**Национальный исследовательский университет**

**«МЭИ»**

**Институт радиотехники и электроники**

**Кафедра радиотехнических систем**

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине

Аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем

ФИО студента: Жеребин В.Р.

Группа: ЭР-15-15

Вариант №:5

Дата:­ ­

Подпись:­ ­

ФИО преподавателя: Корогодин И.В.

Оценка: ­ ­

Москва, 2020

Содержание

[Введение 3](#_Toc41674118)

[1 Использование сторонних средств 3](#_Toc41674119)

[1.1 Описание процесса использования RTKLIB 3](#_Toc41674120)

[1.2 Получение графика угла места и SkyView с помощью Trimble GNSS Planning 8](#_Toc41674121)

[2 Моделирование 11](#_Toc41674122)

[2.1 Алгоритм расчета положения спутника ГЛОНАСС 11](#_Toc41674123)

[2.2 Результаты моделирования положения спутника ГЛОНАСС 14](#_Toc41674124)

[2.3 Построение SkyView 14](#_Toc41674125)

[2.4 Заключение по результатам моделирования 16](#_Toc41674126)

[3 Реализация 17](#_Toc41674127)

[3.1 Особенности реализации 17](#_Toc41674128)

[3.2 Тестирование 17](#_Toc41674129)

[3.3 Проверка памяти 18](#_Toc41674130)

[3.4 Заключение по результатам реализации 20](#_Toc41674131)

[4 Заключение 20](#_Toc41674132)

**Введение**

Название проекта: Разработка модуля расчёта координат спутника ГЛОНАСС.

Техническая цель - добавление в программное обеспечение приемника функции расчета положения спутника ГЛОНАСС на заданное время по данным его эфемерид.

Конечная цель проекта - получить библиотечные функции на С++, позволяющие рассчитывать положение спутника ГЛОНАСС по эфемеридам.

Для достижения цели выполняется ряд задач:

* обработка данных от приемника ГНСС в RTKLIB для проверки входных данных и формирования проверочных значений;
* обработка данных и моделирование в Matlab/Python для эскизного проектирования модуля;
* реализация программного модуля на С/С++, включая юнит-тестирование в Check.

Требования:

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

Курсовой проект разбит на три этапа, отличающиеся осваиваемыми инструментами.

**1 Использование сторонних средств**

**1.1 Описание процесса использования RTKLIB**

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 Lexon LGDD,
* SwiftNavigation Piksi Multi,
* Clonicus разработки ЛНС МЭИ.

Приемники осуществляют первичную обработку сигналов, выдавая по интерфейсам соответствующие потоки данных - наблюдения псевдодальностей и эфемериды спутников.

Необходимо обрабатывать данные от приемника Clonicus, представленные в бинарном виде в формате NVS BINR. Для этого воспользуемся пакетом RTKLIB, в состав которого входит парсер формата NVS BINR и удобные средства отображения данных.

При запуске программы RTKLIB получаем следующее окно (Рисунок 1):



Рисунок 1 – Окно программы RTKLIB v.2.4.2

В окне программы RTKLIB выбираем RTKCONV (Рисунок 2), чтобы конвертировать бинарный файл BINR.bin в текстовый формат NVS BINR.

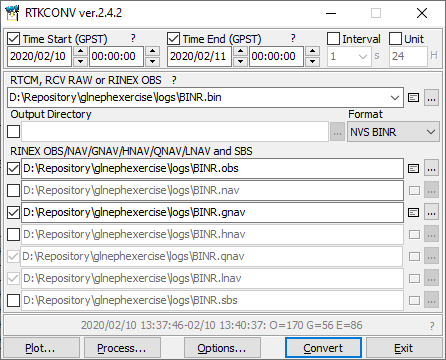


Рисунок 2 – Окно программы RTKCONV ver.2.4.2

В открывшемся окне выбираем Time Start (GPST), Time End (GPST), и ставим время интервала наблюдений с 00:00 10.02.20 до 00:00 11.02.20. В меню «Options» (Рисунок 3) выбираем спутниковую систему ГЛОНАСС и указываем в поле «Excluded Satellite» следующее: R3, R4, R11, R12, R13, R14, R21, R22, R23, тем самым исключая данные спутники из обработки. В первой строке RTKCONV указываем путь на файл бинарного потока .bin, указываем формат NVS BINR, и ставим галочки для конвертации файлов в форматы .obs и .gnav.

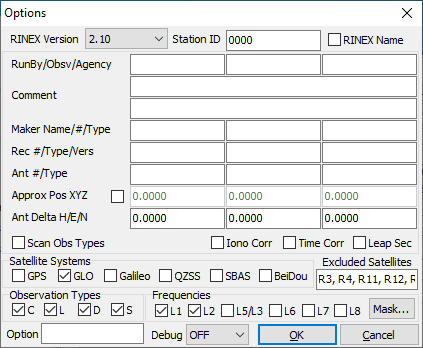


Рисунок 3 – Окно настроек программы RTKCONV ver.2.4.2

Затем нажимаем на кнопку «Convert» и получаем необходимые файлы. Для того, чтобы посмотреть содержимое открываем файл с расширением «gnav» и получаем эфемериды собственного спутника в gnav-файле RINEX (Рисунок 4).

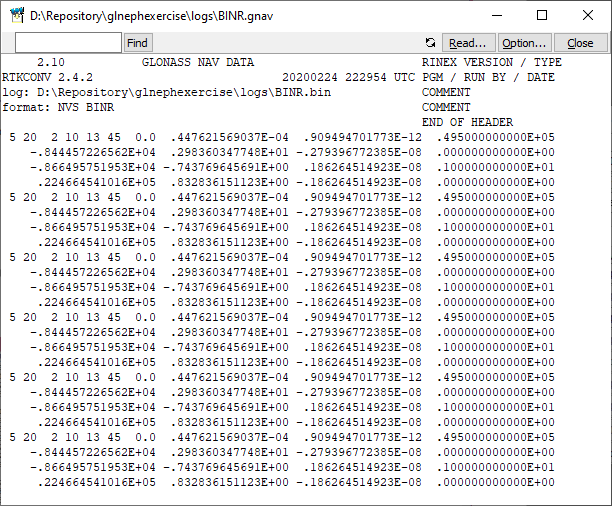


Рисунок 4 – Эфемериды спутника ГЛОНАСС №5 в .gnav файле

После чего нажимаем «Process…», запускается программа RTKPOST (Рисунок 5) для решения навигационной задачи. Аналогичным образом выбираем Time Start (GPST), Time End (GPST), и ставим время интервала наблюдений с 00:00 10.02.20 до 00:00 11.02.20, указываем путь к файлам наблюдений форматов .obs и .gnav.

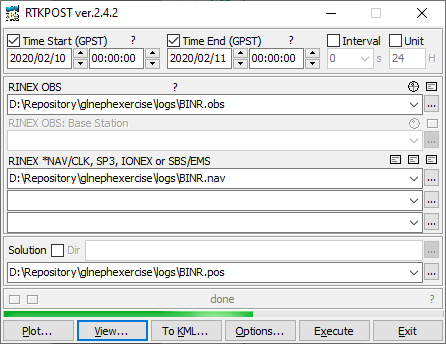


Рисунок 5 – Окно программы RTKPOST ver.2.4.2

После нажатия кнопки «Execute» программа производит вторичную обработку, результаты которой записываются в файл с расширением .pos. Нажатие кнопки «Plot..» открывает программу RTKPLOT, в которой можно увидеть графическое отображение некоторых значений, к примеру отношение сигнал/шум и угла места (Рисунок 6):

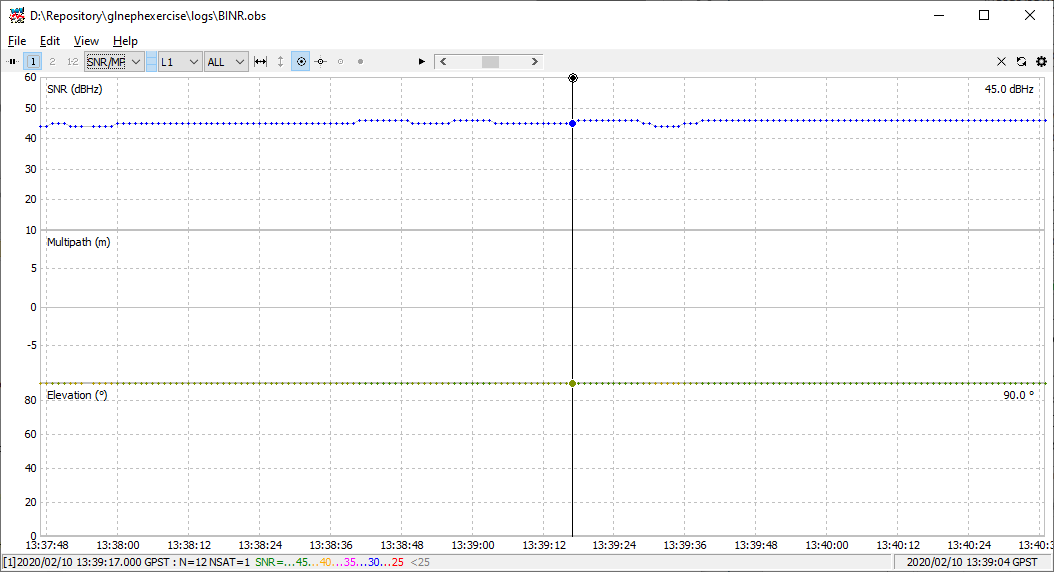


Рисунок 6 – Графики для спутника ГЛОНАСС №5

Теперь получим эфемериды спутника по данным RTKNAVI из состава RTKLIB. Программа RTKNAVI позволяет вывести таблицу текущих и предыдущих эфемерид (Рисунок 7).

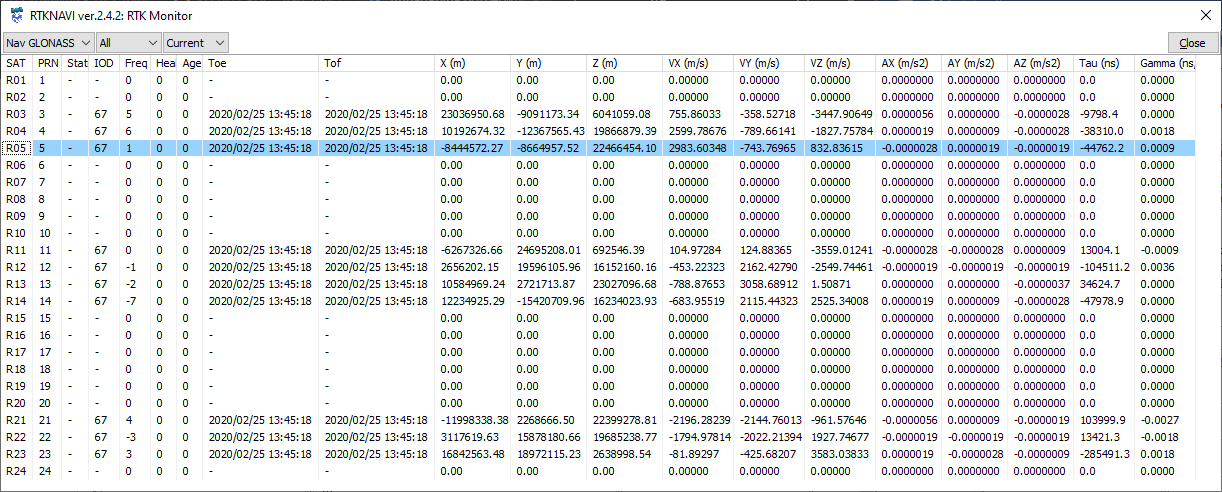


Рисунок 7 – Окно программы RTKNAVI ver.2.4.2: RTK Monitor

Синий линей выделена строка, соответствующая спутнику ГЛОНАСС №5. Значения, полученные из этой таблицы, будут нужны в следующих этапах.

**1.2 Получение графика угла места и SkyView с помощью Trimble GNSS Planning**

Необходимо построить график угла места от времени и SkyView собственного спутника на заданный интервал времени. Для этого воспользуемся интернет ресурсом Trimble GNSS Planning (<https://www.gnssplanning.com>). Во вкладке настроек (Settings) указываем координаты и время места преступления (Рисунок 8). Во вкладке библиотеки спутников (Satellite Library) отключаем отображение всех спутников, кроме заданного (Рисунок 9).

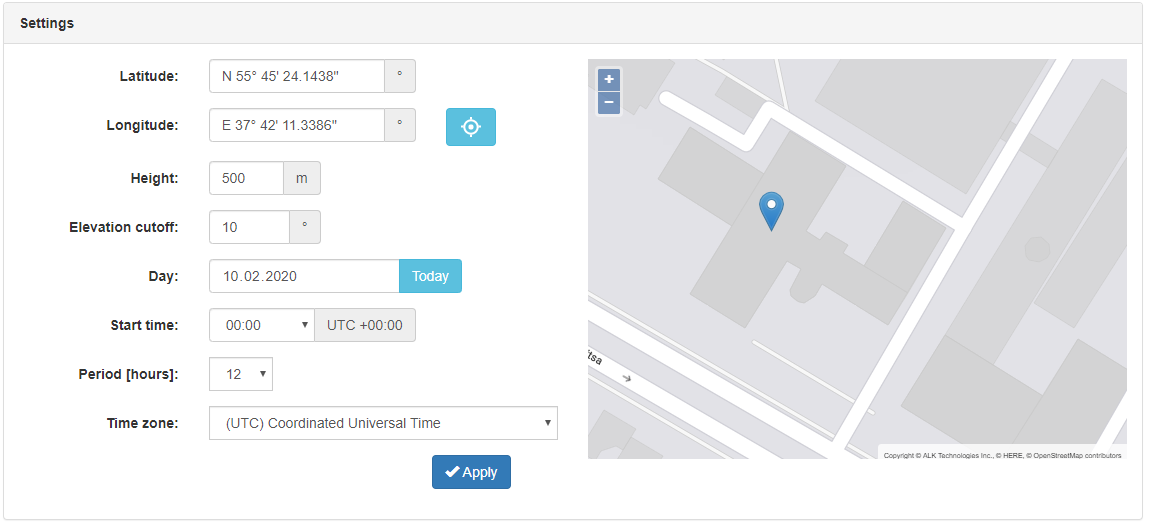


Рисунок 8 – Вкладка настроек (Settings) интернет ресурса Trimble GNSS Planning

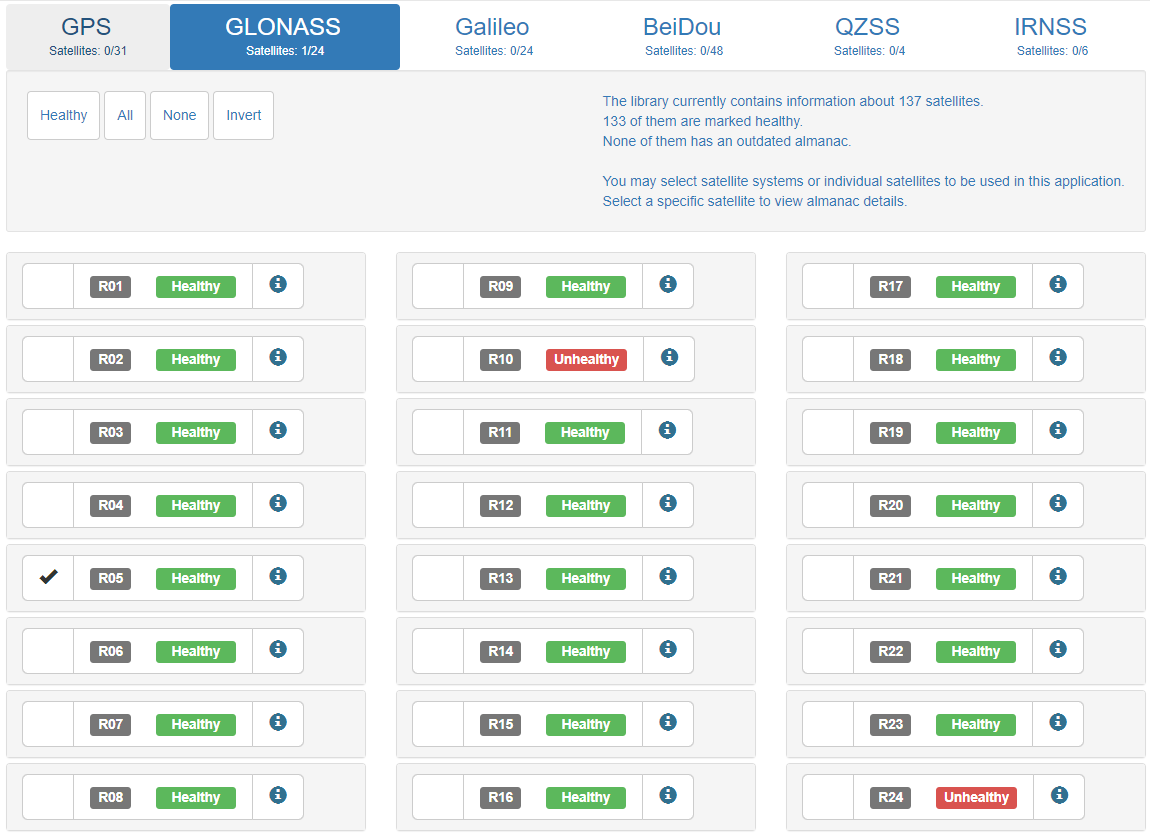


Рисунок 9 – Вкладка библиотека спутников (Satellite Library) интернет ресурса Trimble GNSS Planning

Для получения графика угла места, переходим во вкладку графики (Charts). По полученным данным, спутник был виден 2 раза (Рисунок 10). Первое появление с 13:40 до 15:30, второе с 22:20. Время указано по UTC +00:00.

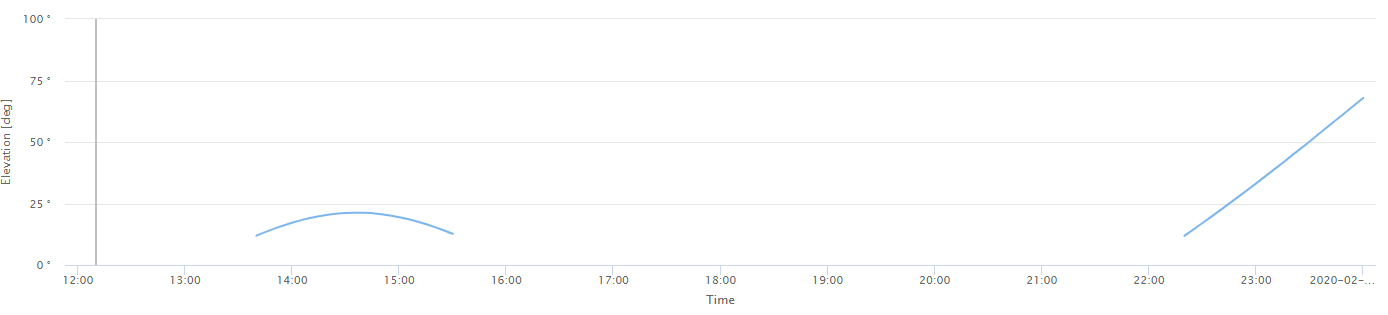


Рисунок 10 – График угла места спутника ГЛОНАСС №5

Соответственно, перейдя во вкладку «Sky Plot», получаем карту небосвода (SkyView) (Рисунок 11). Траектория движения спутника, располагающаяся во второй четверти SkyView, соответствует первому появлению спутника, а в третей четверти, соответственно, второму.

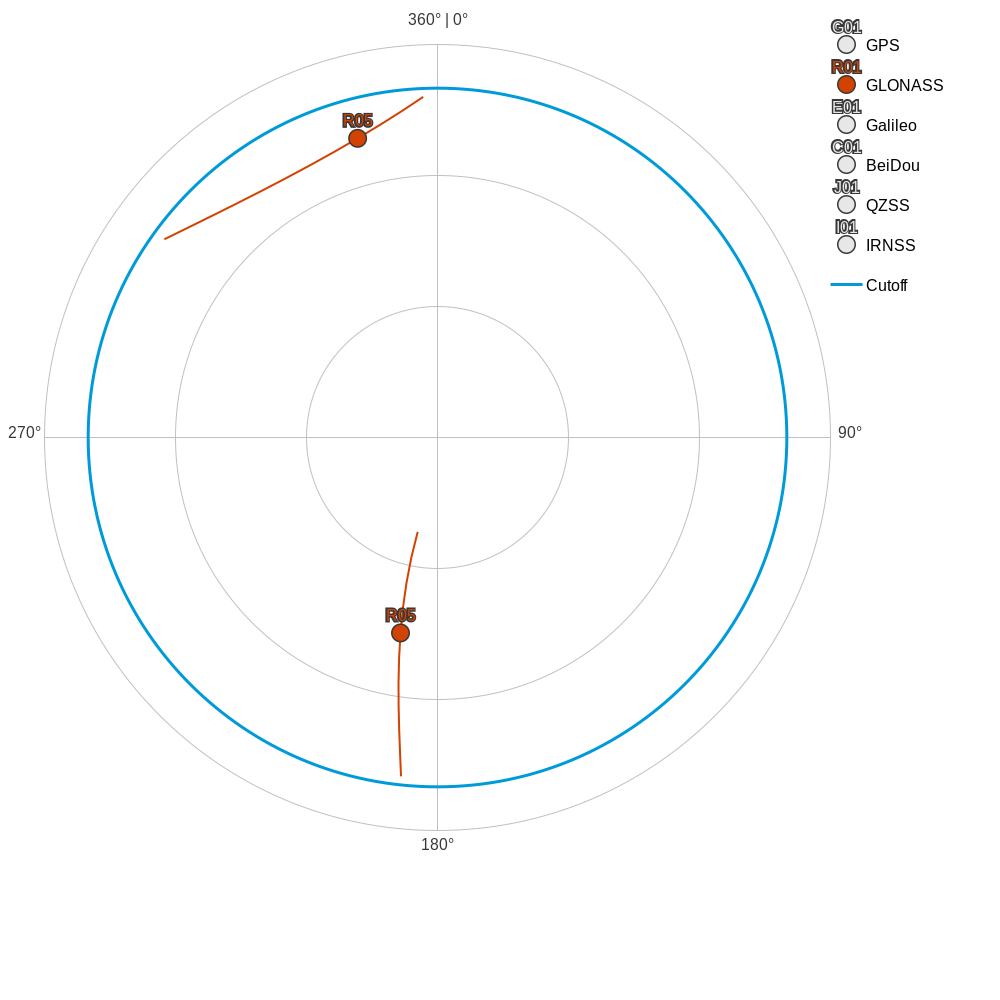


Рисунок 11 – SkyView спутника ГЛОНАСС №5

**1.3 Заключение по результатам использования сторонних средств**

В результате использования пакета RTKLIB и интернет-ресурса Trimble GNSS Planning Online, были получены следующие результаты:

* Эфемериды собственного спутника по данным RTKNAVI из состава RTKLIB;
* Эфемериды собственного спутника в gnav-файле RINEX;
* График угла места от времени и SkyView собственного спутника по данным Trimble GNSS Planning Online на заданный интервал времени;
* Обработаны данные от приемника ГНСС в RTKLIB для проверки входных данных и формирования проверочных значений.

**2 Моделирование**

На предыдущем этапе получено решение навигационной задачи с помощью программы вторичной обработки измерений – RTKLIB. В процессе работы она рассчитывает положение спутников на соответствующий момент сигнального времени. При этом используются эфемериды - параметры некоторой модели движения спутника. В разных ГНСС эти модели разные, а значит отличается и формат эфемерид, и алгоритмы расчета положения спутника.

Требуется реализовать на языке Matlab или Python функцию расчета положения спутника ГЛОНАСС на заданный момент по шкале времени UTC. В качестве эфемерид использовать данные, полученные на предыдущем этапе.

Для расчета положения спутника ГЛОНАСС по эфемеридным данным системы проводят численное интегрирование дифференциального уравнения.

Эфемериды спутника ГЛОНАСС, полученные на предыдущем этапе, сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Эфемериды спутника ГЛОНАСС №5

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Параметр | Размерность | Значение |
| Toe/Tof | год/месяц/день час:минута:секунда | 2020/02/10  13:45:18 |
|  | м | -8444572.27 |
|  | -8664957.52 |
|  | 22466454.10 |
|  | м/с | 2983.60348 |
|  | -743.76965 |
|  | 832.83615 |
|  | м/с2 | -0.0000028 |
|  | 0.0000019 |
|  | -0.0000019 |

**2.1 Алгоритм расчета положения спутника ГЛОНАСС**

Необходимо построить трехмерные графики множества положений спутника №5 ГЛОНАСС. Графики в двух вариантах: в СК ECEF ПЗ-90.11 и соответствующей ей инерциальной СК. Положения должны соответствовать временному интервалу с 12:00 10.02.20 до 00:00 11.02.20. Допускается использовать одни и те же эфемериды на весь рассматриваемый интервал.

В ИКД ГЛОНАСС приведены три алгоритма расчета положения спутника на заданным момент времени шкалы МДВ по данным эфемерид:

* точный алгоритм (точный расчет на 30-минутном интервале);
* упрощенный алгоритм (более простой расчет на 30-минутном интервале);
* долговременный алгоритм (точный расчет на 4-часовом интервале).

Так как, допускается использовать одни и те же эфемериды на весь рассматриваемый интервал, то будем использовать точный алгоритм.

Эфемериды передаются в шкале времени UTC, а алгоритм использует шкалу МДВ, следовательно необходимо перевести время эфемерид в МДВ, добавив +3 часа.

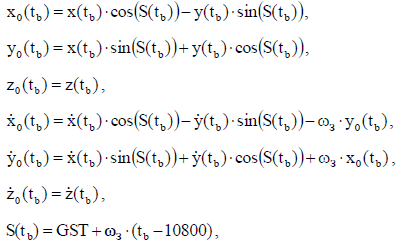
Исходные данные, необходимые для пересчета эфемерид в соответствии с точным алгоритмом:

* N4 – номер эфемеридного четырехлетнего периода;
* NТ – номер эфемеридных суток в эфемеридном четырехлетнем периоде;
* момент времени из оперативной информации ГЛОНАСС;
* координаты и составляющие вектора скорости центра масс НКА на момент времени из оперативной информации ГЛОНАСС;
* заданный момент времени шкалы МДВ, на который необходимо пересчитать координаты и составляющие вектора скорости НКА.

Пересчет эфемерид потребителем с момента шкалы МДВ на заданный момент времени той же шкалы проводится методом численного интегрирования дифференциальных уравнений движения центра масс НКА. Эти уравнения движения определены в виде следующей системы:

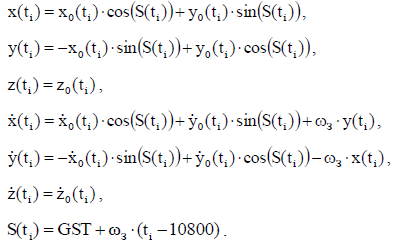


Начальными условиями для интегрирования системы являются координаты центра масс НКА , , и составляющие его вектора скорости , , в инерциальной геоцентрической системе координат OX0Y0Z0 на момент шкалы МДВ. Эти начальные условия вычисляются путем пересчета передаваемых в навигационном сообщении координат , , и составляющих вектора скорости , , центра масс НКА в связанной с Землей системе координат ПЗ-90. Пересчет осуществляется по следующим формулам:



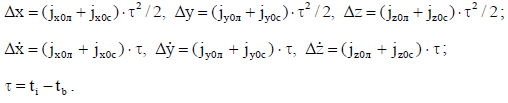
Интегрирование осуществляется численным методом, например, методом Рунге- Кутта 4-го порядка.

После интегрирования, полученные в инерциальной системе координат OX0Y0Z0 координаты центра масс , , и составляющие его вектора скорости , , могут быть пересчитаны в связанную с Землей систему ПЗ-90 Oxyz по формулам:



В данном расчете используются следующие примечания:

* Ускорения солнечно-лунных гравитационных возмущений могут быть исключены из системы уравнений с последующим добавлением к результатам интегрирования поправок:



* Вместо истинного звездного времени по Гринвичу GST, в формулах допускается использовать среднее звездное время по Гринвичу GMST.

**2.2 Результаты моделирования положения спутника ГЛОНАСС**

Алгоритм реализован на языке MATLAB, листинг программы приведен в приложении.

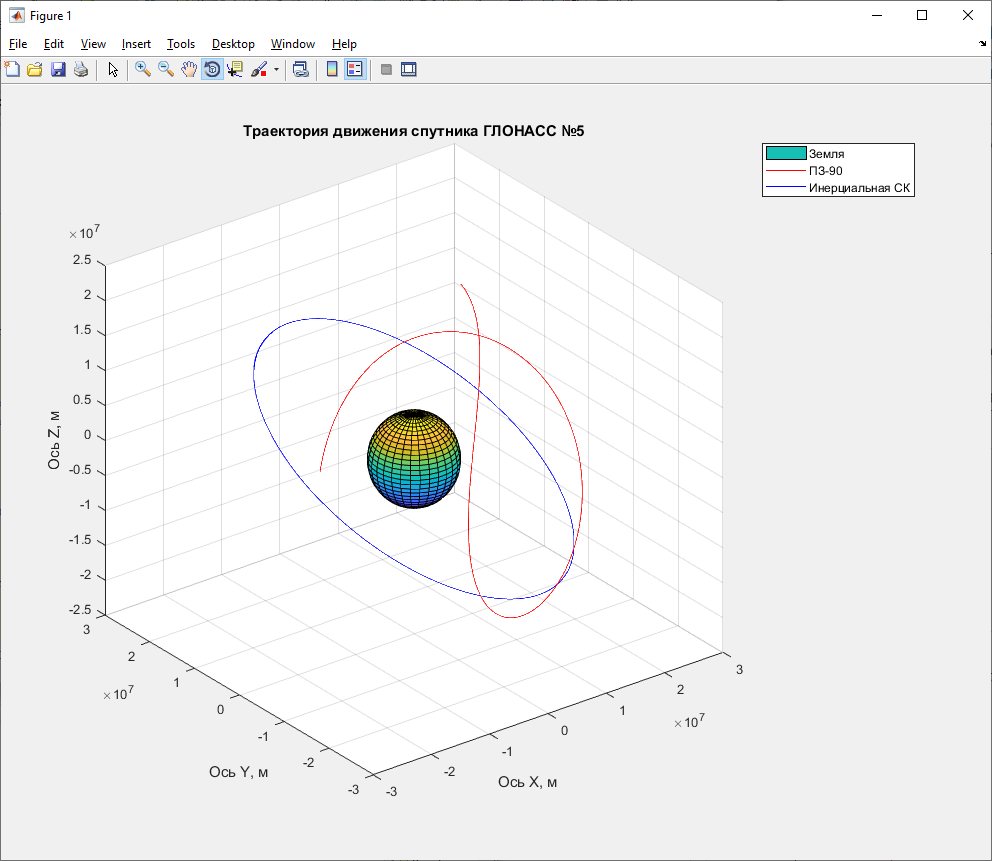


Рисунок 12 – Траектория движения спутника ГЛОНАСС №5 в системе координат ПЗ-90 (красная линия) и в инерциальной системе координат (синяя линия)

**2.3 Построение SkyView**

Необходимо построить SkyView за указанный временной интервал и сравнить результат с Trimble GNSS Planning Online, полученный на прошлом этапе.

Для построения SkyView перейдем в локальную систему координат приемника WGS-84. Координаты приемника в WGS-84:

*м*

*м*

*м*

Следующим шагом, пересчитаем локальные декартовы координаты в сферические, тем самым получив азимут и угол места. По полученным углам построим графики в полярной системе координат (рисунок 13) и график зависимости угла места от времени (рисунок 14).

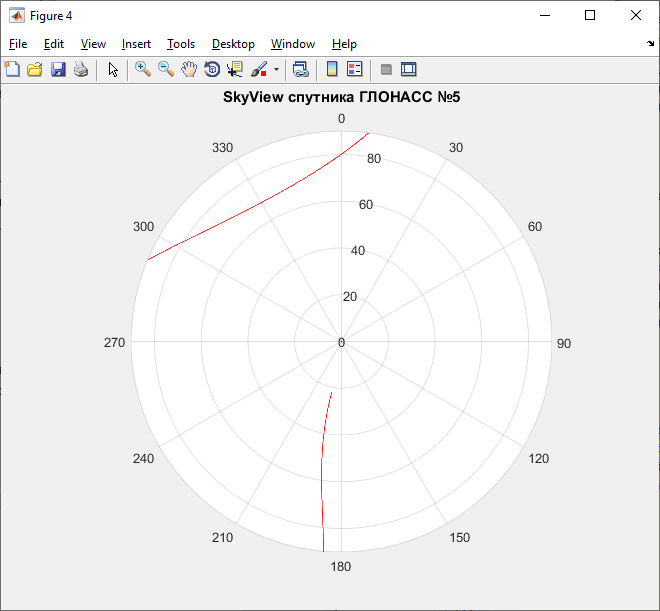


Рисунок 13 – SkyView спутника ГЛОНАСС №5

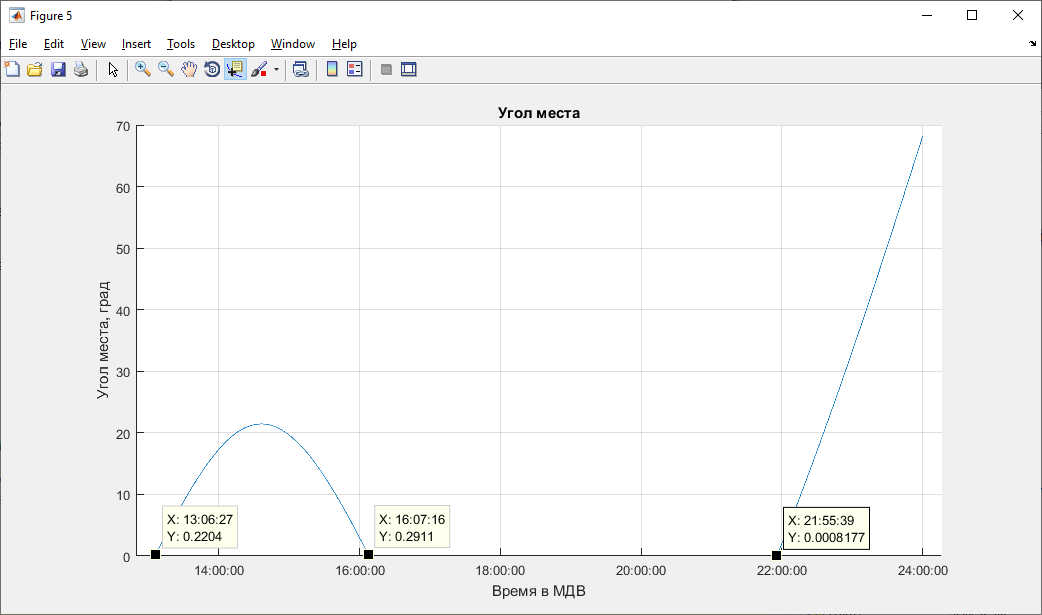


Рисунок 14 – График угла места спутника ГЛОНАСС №5

По SkyView и графику угла места видно, что спутник появлялся в зоне видимости приемника два раза, в первый раз с 13:06:27 по 16:07:16, и второй раз с 21:55:39 и до конца суток. Данные результаты совпадают данными сервиса Trimble GNSS Planning Online, полученными на предыдущем этапе, с существенной погрешностью. Объясняется это тем, что выбранный алгоритм осуществляет точный расчет только на 30 интервале времени.

**2.4** **Заключение по результатам моделирования**

На данном этапе была реализована на языке Matlab функция расчета положения спутника ГЛОНАСС №5 на временном интервале с 12:00 10.02.20 до 00:00 11.02.20 по шкале времени UTC. В качестве эфемерид использовались данные, полученные на предыдущем этапе. Использовались одни и те же эфемериды на весь рассматриваемый интервал.

В результате были получены графики траекторий движения спутника ГЛОНАСС №5 в системах координат: ПЗ-90 и инерциальной, и SkyView с графиком угла места для точки, в которой находился приемник.

Точный алгоритм дает существенную погрешность при расчете на интервале времени более чем ±15 минут. Таким образом, выбранный алгоритм можно применять при постоянном получении новый эфемерид. Для прогноза на большой интервал (превышающий 15 минут) времени лучше использовать долговременный алгоритм.

**3 Реализация**

Требуется разработать на языке С/С++ функцию расчета положения спутника ГЛОНАСС на заданное время по шкале UTC, минимизируя время её исполнения и количество затрачиваемой оперативной памяти. Вызов функции не должен приводить к выбросу исключений или утечкам памяти при любом наборе входных данных. Допускается использовать одни и те же эфемериды на весь рассматриваемый интервал.

Программный модуль должен сопровождаться unit-тестами:

* Тесты функции реализации метода Рунге-Кутты
* Тест расчетного положения спутника в сравнении с Matlab с шагом 0.1 секунды.

Во время второго теста должно вычисляться и выводиться средняя длительность исполнения функции.

Требуется провести проверку на утечки памяти.

**3.1 Особенности реализации**

Функция расчета положения спутника в Matlab относительно проста, т.к. доступны библиотеки линейной алгебры и решения уравнений. Но при разработке встраиваемого ПО приходится сохранять лицензионную частоту, минимизировать вычислительную нагрузку и затраты памяти. Поэтому отобразить модель из Matlab в прошивку приемника дословно, как правило, не получается. В рассматриваемом примере потребуется, как минимум, выполнить свою реализацию решения дифура методом Рунге-Кутты.

Для выполнения поставленных задач используются:

* Qt Creator – кроссплатформенный фреймворк для разработки программного обеспечения.
* MinGW – набор инструментов разработки программного обеспечения, включающий в себя компилятор и необходимые библиотеки.
* Boost Test – библиотека для C++, включающая в себя фреймворк для тестирования.
* Dr. Memory – инструмент, позволяющий выявлять утечки памяти.
* <http://hilite.me/> – интернет-ресурс для преобразования кода в красивый вид.

Все указанные функции и тесты приведены в приложении.

**3.2 Тестирование**

На рисунке 14 представлен вывод unit-тестов Boost Test. Тестировались 3 функции: glnsvpos() – функция реализации метода Рунге-Кутты, add() – функция сложения, mult() – функция умножения. В функцию add() внесена ошибка, поэтому ожидается, что тест завершиться не успешно.

Тесты функции add() показали ошибку, а время выполнения составило около 1,7 мс. Тест функции mult завершился успешно за 18 мкс. Время тестирования функции glnsvpos() составило 3,62с для шага 0,1, и тест во всех случаях завершался успешно.

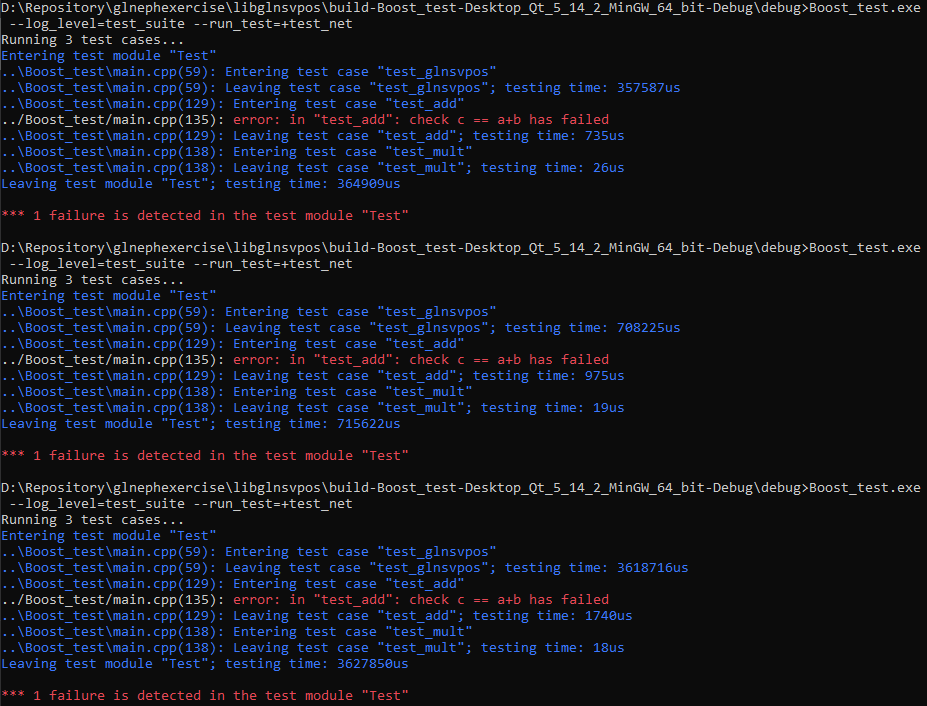


Рисунок 15 – вывод unit-тестов

Для расчета положения спутника использовался тип данных с плавающей точкой double. Погрешность double с данными из matlab должна быть не более . Для координат, размерность которых составляет м, погрешность должна быть не более м или 0,1 мкм. На рисунке 16 показан вывод максимальной разницы в координатах модели matlab и программы на C++.

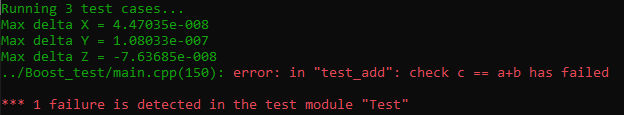


Рисунок 16 – вывод unit-тестов

При тестировании функции RK() – функции реализации метода Рунге-Кутты, в качестве входных данных выступали случайные начальные условия. Для 100 000 отсчетов, время выполнения составило 0,83 мс.



Рисунок 17 – вывод unit-тестов

**3.3 Проверка памяти**

Проверка памяти осуществлялась Dr. Memory с стандартными настройками.

Вывод Dr. Memory:

Dr. Memory version 2.3.0 build 1 built on Feb 6 2020 06:07:09

Windows version: WinVer=105;Rel=1903;Build=18362;Edition=Professional

Dr. Memory results **for** pid 10432: "libglnsvpos.exe"

Application cmdline: "D:\Repository\glnephexercise\build-libglnsvpos-Desktop\_Qt\_5\_14\_2\_MinGW\_64\_bit-Debug\debug\libglnsvpos.exe"

Recorded 118 suppression(s) from default C:\Program Files (x86)\Dr. Memory\bin64\suppress-default.txt

Error #1: UNADDRESSABLE ACCESS beyond top of stack: reading 0x000000000063fb20-0x000000000063fb28 8 byte(s)

# 0 .text [../../../../../src/gcc-7.3.0/libgcc/config/i386/cygwin.S:152]

# 1 \_pei386\_runtime\_relocator [../libglnsvpos/src/rungekutta.cpp:107]

# 2 \_\_tmainCRTStartup

# 3 .l\_start

# 4 KERNEL32.dll!BaseThreadInitThunk

Note: @0:00:00.177 in thread 10684

Note: 0x000000000063fb20 refers to 632 byte(s) beyond the top of the stack 0x000000000063fd98

Note: instruction: or $0x0000000000000000 (*%rcx) -> (%rcx)*

Error #2: UNADDRESSABLE ACCESS beyond top of stack: reading 0x000000000063f9d0-0x000000000063f9d8 8 byte(s)

# 0 .text [../../../../../src/gcc-7.3.0/libgcc/config/i386/cygwin.S:152]

# 1 \_\_pformat\_int.isra.0 [../../../../../src/gcc-7.3.0/libgcc/config/i386/cygwin.S:158]

# 2 \_\_mingw\_pformat [../../../../../src/gcc-7.3.0/libgcc/config/i386/cygwin.S:158]

# 3 \_\_mingw\_vfprintf [../../../../../src/gcc-7.3.0/libgcc/config/i386/cygwin.S:158]

# 4 printf [C:/IDE/Qt/Tools/mingw730\_64/x86\_64-w64-mingw32/include/stdio.h:349]

# 5 write\_struct\_Y [../libglnsvpos/src/func.cpp:81]

# 6 glnsvpos [../libglnsvpos/src/glnsvpos.cpp:127]

# 7 main [../libglnsvpos/main.cpp:14]

Note: @0:00:02.638 in thread 10684

Note: 0x000000000063f9d0 refers to 24 byte(s) beyond the top of the stack 0x000000000063f9e8

Note: instruction: or $0x0000000000000000 (*%rcx) -> (%rcx)*

Error #3: POSSIBLE LEAK 123 direct bytes 0x00000000030a01c0-0x00000000030a023b + 0 indirect bytes

# 0 replace\_malloc [d:\drmemory\_package\common\alloc\_replace.c:2577]

# 1 msvcrt.dll!malloc\_crt

# 2 msvcrt.dll!\_setargv

# 3 msvcrt.dll!\_getmainargs

# 4 pre\_cpp\_init

# 5 msvcrt.dll!initterm

# 6 \_\_tmainCRTStartup

# 7 .l\_start

# 8 KERNEL32.dll!BaseThreadInitThunk

===========================================================================

FINAL SUMMARY:

DUPLICATE ERROR COUNTS:

Error # 1: 2

Error # 2: 2

SUPPRESSIONS USED:

ERRORS FOUND:

2 unique, 4 total unaddressable access(es)

0 unique, 0 total uninitialized access(es)

0 unique, 0 total invalid heap argument(s)

0 unique, 0 total GDI usage error(s)

0 unique, 0 total handle leak(s)

0 unique, 0 total warning(s)

0 unique, 0 total, 0 byte(s) of leak(s)

1 unique, 1 total, 123 byte(s) of possible leak(s)

ERRORS IGNORED:

4 potential error(s) (suspected false positives)

(details: C:\Users\Zherebin\AppData\Roaming\Dr. Memory\DrMemory-libglnsvpos.exe.10432.000\potential\_errors.txt)

8 unique, 8 total, 978 byte(s) of still-reachable allocation(s)

(re-run with "-show\_reachable" **for** details)

Dr. Memory обнаружила ошибки UNADDRESSABLE ACCESS в количестве 2 штук при вызове функции:

printf("Error. File: %s, Line: %d\n", \_\_FILE\_\_, \_\_LINE\_\_);

Возможно, это связанно с внутренними библиотеками компилятора, так как все указывает на них.

Так же, Dr. Memory обнаружила возможные утечки памяти на 123 байта в своих же библиотеках.

Утечек памяти в программе обнаружено не было.

**3.4 Заключение по результатам реализации**

На данном этапе была реализована на языке С/С++ функция расчета положения спутника ГЛОНАСС №5 на заданное время по шкале UTC. Функция сопровождается unit-тестами и проверкой на утечки памяти.

Погрешность вычисления координат спутника функции С/С++ и модели maltab не превышает 0,1 мкм, при использовании типа данных с плавающей точкой, двойной точности double.

Время выполнения расчета функции, при шаге 0,1 с, составляет 3,62с. Выполнение такого же расчета в maltab – более 5 минут. Таким образом функция минимизирует время расчета, относительно модели.

Для минимизации количества затрачиваемой оперативной памяти переменные, которые содержат только положительные значения, использовали беззнаковые (unsigned) типы данных с учетом их максимальной размерности и разрядности. Тип данных double занимает в памяти 8 байт. Для массива координат, скоростей и ускорений, при шаге расчета 0,1 с для временного интервала с 12:00 10.02.20 до 00:00 11.02.20 (432 000 отсчетов), необходимо 20 736 000 байт или 19,78 Мбайт памяти.

**4 Заключение**