

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МЭИ»**

**ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ**

**КАФЕДРА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

**по дисциплине**

**«АППАРАТУРА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ»**

**ФИО СТУДЕНТА: ТАСКАНОВ В.Е.**

**Группа: ЭР-15-16**

**ВАРИАНТ №: 13**

**Дата: \_\_\_\_\_**

**Подпись: \_\_\_\_\_**

**ФИО ПРЕПОДАВАТЕЛЯ: КОРОГОДИН И.В.**

**Оценка: \_\_\_\_\_**

**МОСКВА, 2021**

# СОДЕРЖАНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОРОННИХ СРЕДСТВ .....</b>   | <b>4</b>  |
| 1.1. Описание задания.....  | 4         |
| 1.2. Определение формы орбиты и положения спутника на ней с помощью сервиса CelesTrak.....                                | 6         |
| 1.3. Расчет графика угла места собственного спутника от времени по данным Trimble GNSS Planning Online .....              | 7         |
| 1.4. Расчет диаграммы угла места и азимута спутника (SkyView, он же SkyPlot) по данным Trimble GNSS Planning Online ..... | 9         |
| 1.5. Формирование списка и описание параметров, входящих в состав эфемерид .....  | 12        |
| 1.6. Формирование таблицы эфемерид собственного спутника ....   | 13        |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>   | <b>15</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) являются самыми точными системами по определению координат потребителя. Они стали важной частью в различных сферах нашей жизни. 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 юнит-тестирование в Check.

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

# ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОРОННИХ СРЕДСТВ

## 1.1. Описание задания

В задании дан номер спутника BEIDOU, в моем варианте – C24, а также бинарный и текстовый файл со значениями эфемерид для различных спутников, полученный от трехдиапазонной антенны Narxon 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.

Определим с помощью «Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения» [1] номер НОРАД<sup>1</sup> и сравним его с номером из «Википедии» [2]:

---

<sup>1</sup> НОРАД(SCN) - номер по спутниковому каталогу представляет собой уникальный пятизначный идентификационный номер искусственных спутников Земли.

| PRN | НОРАД | Тип КА | Тип системы | Дата запуска | Факт. сущ. (дней) | Примечание         |
|-----|-------|--------|-------------|--------------|-------------------|--------------------|
| C01 | 44231 | GEO-8  | BDS-2       | 17.05.19     | 653               | Используется по ЦН |
| C02 | 38953 | GEO-6  | BDS-2       | 25.10.12     | 3048              | Используется по ЦН |
| C03 | 41586 | GEO-7  | BDS-2       | 12.06.16     | 1722              | Используется по ЦН |
| C04 | 37210 | GEO-4  | BDS-2       | 01.11.10     | 3772              | Используется по ЦН |
| C05 | 38091 | GEO-5  | BDS-2       | 25.02.12     | 3291              | Используется по ЦН |
| C06 | 36828 | IGSO-1 | BDS-2       | 01.08.10     | 3864              | Используется по ЦН |
| C07 | 37256 | IGSO-2 | BDS-2       | 18.12.10     | 3725              | Используется по ЦН |
| C08 | 37384 | IGSO-3 | BDS-2       | 10.04.11     | 3612              | Используется по ЦН |
| C09 | 37763 | IGSO-4 | BDS-2       | 27.07.11     | 3504              | Используется по ЦН |
| C10 | 37948 | IGSO-5 | BDS-2       | 02.12.11     | 3376              | Используется по ЦН |
| C11 | 38250 | MEO-3  | BDS-2       | 30.04.12     | 3226              | Используется по ЦН |
| C12 | 38251 | MEO-4  | BDS-2       | 30.04.12     | 3226              | Используется по ЦН |
| C13 | 41434 | IGSO-6 | BDS-2       | 30.03.16     | 1796              | Используется по ЦН |
| C14 | 38775 | MEO-6  | BDS-2       | 19.09.12     | 3084              | Используется по ЦН |
| C16 | 43539 | IGSO-7 | BDS-2       | 10.07.18     | 964               | Используется по ЦН |
| C19 | 43001 | MEO-1  | BDS-3       | 05.11.17     | 1211              | Используется по ЦН |
| C20 | 43002 | MEO-2  | BDS-3       | 05.11.17     | 1211              | Используется по ЦН |
| C21 | 43208 | MEO-3  | BDS-3       | 12.02.18     | 1112              | Используется по ЦН |
| C22 | 43207 | MEO-4  | BDS-3       | 12.02.18     | 1112              | Используется по ЦН |
| C23 | 43581 | MEO-5  | BDS-3       | 29.07.18     | 945               | Используется по ЦН |
| C24 | 43582 | MEO-6  | BDS-3       | 29.07.18     | 945               | Используется по ЦН |

Рисунок 1 – Состав и состояние системы BEIDOU с «Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения»

| №  | Спутник         | PRN | Дата (UTC)        | Ракета     | NSSDC ID  | SCN   | Орбита                    | Статус      | Система  |
|----|-----------------|-----|-------------------|------------|-----------|-------|---------------------------|-------------|----------|
| 33 | Бэйдоу-3 M9     | C23 | 29.07.2018 01:48  | CZ-3B/YZ-1 | 2018-062A | 43581 | COO, ~21 500 км           | действующий | Бэйдоу-3 |
| 34 | Бэйдоу-3 M10    | C24 |                   |            | 2018-062B | 43582 | COO, ~21 500 км           | действующий |          |
| 35 | Бэйдоу-3 M11    | C26 | 24.08.2018, 23:37 | CZ-3B/YZ-1 | 2018-067A | 43602 | COO, ~21 500 км           | действующий |          |
| 36 | Бэйдоу-3 M12    | C25 |                   |            | 2018-067B | 43603 | COO, ~21 500 км           | действующий |          |
| 37 | Бэйдоу-3 M13    | C32 | 19.09.2018, 14:07 | CZ-3B/YZ-1 | 2018-072A | 43622 | COO, ~21 500 км           | действующий |          |
| 38 | Бэйдоу-3 M14    | C33 |                   |            | 2018-072B | 43623 | COO, ~21 500 км           | действующий |          |
| 39 | Бэйдоу-3 M15    | C35 | 15.10.2018, 04:23 | CZ-3B/YZ-1 | 2018-078A | 43647 | COO, ~21 500 км           | действующий |          |
| 40 | Бэйдоу-3 M16    | C34 |                   |            | 2018-078B | 43648 | COO, ~21 500 км           | действующий |          |
| 41 | Бэйдоу-3 G1Q    | C59 | 01.11.2018, 15:57 | CZ-3B/E    | 2018-085A | 43683 | ГСО, 144.5° в. д.         | действующий |          |
| 42 | Бэйдоу-3 M17    | C36 | 18.11.2018, 17:49 | CZ-3B/YZ-1 | 2018-093A | 43706 | COO, ~21 500 км           | действующий |          |
| 43 | Бэйдоу-3 M18    | C37 |                   |            | 2018-093B | 43707 | COO, ~21 500 км           | действующий |          |
| 44 | Бэйдоу-3 IGSO-1 | C38 | 20.04.2019, 14:41 | CZ-3B/G2   | 2019-023A | 44204 | Геосинхронная, накл. 55°; | действующий |          |

Рисунок 2 – Состав и состояние системы BEIDOU с сайта Википедия

Из рисунков 1-2 видно, что номер спутника совпадает и равен 43582, название спутника - «BEIDOU-3 M10»

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

Введем наше название спутника и сверим его по номеру NSSDC ID<sup>2</sup> и НОРАД (SCN).

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):

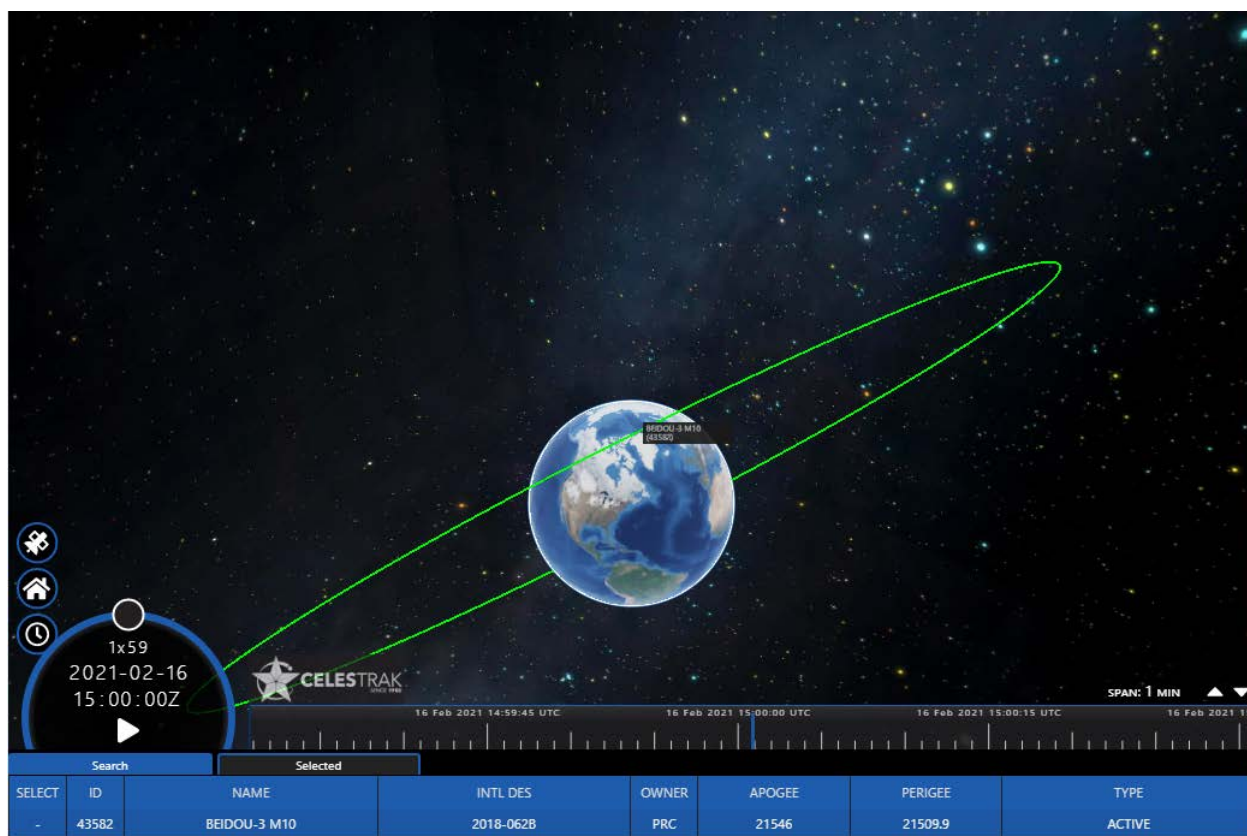


Рисунок 3 – Моделирование с помощью сервиса CelesTrak

---

<sup>2</sup> NSSDC ID - номер полёта представляет собой каталожный номер каждого летающего космического объекта, находящегося на орбите и зарегистрированного в COSPAR (Комитет по космическим исследованиям)

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

Настроим для моделирования GNSS Planning Online, координаты установим в соответствии с расположением антенны – и они будут соответствовать значению корпуса Е МЭИ, также начальное время будет соответствовать 18:00, временной пояс будет равен +3 (UTC +3) на всем этапе моделирования в сервисе GNSS Planning Online, высота выбирается из суммы высоты над уровнем моря (146 м) и примерной высотой здания (25 м) и округляется до сотен:

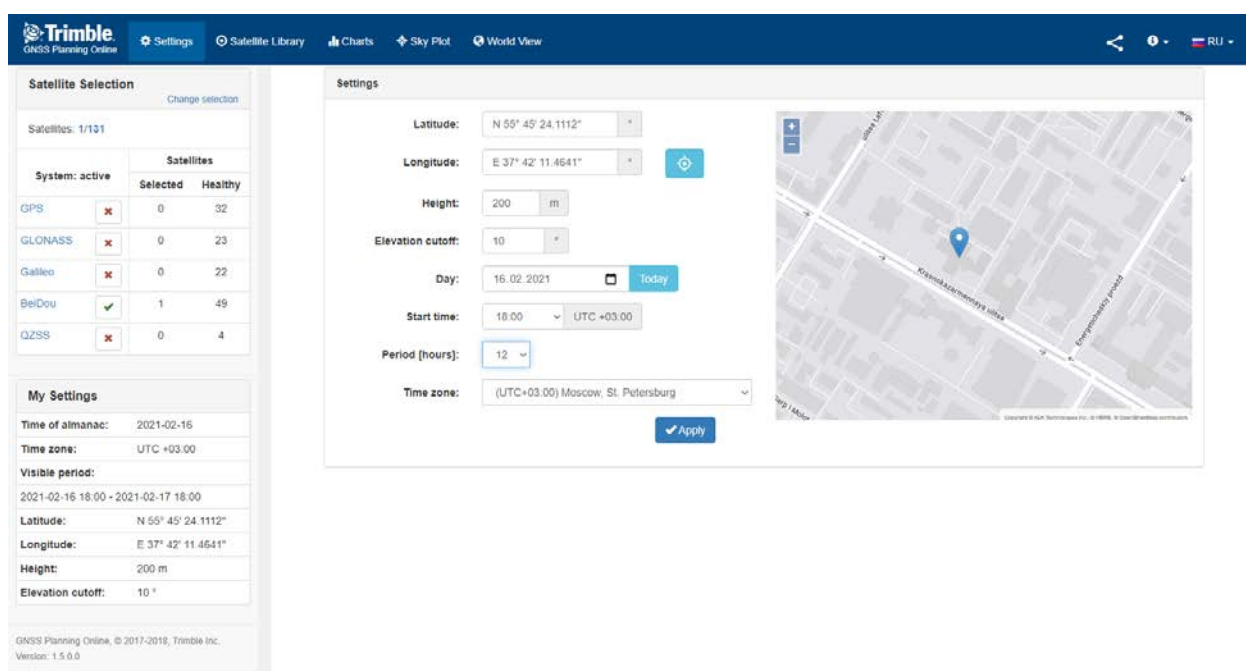


Рисунок 4 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

Далее ограничим количество отображаемых спутников и оставим в моделирование только нужны нам спутник – С24:

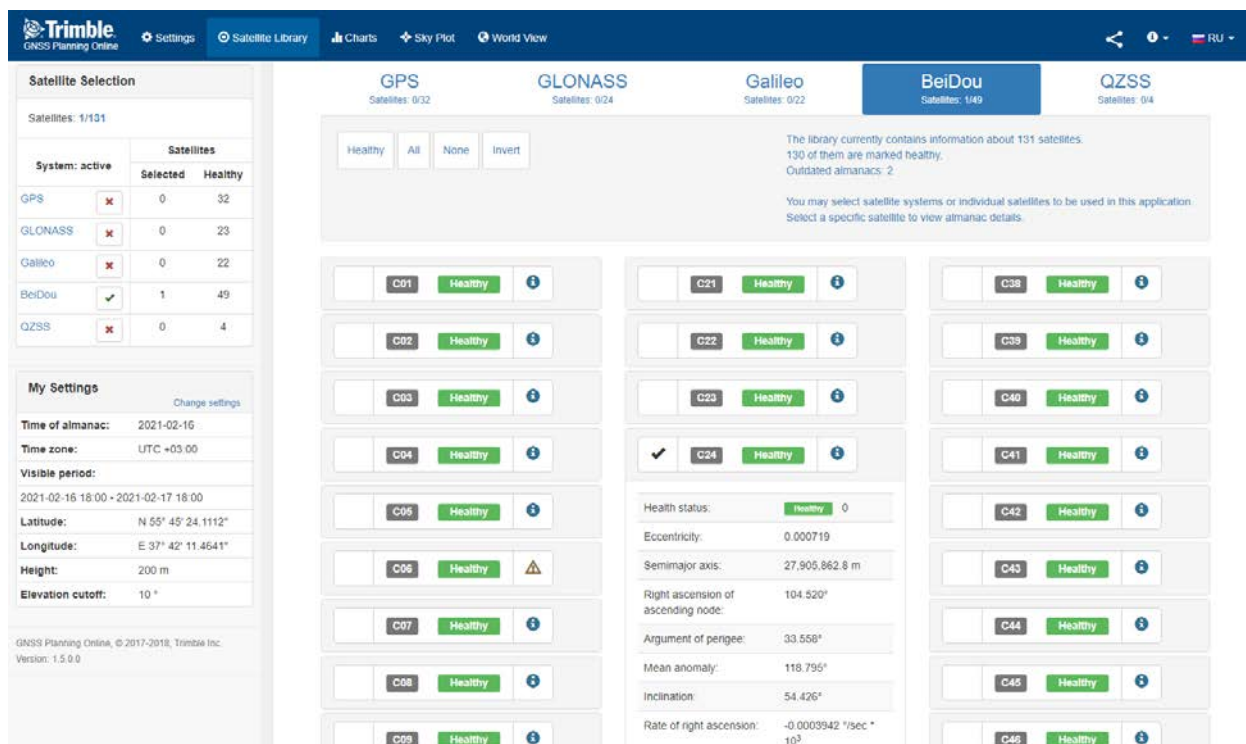


Рисунок 5 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning  
Получим график расчета угла места собственного спутника от времени:

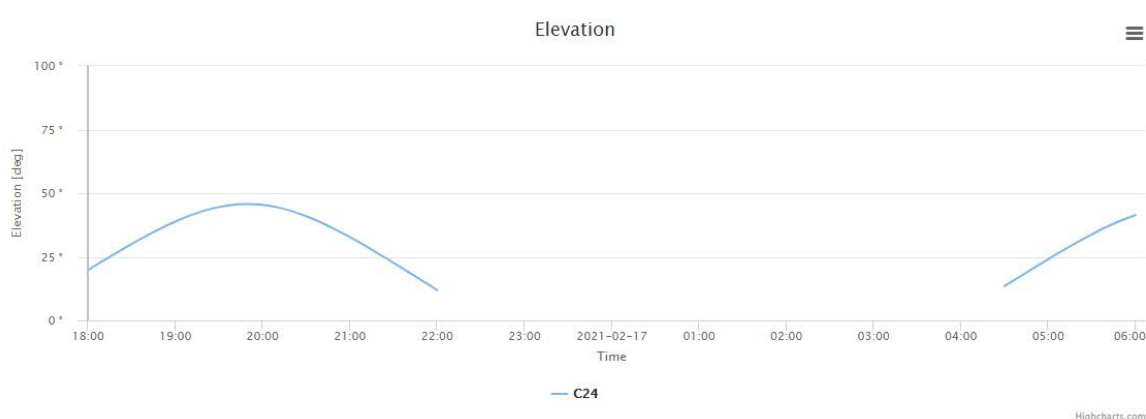


Рисунок 6 – График угла места собственного спутника от времени  
По графику видно, что на указанном в задании интервале с 18:00 – 06:00, спутник был в области видимости 2 раза - с 18:00 до 22:00 и с 4:30 до 6:00.



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

Так как сервис для определения Sky Plot используется тот же - Trimble GNSS Planning Online, то настройки оставим прежние, и проведем моделирование Sky Plot во временном интервале 18:00-06:00 и зафиксируем положение спутника на небосводе в критических точках, то есть когда он находился в области видимости - в 18:00, 22:00, 4:30 и 6:00.

Тогда получим 4-е графика моделирования:

- 16 февраля 2021 в 18:00:

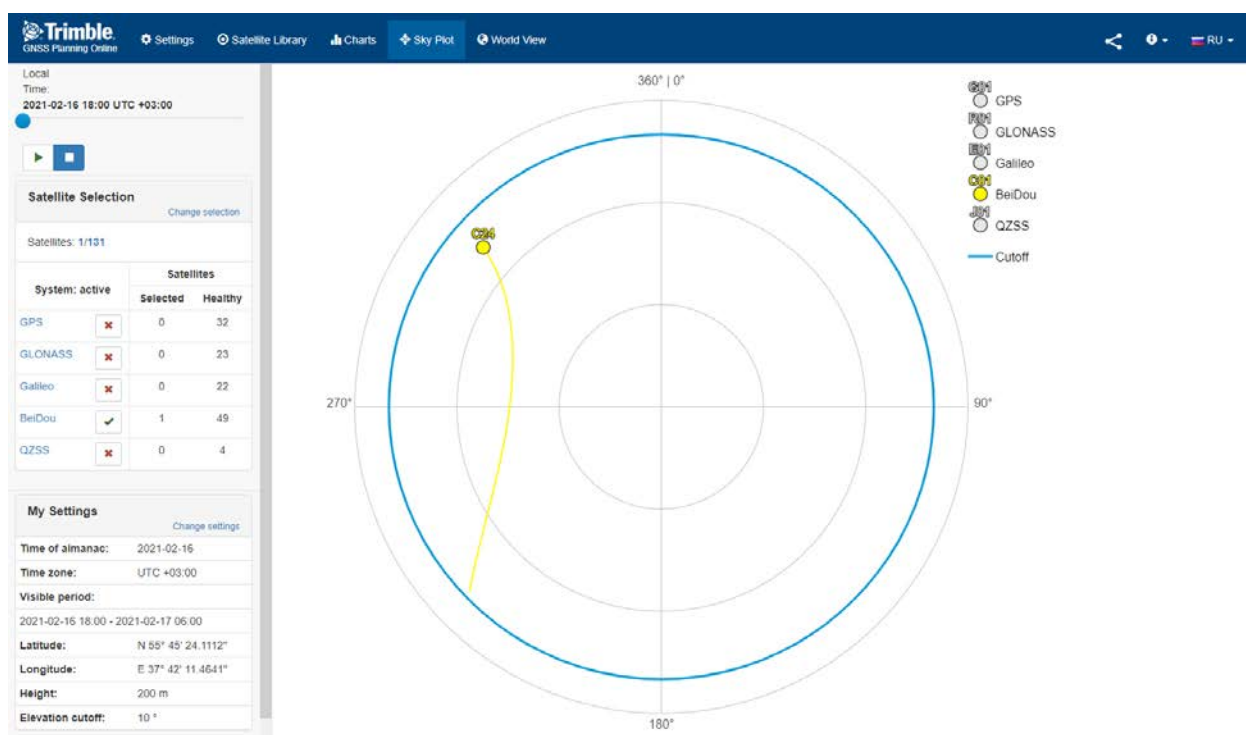


Рисунок 7 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

- 16 февраля 2021 в 22:00:

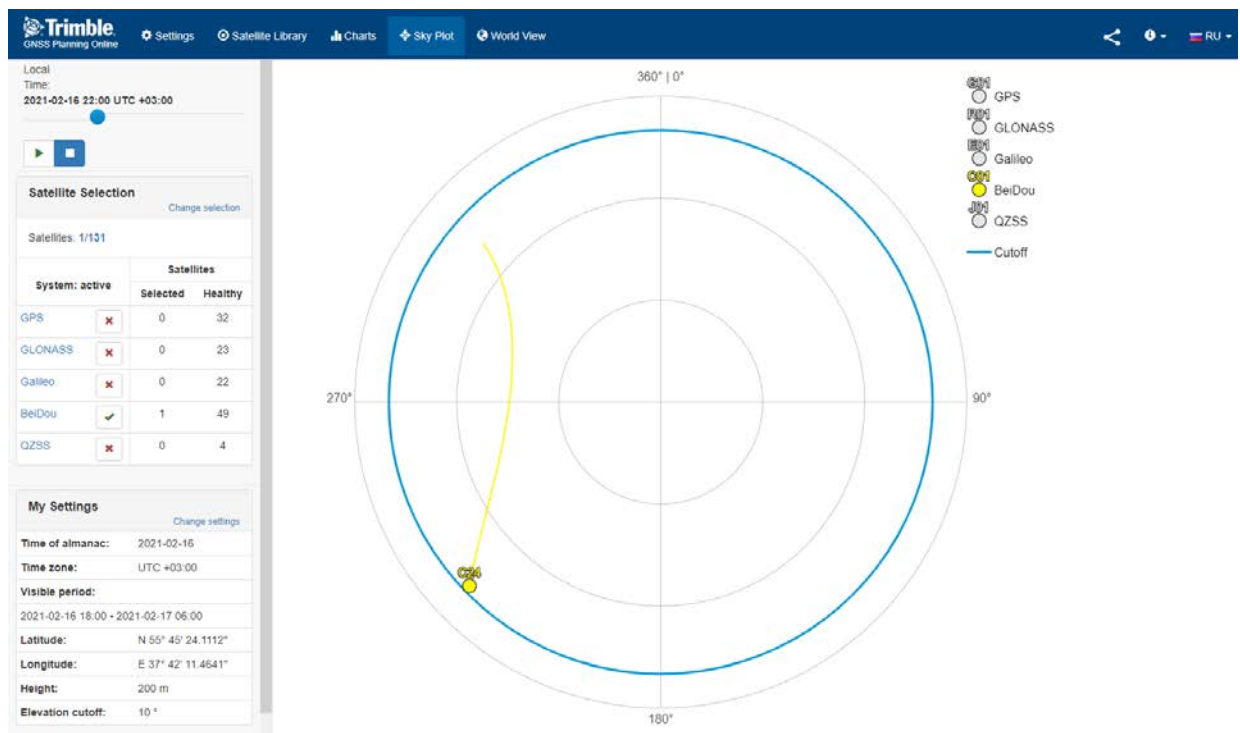


Рисунок 8 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

- 17 февраля 2021 в 4:30:

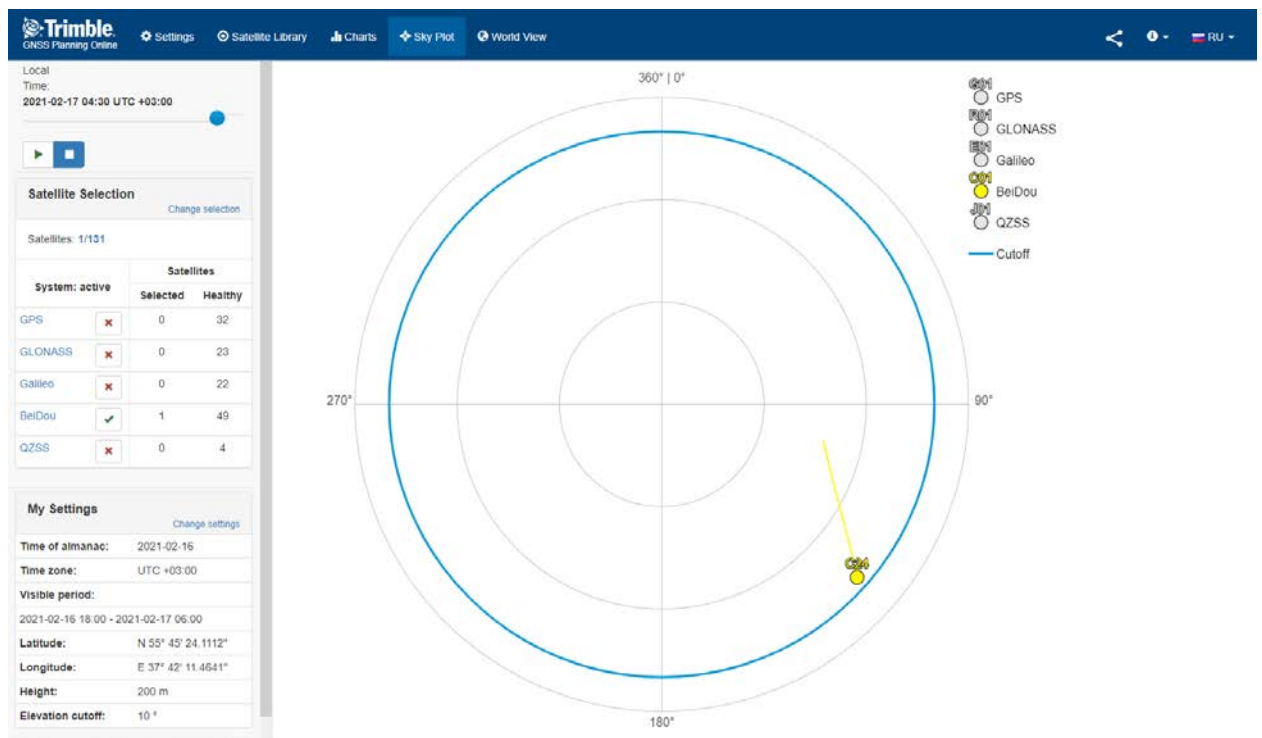


Рисунок 9 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

- 17 февраля 2021 в 6:00:

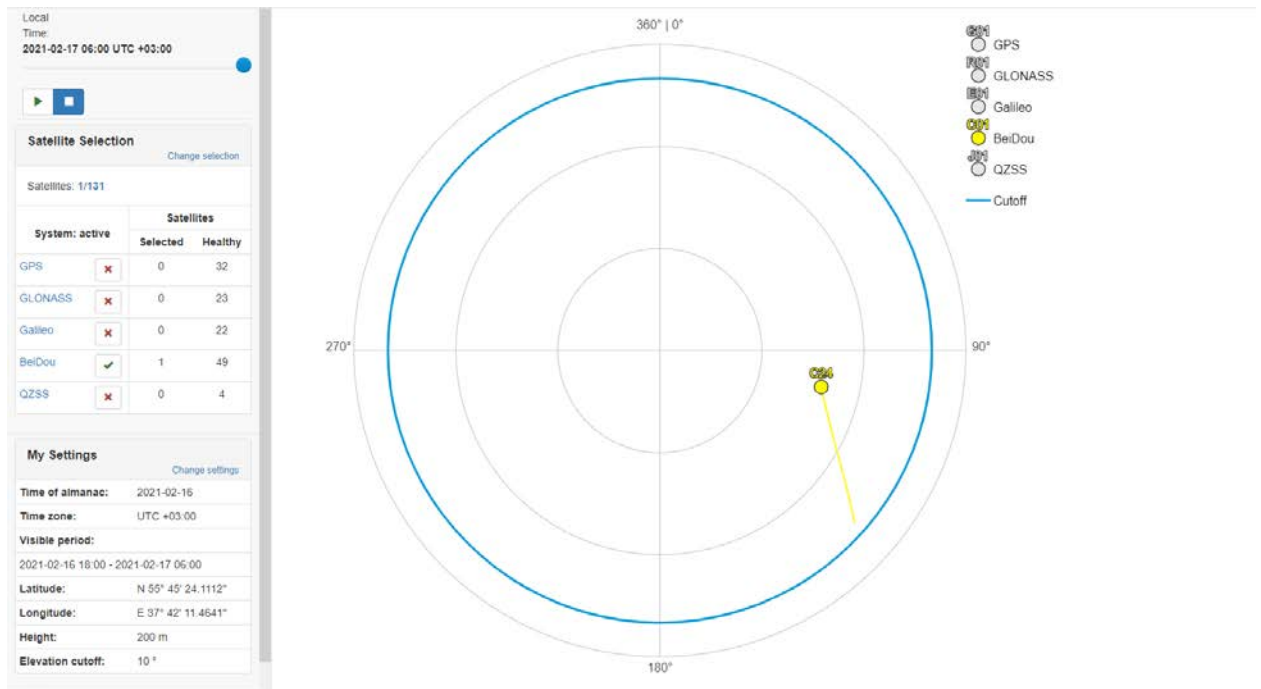


Рисунок 10 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

Для удобства наложим друг на друга полученные 4 графика - рисунок 7-10 и получим карту небосвода:

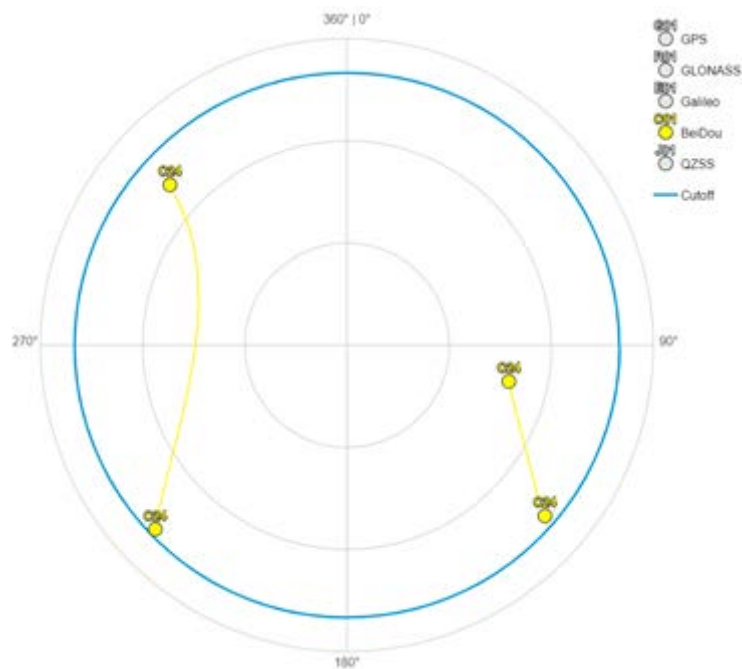


Рисунок 11 – Карта небосвода

1.5. 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                                      |

## 1.6. 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 C24

| Параметры                | Значение                 | Размерность        |
|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| SatNum                   | 24                       | -                  |
| toe, $t_{oe}$            | 273600000.000            | мс                 |
| Crs, $C_{rs}$            | 7.776562500000000000e+01 | м                  |
| Dn, $\Delta n$           | 4.03945410107353631e-12  | рад/мс             |
| M0, $M_0$                | 6.81925786249041765e-01  | рад                |
| Cuc, $C_{uc}$            | 3.90363857150077820e-06  | рад                |
| e                        | 7.21270451322197914e-04  | -                  |
| Cus, $C_{us}$            | 6.92019239068031311e-06  | рад                |
| sqrtA, $\sqrt{A}$        | 5.28261914062500000e+03  | м <sup>1/2</sup>   |
| Cic, $C_{ic}$            | -3.16649675369262695e-08 | рад                |
| Omega0, $\Omega_0$       | 1.82397473298889579e+00  | рад                |
| Cis, $C_{is}$            | -2.09547579288482666e-08 | рад                |
| i0, $i_0$                | 9.49933076182709835e-01  | рад                |
| Crc, $C_{rs}$            | 2.14812500000000000e+02  | м                  |
| omega, $\omega$          | 5.73989896823145385e-01  | рад                |
| OmegaDot, $\dot{\Omega}$ | -7.02029242335824152e-12 | рад/мс             |
| iDot, $\dot{I}$          | 2.81797452280710840e-13  | рад/мс             |
| Tgd, $T_{GD}$            | 7.00000000000000000e+04  | мс                 |
| toc, $t_{oc}$            | 2.73600000000000000e+08  | мс                 |
| af2, $a_{f2}$            | 0.00000000000000000e+00  | мс/мс <sup>2</sup> |

|               |                          |       |
|---------------|--------------------------|-------|
| af1, $a_{f1}$ | -7.99094124204202672e-12 | MC/MC |
| af0, $a_{f0}$ | -7.62200236320495605e-01 | MC    |
| URA           | 0                        | -     |
| IODE          | 514                      | -     |
| IODC          | 2                        | -     |
| codeL2        | 0                        | -     |
| L2P           | 0                        | -     |
| WN            | 789                      | -     |

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- [1]. Электронный ресурс: «Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения «[www.glonass-iac.ru](http://www.glonass-iac.ru)»»
- [2]. Электронный ресурс: «Википедия. Свободная энциклопедия «<https://ru.wikipedia.org/wiki/Бэйдоу>»»
- [3]. Электронный ресурс: «<https://www.celestrak.com>»
- [4]. Электронный ресурс: «<https://www.gnssplanningonline.com/>»