Министерство науки и высшего образования РФ

Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего образования

**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Инженерной Физики и Радиоэлектроники

Кафедра Радиоэлектроники

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Подпись инициалы, фамилия

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_ 20 \_\_\_ г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

11.03.01 - Радиотехника

Исследование алгоритма вычисления ионосферной поправки для системы Galileo.

Руководитель \_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ М. М. Валиханов

подпись, дата должность, ученая степень

Выпускник \_\_\_\_\_\_\_\_\_ Н. Г. Сюлин

подпись, дата

Красноярск 2022

**СОДЕРЖАНИЕ**

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc104651520)

[1 Проблема ионосферной задержки 3](#_Toc104651521)

[2 NeQuick 4](#_Toc104651522)

[2.1 Что такое NeQuick, область применения 4](#_Toc104651523)

[2.2 Описание алгоритма NeQuick 5](#_Toc104651524)

[2.3 Установка и использование NeQuick 8](#_Toc104651525)

[3 Что сделано и что сделать чтобы получить результат 11](#_Toc104651526)

[3.1 Пример работы алгоритма 11](#_Toc104651527)

[3.2 Результаты и анализ 11](#_Toc104651528)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 12](#_Toc104651529)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 13](#_Toc104651530)

[ПРИЛОЖЕНИЕ ? 13](#_Toc104651531)

[СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ? 13](#_Toc104651532)

## ВВЕДЕНИЕ

На пути к приемникам, расположенным на поверхности Земли или вблизи нее, сигналы спутников ГНСС проходят через ионосферу. Свободные электроны, находящиеся в этой оболочке атмосферы, влияют на распространение сигналов, изменяя их скорость и направление движения. Это приводит к задержке в прибытии модулированных составляющих сигналов (из которых впоследствии получают измерения псевдодальности) и в несущих фазах волн сигналов (влияющих на измерения несущей фазы). Ионосфера - диспергирующая среда для радиосигналов, поэтому при одновременном проведении измерений на двух частотах, передаваемых спутником, большая часть влияния ионосферы может быть исключена. Однако одночастотные устройства, такие как большинство навигационных транспортных средств и портативных приемников, не могут позволить себе роскошь. Эти устройства должны полагаться на модели коррекции в одночастотном режиме. Коэффициенты для такой модели включены в навигационные сообщения, передаваемые со всех спутников GPS. Известный как алгоритм коррекции ионосферы или алгоритм Клобухар, он удаляет по меньшей мере 50 % влияния ионосферы в сигналах.

Распространение радиоволн сигналов ГНСС зависит от атмосферы Земли и характеристик среды, окружающей приемник. Системы ГНСС основаны на трансляции радиоволн в микроволновой области (в основном все работают в так называемом L-диапазоне, хотя некоторые новые системы, такие как Индийская региональная навигационная спутниковая система, как ожидается, будет вести вещание в S-диапазоне). Эти электромагнитные сигналы могут страдать от ряда помех. При рассмотрении этих эффектов, мы можем разделить атмосферу Земли на две части: электрически нейтральную атмосферу (в первую очередь самую низкую часть - тропосферу), где основной эффект групповой задержки навигационных сигналов происходит из-за частиц водяного пара и газовых компонентов сухого воздуха, который для микроволнового излучения является недисперсным (зависит от частоты); и ионосферу, ионизированную часть атмосферы. Локальное окружение может повлиять на навигационный сигнал различным образом, приводя к созданию препятствий для свободного прохождения сигнала или полной его блокировке (например, растительностью или такими препятствиями, как здания). Сигнал также может рассеяться и стать многолучевым из-за отражения и дифракции на окружающие предметы. В этой дипломной работе будет рассмотрено влияние ионосферы на сигналы ГНСС и решение данной проблемы, предложенное командой Galileo.[1]

## 1 Проблема ионосферной задержки

Ионосфера, простирающаяся от высоты около 50 км до примерно 1000 км над Землей, является областью ионизованных газов (свободных электронов и ионов). Ионизация вызывается солнечной радиацией, и состояние ионосферы определяется преимущественно интенсивностью солнечной активности. Ионосфера состоит из слоев (называемых слоями D, E, F1 и F2) на различных высотах, каждый со своими скоростями образования и потери свободных электронов. Пик электронной плотности (количество электронов в кубическом метре) приходится на диапазон высот в 250-400 км (слой F2).

Физические характеристики ионосферы изменяются ото дня к ночи в широких пределах. Когда Солнце восходит, его ультрафиолетовое излучение начинает разлагать молекулы газа (в основном H2 и He на больших высотах, а на меньших высотах – O2 и N2) на ионы и свободные электроны. Пик электронной плотности наступает около 2 часов после местного полдня, а затем плотность начинает уменьшаться. Ночью ионизация не происходит, и ионы и электроны находят друг друга и рекомбинируют, уменьшая количество свободных электронов. Наблюдаются значительные изменения в зависимости от времени года и фазы 11-летнего цикла солнечной активности. (Текущий солнечный цикл начался в 1995 г. и имел пик в 2000 г.) Может также проявляться значительная изменяемость ото дня ко дню, в зависимости от солнечной активности и геомагнитных нарушений. Есть также непредсказуемые краткосрочные влияния и локальные аномалии (подвижные ионосферные нарушения).

Скорость распространения радиосигналов в ионосфере зависит от числа свободных электронов на их пути, определяемых величиной полной электронной концентрации TEC (Total Electron Content). Это число электронов, содержащихся в столбе сечением в 1 м2, простирающемся от приемника до спутника:



где ne(s) - переменная электронная плотность вдоль пути сигнала, а интегрирование производится вдоль пути сигнала от спутника S к приемнику R. Длина пути через ионосферу самая короткая в направлении зенита, и поэтому TEC имеет наименьшее значение в вертикальном направлении (TECV). Величина TEC измеряется в единицах TECU (TEC Units), определяемых как 1016 электронов/м2. Обычно TECV изменяется между 1 и 150 TECU. В данном месте и в данное время TECV может изменяться на 20-25% от его среднемесячного значения. Современные модели ионосферы не обеспечивают адекватное представление изменений в TEC между сутками.

Ионосфера обычно имеет спокойное поведение в умеренных широтах, но может флуктуировать вблизи экватора и магнитных полюсов. Район с наивысшей ионосферной задержкой лежит в пределах ±20° от магнитного экватора. Солнечные вспышки и последующие магнитные бури могут создавать обширные и быстрые флуктуации в фазе несущей (называемые сцинтилляциями) и в амплитуде (называемые затуханиями) сигналов СРНС. Это явление, хотя и кратковременное, и нечастое в средних широтах, может создавать трудности в непрерывном отслеживании сигналов в полярных и экваториальных районах. [2]

## 2 NeQuick

### **2.1 Что такое NeQuick, область применения**

NeQuick это трехмерная времязависимая модель плотности электронов в ионосфере. Она основана на эмпирическом климатическом представлении ионосферы, которое предугадывает среднюю месячную плотность электронов, опираясь на значения, связанные с солнечной активностью: 12 – месячный сглаженный номер солнечных пятен, месяц, ширина, долгота, высота и время (UT). Модель NeQuick была адаптирована для одночастотных приемников Galileo для коррекций в реальном времени для того, чтобы получать прогнозы в реальном времени на основе одного входного параметра – эффективного уровня ионизации Az, который определяется тремя коэффициентами, передаваемыми в навигационном сообщении.

Galileo это европейская глобальная навигационная спутниковая система, предоставляющая высокоточные глобальные навигационные данные для гражданского использования. Galileo, как и современная GNSS в целом, основана на передаче электромагнитных сигналов в полосе частот L. Эти спутниковые сигналы страдают от ряда нарушений при распространении через земную атмосферу, включая ионосферную задержку. [3]

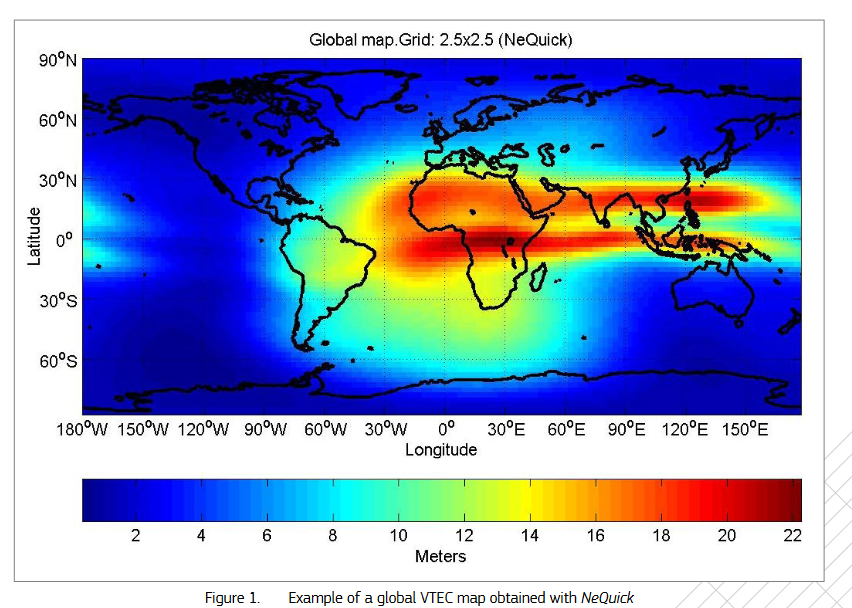


Рисунок N – Пример глобальной карты VTEC, полученной с помощью NeQuick

В номинальных условиях приемник Galileo декодирует навигационное сообщение Galileo от N спутников Galileo одновременно (N > 1), которые получат в данную epoch одни и те же широковещательные ионосферные коэффициенты для каждого спутника. однако, когда ионосферные параметры обновляются, учитывая, что up-link сообщения спутники не всегда синхронизированы из-за видимости спутников до станций восходящей линии связи (uls), может случиться так, что некоторые спутники транслируют недавно обновленные коэффициенты, в то время как другие продолжают транслировать предыдущую партию коэффициентов. В такой ситуации любой приемник, расшифровывающий навигационное сообщение в любой данный момент, не имеет средств чтобы определить, какие коэффициенты новее, а какие старше. Кроме того, нет возможности определить, какие коэффициенты применять для коррекции псевдодальностей разных спутников. Тем не менее поправка все равно будет достигаться в статистическом смысле, независимо от принятого решения.

### **2.2 Описание алгоритма NeQuick**

Для реализации ионосферного алгоритма для приемников Galileo на одной частоте следующие должны быть выполнены:

Для каждого соединения спутник – приемник:

Получить оценку местонахождения приемника (ФИ, ЛЯМБДА, h)i, спутника (ФИ, ЛЯМБДА, h)j, и время (время суток и месяц)

Получить MODIPU приемника, используя ФИi, ЛЯМБДАi.

Получить эффективный уровень ионизации AzU, используя (УРАВНЕНИЕ 2 В КНИГЕ) с MODIPU и коэффициенты передачи (ai0, ai1, ai2)

Вызвать NeQuick G STEC для пути от (x, y, z)i до (x, y, z)j.

Для каждой точки в пути вызвать NeQuick для получения плотности электронов с AzU, времени и месяца

End

Интегрировать STEC для всех точек пути

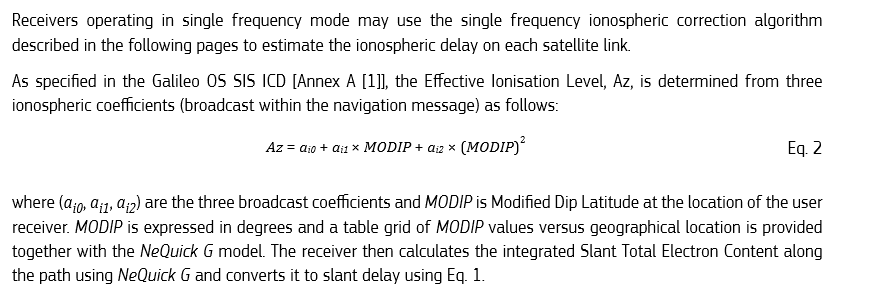
Получить коррекцию преобразуя STEC в кодовую (?) задержку используя (УРАВНЕНИЕ 1 В КНИГЕ) для соответствующей частоты

Наложить коррекцию для выбранного соединения

End

Приемники, работающие в режиме одной частоты, могут использовать алгоритм коррекции, описанный ниже для прогнозирования ионосферной задержки для каждого подключения к спутнику.

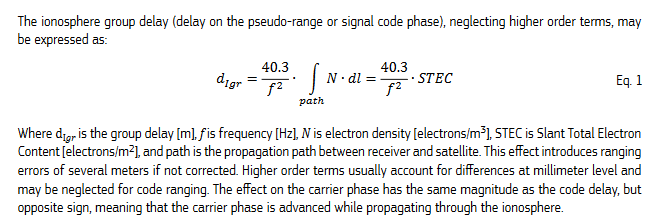
По определению в Galileo OS SIS ICD: эффективный уровень ионизации Az можно получить с помощью трех ионосферных коэффициентов (передаются в навигационных сообщениях):



где ai0, ai1, ai2 – упомянутые коэффициенты, MODIP – Modified Dip Latitude в расположении приемника. MODIP измеряется в градусах, таблица соответствия сетки значений MODIP с географическими местоположением поставляется вместе с моделью NeQuick G.

Приемник затем считает STEC на протяжении всего пути и переводит их в наклонную задержку используя УРАВНЕНИЕ 1 В КНИГЕ.

Групповая ионосферная задержка (задержка диапазона или фазы кода сигнала), пренебрегая условия более высокого порядка, может быть получена следующим образом:



где d1gr – это групповая задержка (м), f – частота (Гц), N – плотность электронов (электрон / м3), path – путь от приемника до спутника. Этот эффект создает диапазонные ошибки в несколько метров. Условия высшего порядка обычно составляют миллиметры и ими можно пренебречь. Эффект несущей фазы имеет такую же магнитуду, как и кодовая задержка, но с противоположным знаком. Что означает несущая фаза увеличивается по мере распространения в ионосфере.

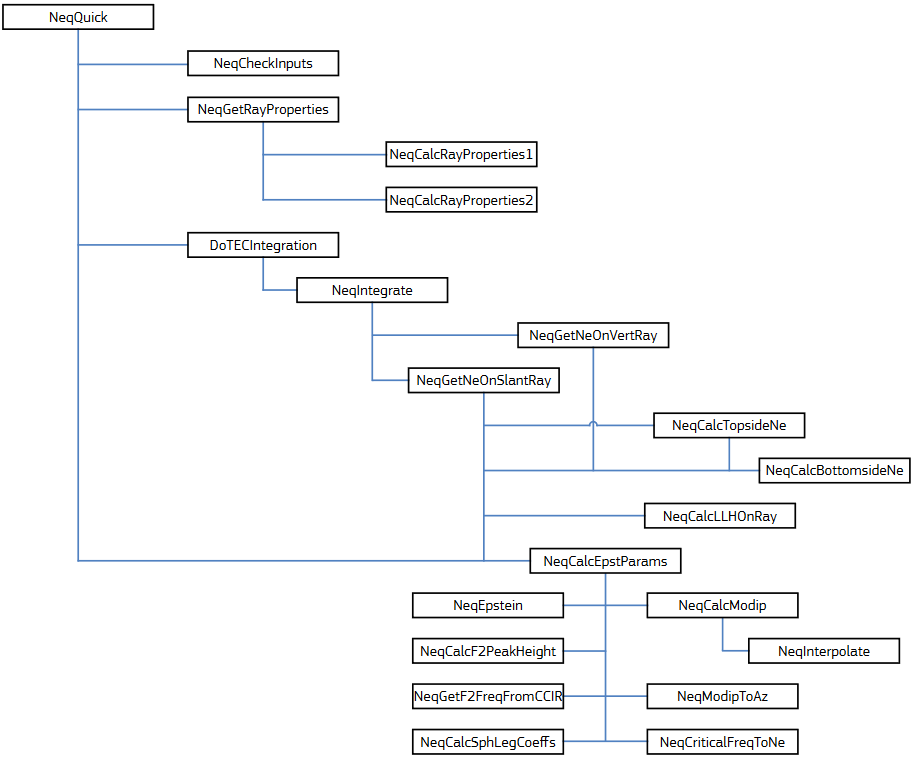


Рисунок N – Иерархическая схема NeQuick

На рисунке N представлена иерархическая структурная схема NeQuick. Краткое описание основных функций представлено в таблице N

Таблица N – Назначение каждой функции – состовляющей NeQuick

|  |  |
| --- | --- |
| Название функции | Назначение |
| NeQuick | Основная функция, возвращает TEC между 2мя точками |
| NeqCheckInputs | Проверяет введенные значения |
| NeqGetRayProperties | Вычисляет параметры луча и проверяет последний на правильность |
| DoTECIntegration |  |
| NeqCalcEpstParams | Вычисляет параметры ионосферы |
| NeqGetF2FreqFromCCIR | Возвращает foF2, вычисленный из CCIR файлов |
| NeqCalcF2PeakHeight | Вычисляет пик слоя F2 |
| NeqCalcBottomSideNe | Вычисляет количество электронов на определенной высоте в нижней части ионосферы под пиком F2 |

[3]

### **2.3 Установка и использование NeQuick**

NeQuick является ПО с открытым исходным кодом, скачать его можно на сайте Европейского Сервисного Центра ГНСС (<https://www.gsc-europa.eu/support-to-developers/nequick-g-source-code>). Реализация алгоритма на ЯП С стандарта 2011 года разделена на несколько частей:

Библиотека NeQuick G JRC

Тестовая программа

Несколько директорий с говорящими названиями: расширения, связанные с .c и .h файлами, текстовые файлы, файлы MODIP и CCIR соответствующие изначальному распространению NeQuick, make файлы, конфигурационные файлы (.cfg) и perl файлы (.pl).

Сборка осуществляется с помощью cmake и конфигурации в Makefile, можно выбрать один из нескольких вариантов конечной сборки, для работы в Windows лучше всего подойдет версия для Visual Studio 2015, конечный проект будет совместим и с более поздними версиями Visual Studio. После сборки будет создан .exe файл, который можно запустить из командной строки. Это непосредственно запуск NeQuick.

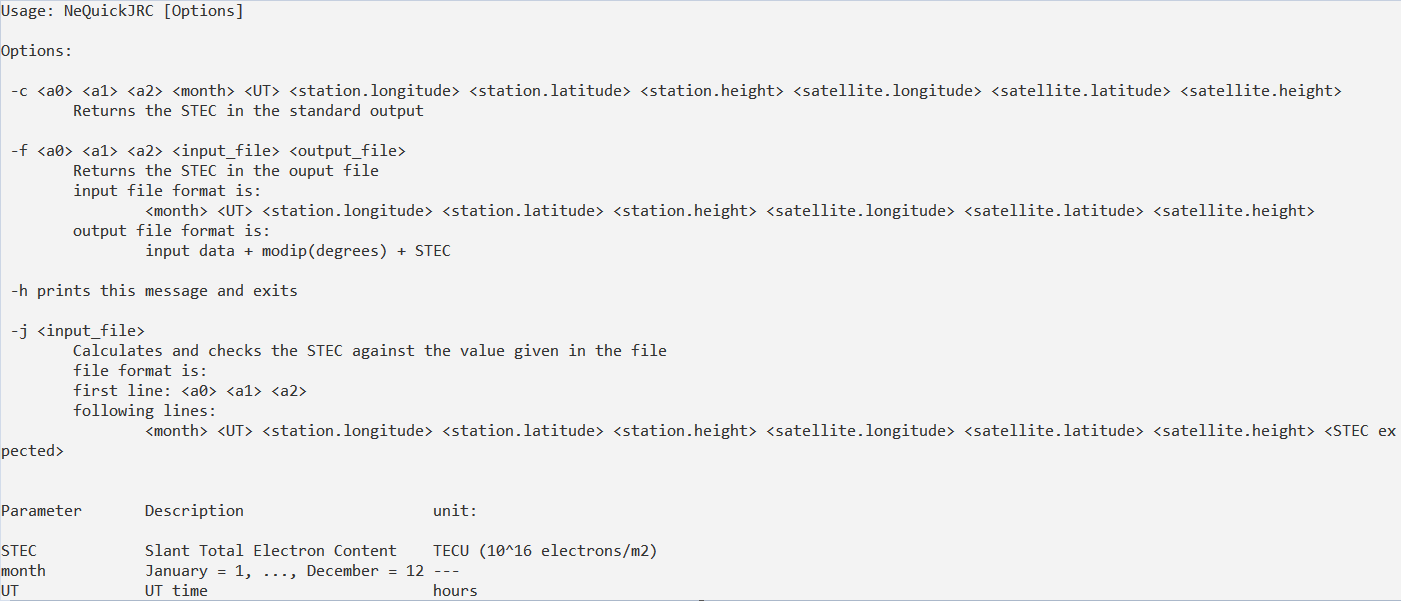


Рисунок N – Инструкции по запуску NeQuick

Как видно из рисунка выше, алгоритм может работать в 2х режимах. Первый вызывается параметром -c и на входе требует следующие данные:

Таблица N – Входные параметры

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Входной параметр | Описание | Единица измерения |
| АЛЬФАi0 | Эффективный уровень ионизации 1 порядка | Sfu |
| АЛЬФАi1 | Эффективный уровень ионизации 2 порядка | Sfu / град |
| АЛЬФАi2 | Эффективный уровень ионизации 3 порядка | Sfu / град2 |
| ФИ1 | Геоцентрическая широта приемника | град |
| ЛЯМБДА1 | Геоцентрическая долгота приемника | Град |
| h1 | Геоцентрическая высота приемника | Метры |
| ФИ2 | Геоцентрическая широта спутника | град |
| ЛЯМБДА2 | Геоцентрическая долгота спутника | Град |
| h2 | Геоцентрическая высота спутника | Метры |
| UT | UT время | Часы |
| месяц | Целое значение от 1 до 12 | Без единиц измерения |

Sfu - единица солнечного потока, 1 sfu = 10-22W / (m2 \* Гц), местонахождение приемника и спутника должно быть в формате эллипсоидных координат WGS-84.

Второй режим, вызывающийся параметром -f принимает тот же набор параметров, но разница в количестве – если первый вариант работает по одному набору, то второй читает файл, где каждая строка соответствует 1 набору, поэтому в качестве параметров в консоли необходимо указать коэффициенты солнечной активности, входной файл и название выходного файла, который NeQuick создаст в текущей директории.

Коэффициенты солнечной активности, координаты станции наблюдения (которая и сняла эти коэффициенты) и время находятся в файлах rinex.

RINEX — это формат обмена данными для файлов исходных данных спутниковых навигационных приёмников. Он позволяет пользователям производить пост-обработку полученных данных для выполнения более точных вычислений — обычно с помощью других данных, неизвестных приемнику, например за счёт применения более точной модели атмосферных параметров в момент измерений. Выглядит такой формат следующим образом:

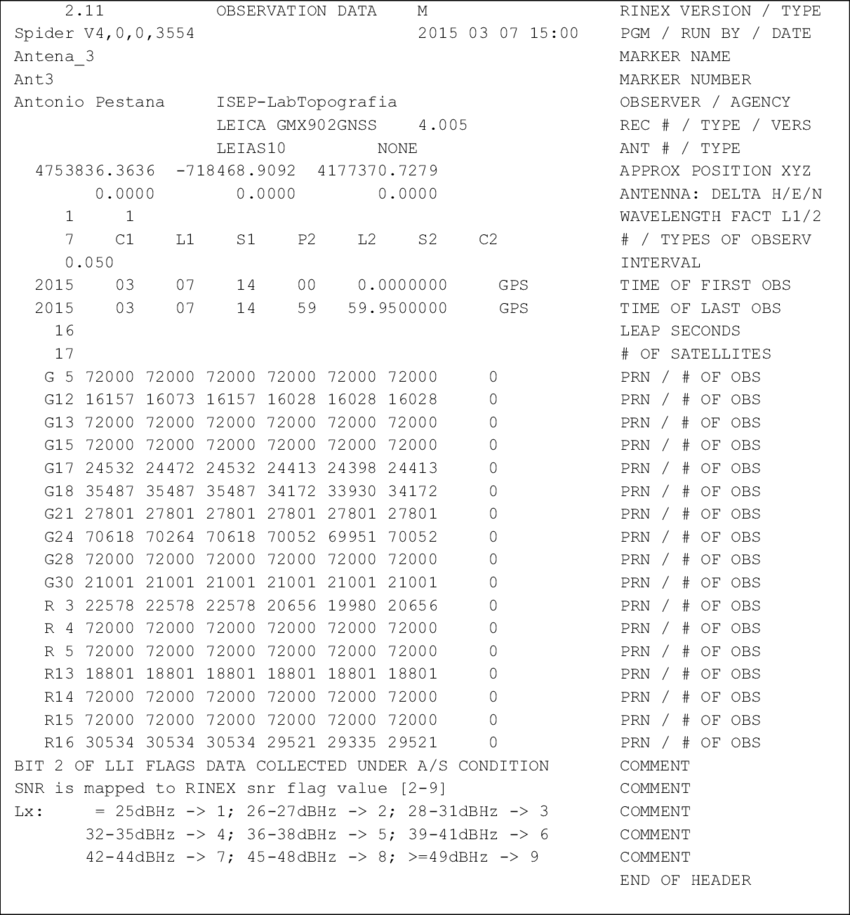


Рисунок N – пример заголовка rinex файла

Координаты спутника же передаются в другом формате – sp3.

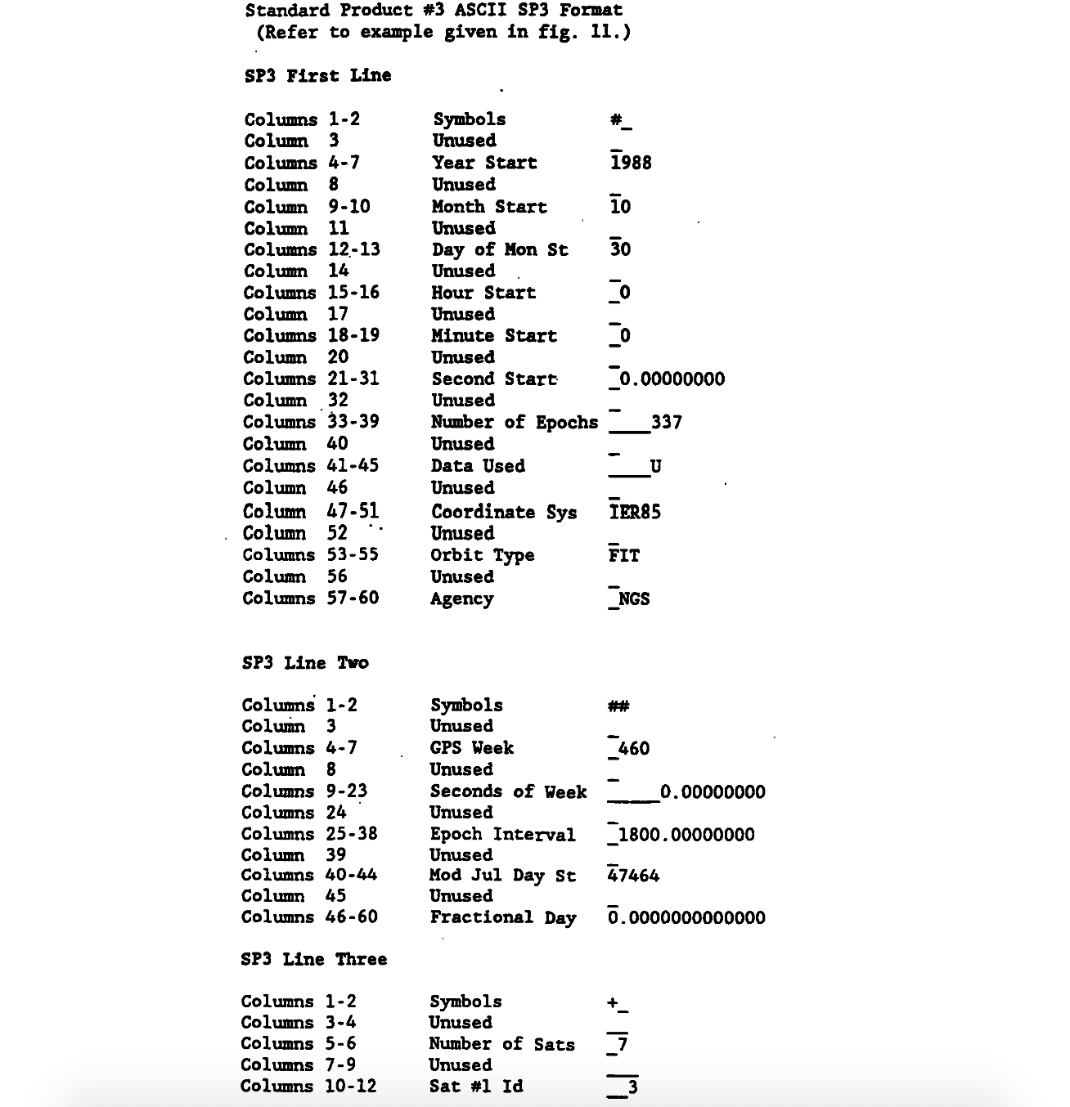


Рисунок N – Пример описания формата sp3

Параметр -h выдает сообщение на рисунке N. Последний параметр -j нужен для проверки получаемых STEC единиц – в нем указывается упомянутый выше набор данных и предполагаемые значения STEC.

Результатом работы алгоритма являются значения STEC (Slant Total Electron Content – полное наклонное содержание электронов), измеряемые в TECU (total electron content unit), которые могут быть переведены в ионосферную задержку используя УРАВНЕНИЕ 1 В КНИГЕ.

## 3 Что сделано и что сделать чтобы получить результат

### **3.1 Пример работы алгоритма**

### **3.2 Результаты и анализ**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 <http://www.gisa.ru/104204.html>

2 К.М. Антонович ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ГЕОДЕЗИИ Том 1 стр 232

3 Ionospheric correction Algorithm for Galileo single frequency users – European GNSS (Galileo) Open Service, SECTION 2:single frequency ionospheric correction algorithm.

## ПРИЛОЖЕНИЕ ?

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ?