСК 16 февраля до 06:00 МСК 17 февраля.
- Сформированы таблица со списком и описанием параметров, входящих в состав эфемерид спутника Beidou, и таблица эфемерид собственного спутника Beidou.

2 Моделирование

2.1 Описание этапа

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 C20. 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.

Таблица 3. Используемые эфемериды

Параметр	Обозначение переменной	Единица измерения	Значение
t_{oe}	toe	мс	226800000.000
C_{rs}	Crs	м	-7.392187500000000000e+01
Δn	Dn	рад/с	3.97195124013371981e-12
M_0	m0	рад	8.71704768059675339e-01
C_{uc}	Cuc	рад	-3.64007428288459778e-06
e	e	-	6.97147799655795097e-04
C_{us}	Cus	рад	5.95534220337867737e-06
\sqrt{A}	sqrtA	м ^{1/2}	5.28262682533264160e+03

C_{ic}	Cic	рад	-7.49714672565460205e-08
Ω_0	Omega0	рад	-2.82333800290329728e-01
C_{is}	Cis	рад	-6.84522092342376709e-08
i_0	i0	рад	9.65664043486355039e-01
C_{rc}	Crc	м	2.44500000000000000e+02
ω	omega	рад	-7.73836711576575076e-01
$\dot{\Omega}$	OmegaDot	рад/мс	-7.00779190266137795e-12
$IDOT$	iDot	π/c	-1.97151069276238744e-13

2.2 Алгоритм расчета координат

Как было сказано выше, Beidou наследует модель движения спутника GPS. Воспользуемся сайтом, https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_and_Galileo_Satellite_Coordinates_Computation.

Алгоритм расчета следующий:

- Вычисление время t_k от эталонной эпохи эфемерид t_{oe} (t и t_{oe} выражаются в секундах от начала недели GPS):

$$t_k = t - t_{oe}$$

Если $t_k > 302\,400$ секунд, необходимо вычесть 604 800 секунд из t_k . Если $t_k < -302\,400$ секунд, необходимо добавить 604 800 секунд.

- Вычисление средней аномалии на t_k :

$$M_k = M_0 + \left(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{a^3}} + \Delta n \right) t_k$$

Где $a = (\sqrt{A})^2$ – длина большой полуоси;

$\mu = 3,986004118 \times 10^{14}$ – гравитационная постоянная.

- Решение (итеративное) уравнения Кеплера для нахождения аномалии эксцентриситета E_k :

$$M_k = E_k - e \sin E_k$$

$$E_k = M_k + e \sin E_k$$

Начальное условие: $E_k = M_k$;

Точность вычисления: $\varepsilon = 10^{-6}$.

- Вычисление истинной аномалии v_k :

$$v_k = \arctan\left(\frac{\sqrt{1-e^2} \sin E_k}{\cos E_k - e}\right)$$

- Вычисление аргумента широты u_k :

$$u_k = \omega + v_k + C_{uc} \cos 2(\omega + v_k) + C_{us} \sin 2(\omega + v_k)$$

- Вычисление радиальное расстояние r_k :

$$r_k = A(1 - e \cos E_k) + C_{rc} \cos 2(\omega + v_k) + C_{rs} \sin 2(\omega + v_k)$$

- Вычисление наклона орбитальной плоскости i_k :

$$i_k = i_0 + IDOT \cdot t_k + C_{ic} \cos 2(\omega + v_k) + C_{is} \sin 2(\omega + v_k)$$

- Вычисление долготы восходящего узла λ_k :

$$\lambda_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \omega_E)t_k - \omega_E t_{oe}$$

Где $\omega_E = 7,2921151467 \times 10^{-5}$ – скорость вращения Земли.

Далее, чтобы не пользоваться матрицами поворота, воспользуемся ИКД Beidou, ссылка: <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201902/P020190227593621142475.pdf>

- Вычисление позиции спутника в орбитальной плоскости:

$$\begin{cases} x_k = r_k \cos u_k \\ y_k = r_k \sin u_k \end{cases}$$

- Вычисление координат спутника:

$$\begin{cases} X_k = x_k \cos \lambda_k - y_k \cos i_k \sin \lambda_k \\ Y_k = x_k \sin \lambda_k + y_k \cos i_k \cos \lambda_k \\ Z_k = y_k \sin i_k \end{cases}$$

2.3 Результаты расчета координат спутника

Для моделирования выбран язык Matlab. Скрипты программы находятся в директории simulation проекта. Листинг программы приведен в приложении.

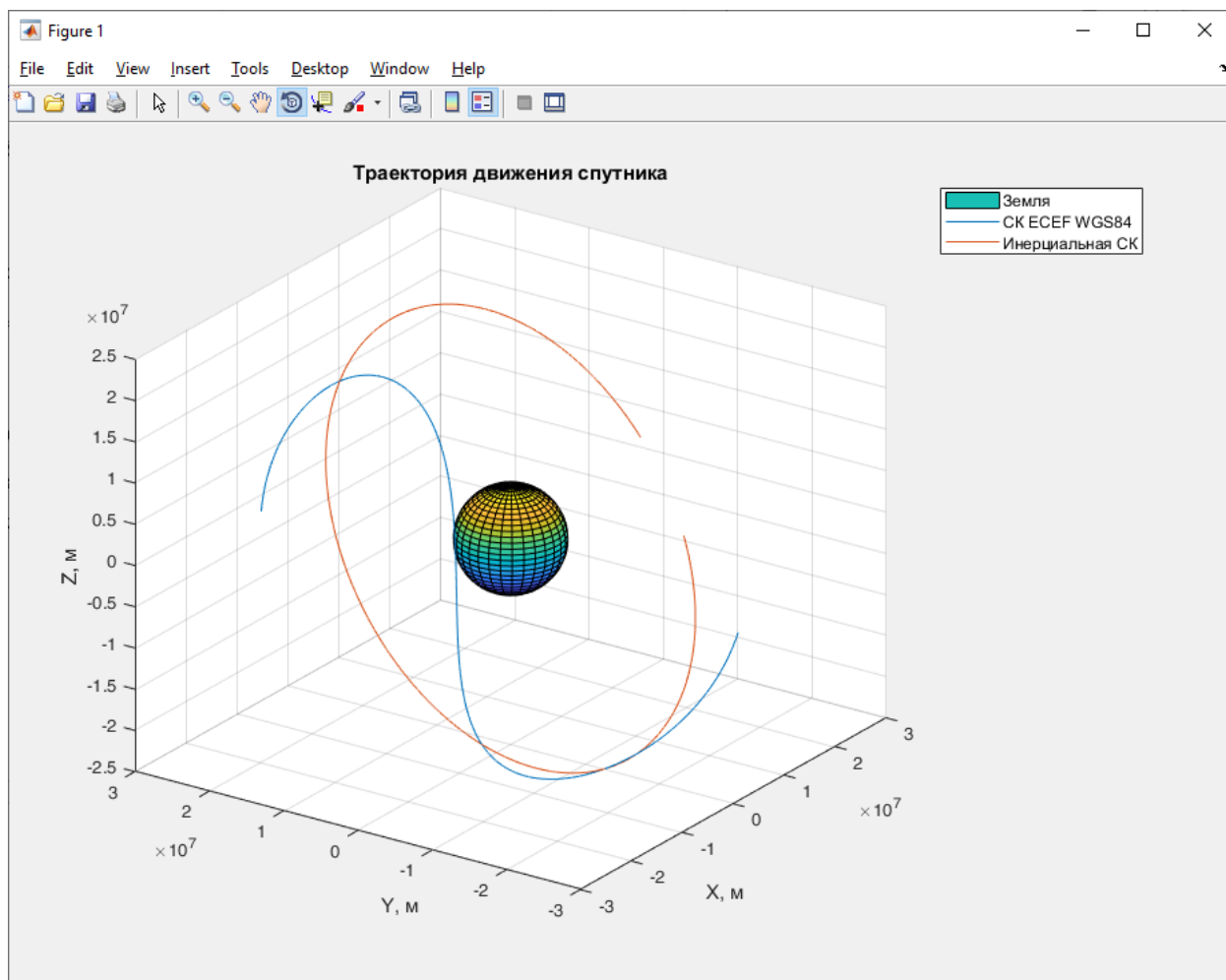


Рисунок 8 – Траектория движения спутника Beidou C20 в СК ECEF WGS84 и в инерциальной СК вокруг Земли.

2.4 Расчет SkyView

Для расчета SkyView необходимо перейти в локальную СК приемника ECEF WGS-84. Для этого воспользуемся сторонней функцией `llh2xyz()`, которая преобразует широту, долготу и высоту в декартовы координаты ECEF.

Расчетные координаты приемника:

$$X = 2846,341 \text{ км}$$

$$Y = 2200,173 \text{ км}$$

$$Z = 5249,655 \text{ км}$$

Далее пересчитаем локальные декартовы координаты в сферические, получив, тем самым азимут, угол места и расстояние. По этим данным построим графики SkyView и угла места и сравним их с данными Trimble GNSS Planning Online.

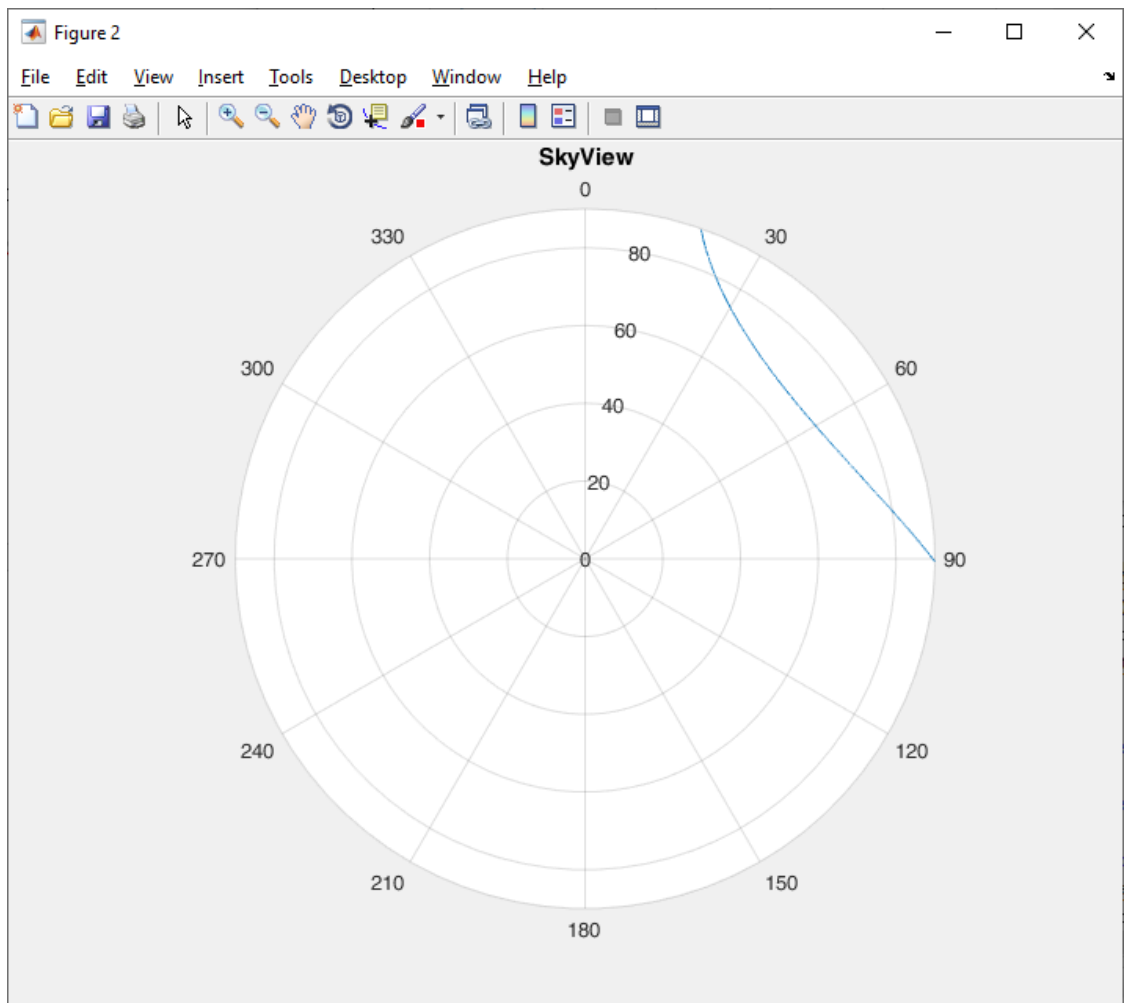


Рисунок 9 – График SkyView

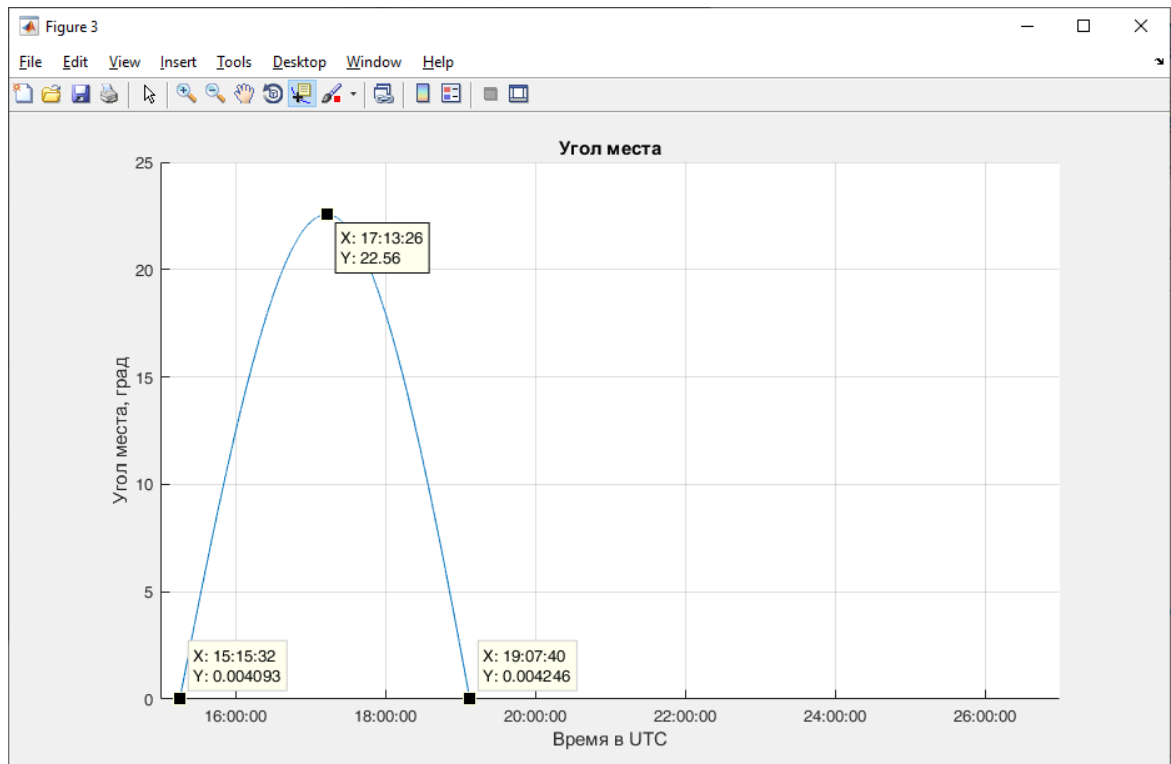


Рисунок 10 – График угла места

По моделированию SkyView и графика угла места видно, что спутник попал в зону видимости приемной антенны в 15:15:32 UTC и вышел из зоны – в 19:07:40 UTC. Данные результатов моделирования совпадают с данными Trimble GNSS Planning Online с погрешностью. Это объясняется тем, что использовались одни и те же эфемериды на весь интервал расчета, что приводит к такого рода погрешностям.

2.4 Заключение по результатам моделирования

На данном этапе была реализована на языке Matlab функция расчета положения спутника Beidou C20 на интервале времени с 18:00 МСК 16 февраля до 06:00 МСК 17 февраля. В качестве эфемерид использовались данные, полученные на предыдущем этапе.

Использовались одни и те же эфемериды на весь рассматриваемый интервал, что привело к погрешностям расчета. Для избежание погрешностей, необходимо обновлять эфемериды по мере их получения.

В результате моделирования были получены графики траекторий движения спутника Beidou C20 в системах координат ECEF WGS84 и соответствующей ей инерциальной СК. Графики SkyView и угла места от времени с учетом координат приемника.