

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Физический факультет

Кафедра Радиофизики



**Наблюдения и анализ статистических характеристик  
трансионосферных радиосигналов**

Выпускная квалификационная работа

Студента дневного отделения

**Козлова Валерия Сергеевича**

Научный руководитель:

Кандидат физ.-мат. наук, доцент **В.Э. Герм**

Рецензент:

Кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, доцент **Д.В. Ионов**

Санкт-Петербург

2017

## Оглавление

Введение .....	3
Спутниковая навигационная система .....	3
Ошибки в трансферных сигналах .....	4
Цель работы .....	5
Описание эксперимента .....	6
Глава 1. Исследование суточного хода полного электронного содержания .....	7
Глава 2. Исследование флуктуаций сигналов .....	12
2.1 Исследование хода индексов флуктуаций для GPS спутников .....	13
2.2 Исследование хода индексов флуктуаций для геостационарных спутников .....	22
2.3 Исследование корреляции индексов флуктуаций, полученных на разных приёмниках .....	24
2.4 Анализ спектров флуктуаций .....	26
Глава 3. Анализ вкладов различных факторов в результирующее искажение сигналов .....	31
Заключение .....	36
Литература .....	38

# Введение

**Спутниковая навигационная система** – система, предназначенная для определения местоположения наземных, водных и воздушных объектов. Первая такая система была разработана США в 60-е года XX века с целью обеспечения информацией о точных координатах своих атомных подводных лодок со стратегическими баллистическими ракетами. В наше время существует множество спутниковых навигационных систем, однако, только две: американская GPS и отечественная ГЛОНАСС обеспечивают полное и бесперебойное покрытие земного шара.

Рассмотрим более подробно систему GPS (Global Positioning System-система глобального позиционирования), так как в данной работе использовалась именно она. GPS начали разрабатывать в 70-е годы, постепенно запуская и совершенствуя спутники, и в 1993 году, когда последний 24-й спутник, необходимый для полного покрытия земной поверхности, был выведен на орбиту, GPS официально заработала. На сегодняшний день GPS насчитывает 32 спутника.

## Техническая реализация и принцип работы GPS

GPS состоит из трех сегментов:

- космический
- пользовательский
- управляющий

Космический сегмент состоит из 32 спутников, распределенных по 6 средним орбитам Земли (расстояние до спутников имеет порядок 20200км, а период обращения 11 часов 58 минут). Каждый спутник передает сигнал, который состоит из двух синусоид (также известных как несущие частоты), двух цифровых кодов и навигационного сообщения. Несущие частоты и коды используются, в основном, для определения расстояния от приемника до GPS спутников. Навигационные сообщения содержат наряду с другой информацией координаты спутников как функцию времени. Переданные сигналы контролируются высокоточными атомными часами, которые расположены на борту спутников[1].

Пользовательский сегмент состоит из всех военных и гражданских пользователей. С GPS приемником соединяется GPS антенна, а пользователь может принимать GPS сигналы, которые он использует, чтобы определять свое местоположение.

Управляющий сегмент представляет собой управляющую станцию, расположенную в США и всемирную сеть станций мониторинга и наземных антенн. Изначально задачей управляющего сегмента было отслеживание GPS спутников, чтобы определять и прогнозировать местоположение спутников, атмосферные данные, спутниковый альманах (таблица положений всех спутников) и другое.

## GPS: основная идея

Принцип работы довольно прост. Если расстояние от точки на поверхности Земли (GPS приемника) до любых трех GPS спутников известно, тогда местоположение точки (GPS приемника) может быть легко определено. Каждый GPS спутник непрерывно излучает микроволновый радиосигнал (сферическую волну), состоящий из двух несущих частот, двух цифровых кодов и навигационного сообщения. Когда GPS приемник включен, он принимает сигнал через антенну, затем сигнал будет обрабатываться с помощью встроенного программного обеспечения. Частичный результат обработки сигналов состоит из расстояний до GPS-спутников через цифровые коды (известные как псевдодальности) и спутниковых координат через навигационные сообщения.

Теоретически нужны расстояния до трех GPS спутников (Рис.1). В этом случае приемник бы находился на пересечении трех сфер, где радиус каждой сферы соответствовал расстоянию до соответствующего спутника (работает для вакуума). Однако с практической точки зрения нужны четыре GPS спутника, так как ещё существует задержка сигнала по времени [1].

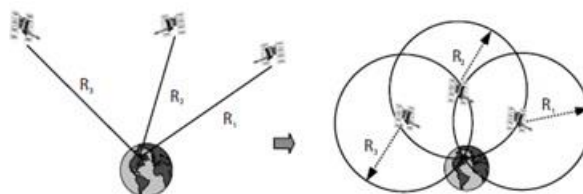


Рис. 1 Определение координат с помощью трех спутников [1]

## Ошибки в трансферных сигналах

Основным источником ошибок спутниковых навигационных систем является атмосфера Земли. Она вносит дополнительные задержки времени распространения навигационных сигналов за счёт отличия скорости распространения электромагнитных волн в ионосфере от скорости света. Эти дополнительные задержки зависят от многих факторов, таких как состояние ионосферы, угол наклона траектории сигнала по отношению к вертикали, солнечной активности времени года, суток и другие, которые не всегда известны. Кроме того, мелкомасштабные флуктуации электронной плотности ионосферы и флуктуации индекса рефракции тропосферы приводят к флуктуациям параметров навигационного сигнала, которые также вносят свой вклад в атмосферные ошибки.

Хотя с точки зрения задачи навигации атмосферные ошибки являются мешающим фактором, приводящим к ухудшению работы системы, исследование искажений сигнала даёт информацию о свойствах среды распространения, что представляет интерес с точки зрения исследования свойств окружающей среды. Кроме того, информация о среде распространения может быть использована для компенсации атмосферных ошибок.

В частности, важнейшим параметром ионосферы, фактически определяющим дополнительную задержку сигнала, является величина полного электронного содержания.

Также важными параметрами, характеризующими величину флуктуаций в ионосфере, являются индексы мерцания амплитуды и фазы.

В настоящей работе предполагается проведение наблюдений трансionoсферных навигационных сигналов с использованием имеющейся аппаратуры с целью выяснения её возможностей для получения экспериментальных данных, которые могут быть использованы для оценок параметров среды распространения сигналов.

### **Научная и практическая ценность.**

Исследование возмущений в ионосфере представляет большой интерес как для углубления фундаментальных знаний о физике околоземного космического пространства, так и в прикладных целях для оперативной диагностики и прогноза условий космической погоды.

Результаты, полученные в данной работе могут быть использованы: - для изучения физических процессов формирования неоднородностей ионосферы; для решения практических вопросов, направленных на улучшение качества и точности спутниковых навигационных систем.

### **Цель работы:**

- Определение оптимальных режимов работы аппаратуры для получения экспериментальных результатов с целью определения полной электронной концентрации ионосферы и параметров флуктуаций сигналов, в том числе спектров флуктуаций.
- Получение двухчастотных данных для определения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы и их обработка для исследования временного хода ПЭС.
- Получение практических экспериментальных данных, используя 50Гц режим GPS приемника, и их обработка, с целью измерения индексов флуктуации фазы и амплитуды ионосферы, и последующего спектрального анализа.
- Сравнение результатов аналогичных измерений, выполненных на двух приёмниках, с целью дополнительной верификации результатов.

## Описание эксперимента

Для выполнения работы были использованы приемно-регистрационные комплексы, с помощью которых можно поддерживать непрерывную связь со спутниками GPS/ГЛОНАСС, осуществлять прием сигналов на двух частотах, а затем записывать полученные данные на жесткий диск для последующей обработки. Оба приемника находятся в здании НИИФ СПбГУ (59°52'52,89" с. ш. 29°49'31,16" в. д.), каждый приемник подключен к своей антенне, которые разнесены на расстояние ~50 метров.

### Характеристики приемников.

В приемно-регистрационный комплекс входят два профессиональных измерительных приемника геодезического класса от разных производителей: Novatel GPSTATION 6 и Septentrio PolaRxS.

Приёмник Septentrio PolaRxS предоставлен для выполнения работы ресурсным центром СПбГУ «Геомодель» в рамках проекта 104-7635.

Основные их характеристики представлены в ниже приложенной таблице.

Приемник	Кол-во каналов	Максимальная частота работы	Точность измерений			
			L1 pseudorange	L1 carrier phase	L2 pseudorange	L2 carrier phase
Novatel	120	50Гц	4см	0.5мм	8см	1мм
Septentrio	136	100Гц	5см	1мм	10см	1мм

Таблица 1 Основные характеристики приемников Septentrio и Novatel

Следует отметить, что оба приемника обладают внутренними опорными осцилляторами, которые синхронизируют часть параметров во времени, но и сами являются источниками шумов. Особенностью Septentrio является ультранизкий уровень шумов так как на нем установлен кристаллический осциллятор с термостатом (ОСХО).

Оба приемника способны не только определять своё местоположение, но и позволяют работать с самими сигналами более детально, позволяя измерять такие величины как псевдодальность, фаза сигнала, доплеровскую частоту, азимут и другие. К обоим приемникам прилагается программное обеспечение, благодаря которому, можно вычислять различные характеристики трансionoсферных сигналов.

### Программное обеспечение:

Для приемника Novatel

«SLOG» - утилита от Novatel, с помощью которой идет замер и запись нужных данных.

«Convert4» - утилита от Novatel CDU, позволяющая преобразовывать файлы с расширением .gps в удобный для чтения, как человеку, так и ПО, формат RINEX.

«ParseReduced» - утилита от Novatel, позволяющая преобразовывать файлы с расширением .gps в текстовый массив, в котором по некоему алгоритму получены значения индексов мерцания амплитуды  $S_4$  и фазы  $\sigma_\phi$ .

«ParseRaw» - утилита от Novatel, позволяющая преобразовывать файлы с расширением .gps в текстовый массив. Для каждого спутника создаются 2 текстовых файла. В первом случае записываются «сырые» данные фазы и амплитуды, а во втором уже «детрендрованные», то есть пересчитанные с целью исключения медленных изменений фазы, то есть «тренда». С помощью данной программы можно проверять интересующие нас места сильных флуктуаций на «разрывы», то есть пропал ли сигнал в этот момент времени.

Для приемника Septentrio

В отличие от приемника Novatel у данного приемника имеется визуальный интерфейс, с помощью которого можно отмечать интересующие нас данные, для каждого пункта можно выбрать нужную частоту записи. После завершения сбора данных, происходит автоматическое конвертирование полученных файлов в интересующий нас формат. Все вышеперечисленное осуществляет программа «RxLogger».

«sbf2ismr» - утилита от Septentrio позволяющая получать из исходного бинарного файла текстовый файл формата .ismr, уже содержащий посчитанные индексы ионосферных мерцаний. Так же данная программа позволяет дополнительно создавать отдельный текстовый файл, содержащий «сырые» данные для фазы и амплитуды сигнала (данная функция недоступна при автоматическом конвертировании).

«SBF Analyzer» - утилита для визуализации полученных данных, имеющая большой спектр различных зависимостей. Позволяет строить большое количество графиков и диаграмм, используя исходный бинарный файл, без предварительной конвертации.

Для обработки данных, полученных обоими приемниками, использовался «Matlab» - пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноименный язык программирования, используемый в этом пакете.

«TEC Calibration (<http://t-ict4d.ictp.it/nequick2/gnss-tec-calibration>)» - программа обрабатывающая RINEX файлы и вычисляющая вертикальное ПЭС, а также наклонное ПЭС для каждого спутника, а затем записывающая полученные данные в виде текстового файла (file.txt).

## **Глава 1. Исследование суточного хода полного электронного содержания**

Один из основных параметров, который характеризует ионосферу – ПЭС (полное электронное содержание или TEC – Total Electron Content). ПЭС – это количество электронов в цилиндре с площадью поперечного сечения  $1\text{ м}^2$ , а длина его равна

расстоянию от приемника до спутника. Единицей измерения ПЭС является ТЕСУ (1ТЕСУ=10<sup>16</sup>м<sup>-2</sup>). С увеличением значения ПЭС сигнал претерпевает все более сильное изменение.

Чтобы понять, что такое ПЭС вернемся к определению координат приемника. Псевдодальность от приемника до спутника определяется из соотношения

$$R' = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} + c\tau + \sigma \quad (1)$$

где  $R'$  - псевдодальность;  $x, y, z$  – координаты приемника;  $x_s, y_s, z_s$  – координаты спутника;  $c$  – скорость света;  $\tau$  – отклонение часов приемника от системного времени GPS;  $\sigma$  – грешность измерений. Псевдодальность  $R'$  отличается от действительного расстояния  $R$  наличием ошибок. Определив псевдодальность для каждого из четырех спутников, можно рассчитать координаты приемника и параметр  $\tau$ . Для определения  $R'$  необходимо знать либо время распространения сигнала, либо набег несущей радиоволны, поэтому есть два способа определения псевдодальности: кодовый и фазовый. При фазовом способе измерения, псевдодальность вычисляется по формуле:  $R'_f = \lambda\Delta\varphi + \lambda N$  измеряемым параметром является разность фаз  $\Delta\varphi$  двух несущих частот,  $\lambda = \frac{c}{f}$  – длина несущей радиоволны, а  $N$  – полное число циклов фазы в момент включения приемника. Фазовые измерения, выполненные на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , обозначается как  $L1$  и  $L2$ . Чтобы определить ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям псевдодальности необходимо знать набег фазы, который определяется формулой:

$$\varphi_{1,2} = \frac{2\pi f_{1,2}}{c} \int_0^R n_{1,2} dl + \varphi_0 \quad (2)$$

где  $f_1=1575,42$ МГц и  $f_2=1227,60$ МГц – рабочие частоты GPS;  $\varphi_{1,2}$  – набег фазы для частоты  $f_1$  и  $f_2$ ;  $\varphi_0$  – неизвестная начальная фаза;  $R$  – расстояние между приемником и передатчиком,  $n_{1,2}$  – коэффициент преломления сигналов  $f_1$  и  $f_2$  в ионосфере, который в некотором приближении равен

$$n_{1,2} \approx 1 - \frac{40,308 N_e}{f_{1,2}^2} \quad (3)$$

где  $N_e$  – локальная электронная концентрация в ионосфере (эл/см<sup>3</sup>), а  $f_{1,2}$  – частота (кГц). Таким образом, формулу можно переписать:

$$\varphi_{1,2} = \frac{2\pi f_{1,2}}{c} R - 40,308 \frac{2\pi}{c f_{1,2}} \int_a^b N_e dl + \varphi_0 \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  соответственно нижняя и верхняя граница ионосферы.

Второе слагаемое называется ионосферной поправкой к фазе, в сам интеграл  $I = \int_a^b N_e dl$  – полным электронным содержанием. Поскольку число оборотов фазы  $L = \frac{\varphi}{2\pi}$ , а длина волны  $\lambda = \frac{c}{f}$ , последнее уравнение можно записать как:

$$L_{1,2} \cdot \lambda_{1,2} = R - \frac{40,308}{f_{1,2}^2} I + \varphi_0 \quad (5)$$

А отсюда можно выразить ПЭС:



$$I = \frac{1}{40,308} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L1\lambda_1 - L2\lambda_2) + const + \sigma L] \quad (6)$$

где  $L1\lambda_1$  и  $L2\lambda_2$  – приращение фазового пути сигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере;  $const$  – неоднозначность фазовых измерений;  $\sigma L$  – ошибка измерения фазы[2,3].

В данной части работы был использован низкочастотный режим записи частотой 1/60 Гц, так как этой частоты вполне достаточно, чтобы получать интересующие нас величины.

Для того чтобы получить значения ПЭС, измеренные обоими приемниками, исходные бинарные файлы были конвертированы в формат RINEX. Далее с помощью программы «ТЕС Calibration» было вычислено значение ПЭС для каждого спутника, а также вертикального ПЭС. Особенностью этой программы является то, что для вычисления ПЭС в выбранные сутки необходимо вести запись в течение трех суток (до и после исследуемых). Это необходимо чтобы уменьшить ошибку вычислений. Для дальнейшей обработки текстовых файлов использовался «Matlab», с помощью которого избирались данные по вертикальному ПЭС, а затем строился график зависимости вертикального ПЭС от времени (Рис. 2):

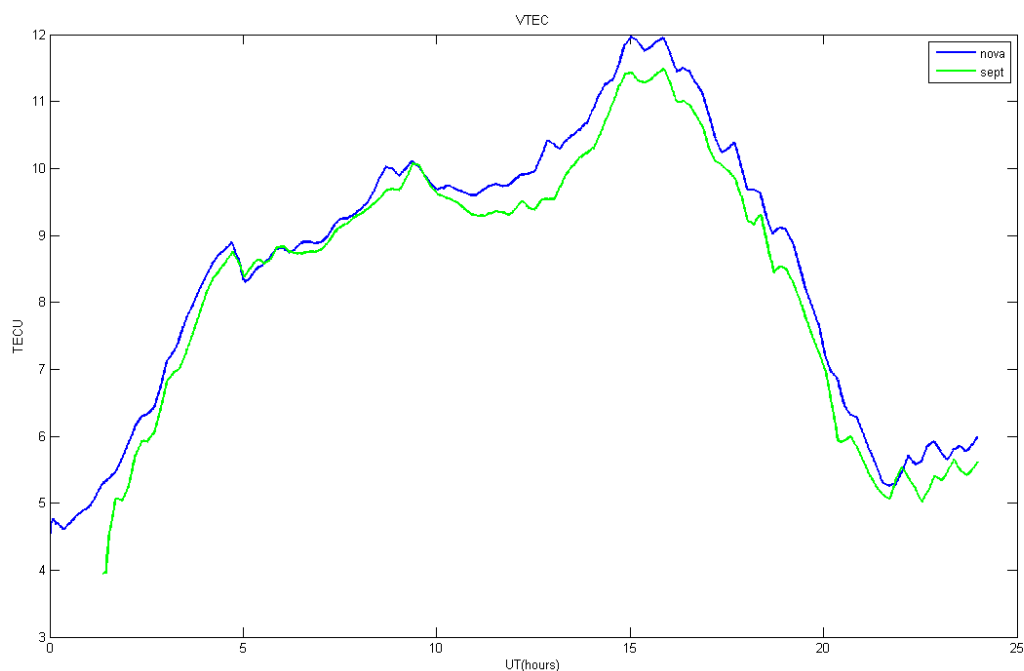


Рис. 2 График зависимости вертикального ПЭС от времени 16 мая 2017 года

График представляет собой суточный ход вертикального ПЭС. В дневное время суток полное электронное содержание ионосферы увеличивается по сравнению с ночным, благодаря ионизирующему действию солнечного излучения. Такая зависимость является характерной для поведения ПЭС, однако в отдельные дни можно увидеть отклонения от характерной гладкой зависимости (Рис. 3):

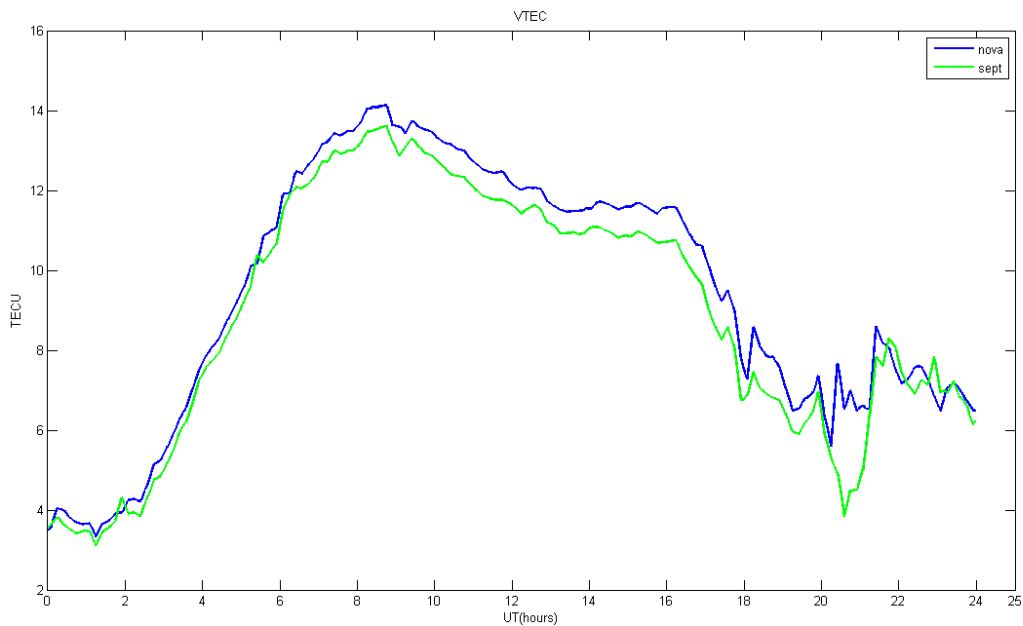


Рис. 3 График зависимости вертикального ПЭС от времени 2 апреля 2016 года

При анализе полученного графика было замечено, что в период с 17 до 24 часов наблюдались быстрые нерегулярные изменения вертикального ПЭС, поэтому было принято решение исследовать ход ПЭС для отдельных спутников в данный промежуток времени (Рис. 4, Рис. 5, Рис. 6):

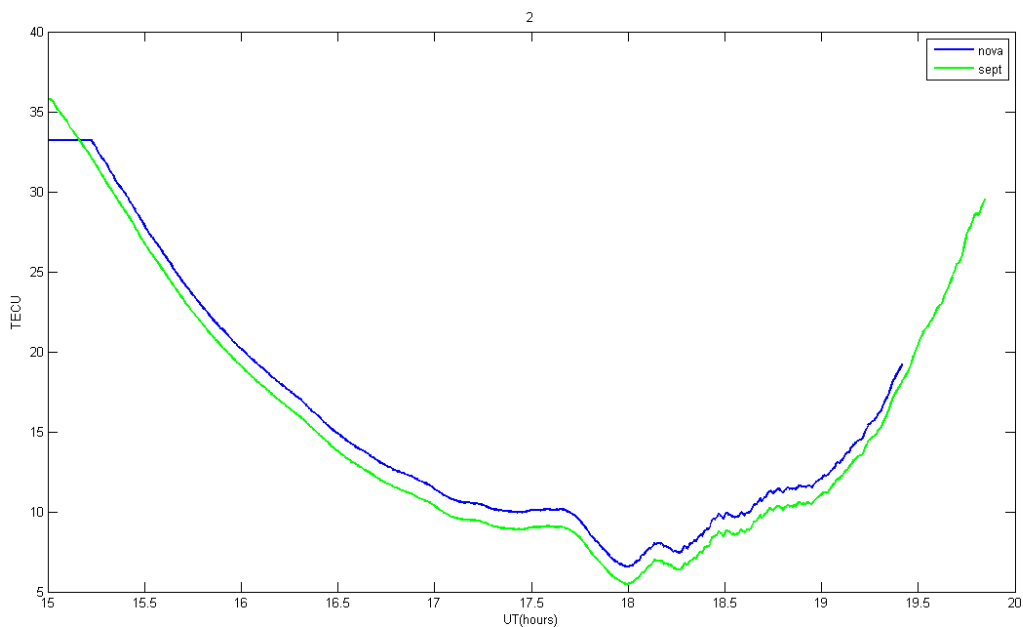


Рис. 4 График зависимости наклонного ПЭС от времени 2 апреля 2016 года для спутника с номером 2

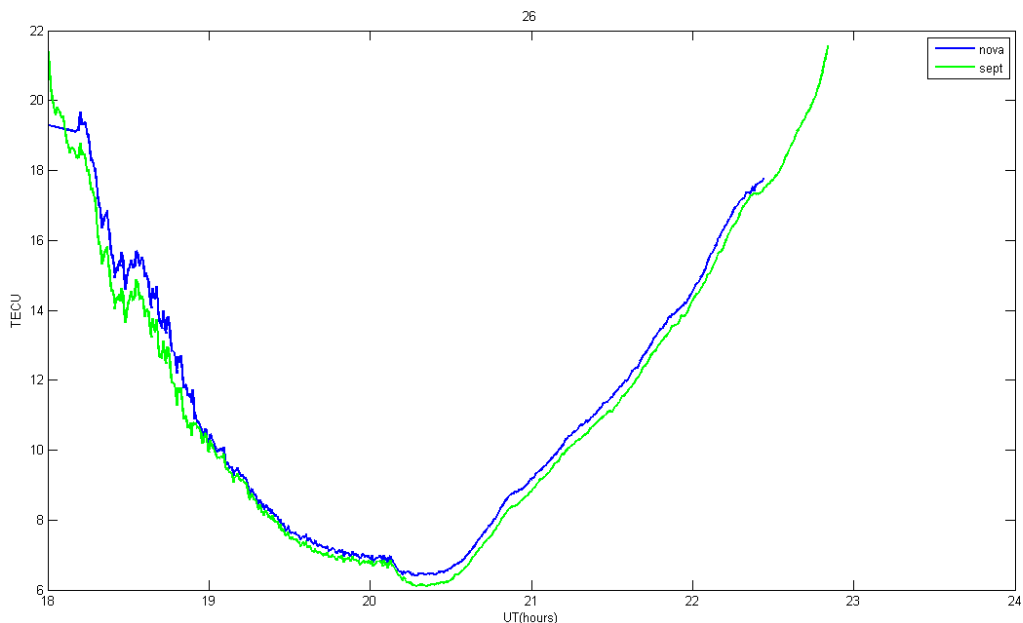


Рис. 5 График зависимости наклонного ПЭС от времени 2 апреля 2016 года для спутника с номером 26

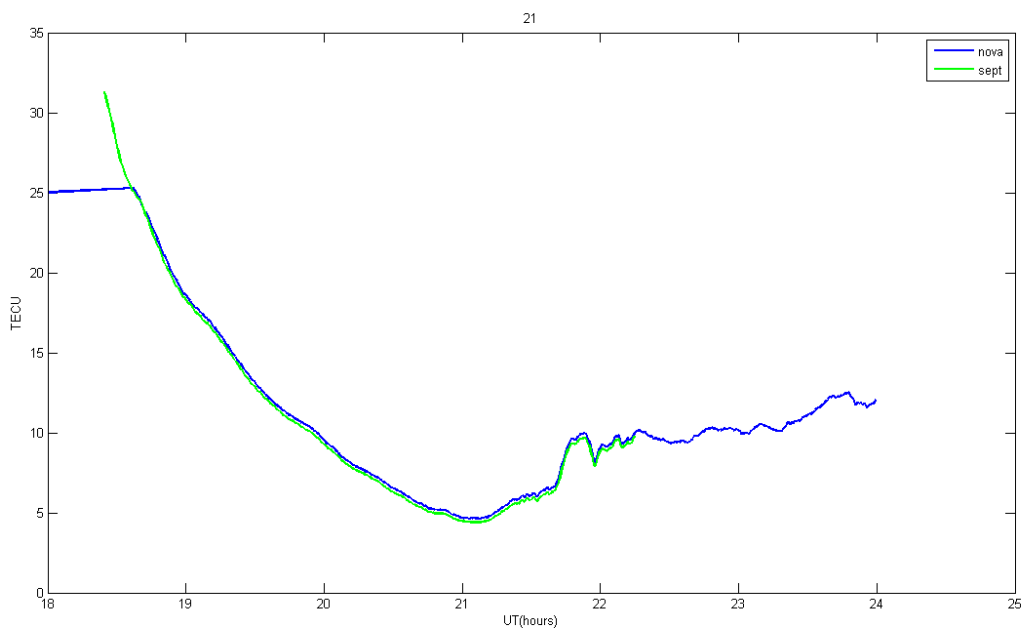


Рис. 6 График зависимости наклонного ПЭС от времени 2 апреля 2016 года для спутника с номером 21

Как мы видим в промежуток времени с 17 до 24 часов несколькими спутниками были зафиксированы быстрые нерегулярные изменения полного электронного содержания, это говорит о том, что это были не случайные флуктуации сигнала, а достаточно резкое изменение параметров ионосферы. Согласно интернет portalу [www.tesis.lebedev.ru](http://www.tesis.lebedev.ru) 2 апреля 2016 года в период с 18 до 24 часов была зафиксирована слабая геомагнитная буря. Геомагнитные бури являются наиболее важным источником возмущения электронной концентрации, которое, видимо, и было зафиксировано.

Из ранее представленных графиков (Рис. 2 – Рис. 6) видно, что значения ПЭС для обоих приемников близки между собой и разница не превышает в среднем 0.5TECU для вертикального ПЭС и 1TECU для наклонного ПЭС. Также видно, что значение ПЭС для приемника Septentrio всегда меньше чем у Novatel – возможно, это объясняется тем, что ошибки измерения фазы различны для этих двух приемников: ошибка у приемника с меньшим уровнем шума, вероятно, меньше.

## Глава 2. Исследование флуктуаций сигналов

Одно из наиболее сильных влияний на трансионосферные сигналы оказывают так называемые ионосферные мерцания (ionospheric scintillations). Мерцания создаются как следствие флуктуаций показателя преломления, которые вызваны неоднородностью ионосферы. Сигнал испытывает быстрые флуктуации амплитуды и фазы, кроме этого изменяются свойства временной когерентности. В основном за счет дифракции и механизмов рассеяния мелкомасштабные неоднородности в плотности ионизации вызывают мерцания, которые проявляются в том, что амплитуда, фаза и видимый угол прихода сигнала подвержены флуктуациям.

Характерным параметром, используемым для оценки флуктуации амплитуды сигнала, является индекс мерцаний,  $S_4$ , который определяется как среднеквадратичное отклонение нормированных флуктуаций интенсивности:

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}} \quad (7)$$

где  $I$  – интенсивность сигнала, а  $\langle \rangle$  – усреднение по ансамблю.

Для удобства интенсивность мерцаний можно подразделить на три режима: режим низкой интенсивности  $S_4 < 0.3$ , режим средней интенсивности  $0.3 < S_4 < 0.6$  и режим высокой интенсивности  $S_4 > 0.6$ . В случае с низкой и средней интенсивностью зависимость  $S_4$  от частоты носит характер  $f^{-\nu}$ , где  $\nu = 1.5$  в большом диапазоне частот. Кроме того, в режимах низкой интенсивности амплитуда соответствует логарифмически нормальному распределению. В режиме с высокой интенсивностью, ввиду насыщения мерцаний под влиянием сильного многократного рассеяния, наблюдается уменьшение коэффициента  $\nu$  вплоть до единицы. В связи с этим лучше использовать рэлеевское распределение. В отдельных случаях  $S_4$  может превышать 1.

Другим параметром является индекс флуктуации фазы, который является стандартным отклонением от средней фазы

$$\sigma_\phi = \sqrt{\langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2}. \quad (8)$$

Здесь  $\phi$  – детрендрованная фаза, а  $\langle \rangle$  – усреднение по ансамблю. После длительных наблюдений оказалось, что в режимах низкой и средней интенсивности параметры  $S_4$  и  $\sigma_\phi$  являются строго коррелированными и имеют близкие значения[4].

## 2.1 Исследование хода индексов флуктуаций для GPS спутников

Для обоих приемников запись данных производилась в одни и те же промежутки времени с одинаковой частотой. Поскольку приемники разных производителей, то методы записи и обработки данных различались. Далее будет пошагово описан процесс получения ионосферных мерцаний для каждого из приемников.

### Novatel

Сначала в программе «SLOG» пишется скрипт, в котором задается

- 1) имя файла, путь к файлу с данными;
- 2) набор характеристик, необходимых для корректной работы скрипта: частота приема данных, альманах, выбор навигационной системы (GPS, ГЛОНАСС) и тд;
- 3) набор выходных параметров: псевдодальность, фаза, доплеровское смещение и тд;

Все данные, полученные с помощью этой программы, записываются в файлы с расширением .gps на жесткий диск. В этих файлах вся информация записана в виде бинарного кода, поэтому необходима дальнейшая обработка файлов. Далее с помощью программы «ParseReduced» полученный файл с расширением .gps, преобразовывался в удобный для чтения текстовый массив вида (Таблица 2):

GPS TOW	PRN	Freq	SigType	Az	Elv	CNo	Lock Time	CMC Avg	CMC Std	S4	S4 Cor	1SecSigma	3SecSigma	10SecSigma	30SecSigma	60SecSigma
142500	12	0	1	130,53	26,94	48,52	17406,8	-3,928	0,071	0,068931	0,037498	0,053051	0,056148	0,058342	0,058565	0,058574
142500	5	0	1	111,31	16,51	44,31	266,058	-1,361	0,139	0,088991	0,060894	0,059459	0,062775	0,064605	0,064809	0,064807
142500	31	0	1	277,93	43,58	51,81	6476,178	-1,858	0,077	0,05557	0,025676	0,042159	0,044936	0,047302	0,047517	0,047514
142500	25	0	1	161,4	67,37	54,64	11707,39	-4,697	0,025	0,024605	0,018538	0,038862	0,044232	0,045792	0,046169	0,046162
142500	2	0	1	70,71	46,34	49,33	10154,84	-4,464	0,062	0,066156	0,034158	0,055461	0,059691	0,062374	0,062804	0,062794
142500	29	0	1	239,92	64,46	53,97	6477,146	-3,996	0,039	0,035483	0,020032	0,039986	0,044286	0,046732	0,047022	0,047028

Таблица 2 Массив данных, полученный с помощью программы «ParseReduced»

Далее рассчитывается коэффициент  $S_4$  corrected по формуле:

$$X = S_4^2 - S_{4\text{ cor}}^2, S_{4\text{ corrected}} = \begin{cases} \sqrt{X} & \text{if } X > 0 \\ 0 & \text{if } X < 0 \end{cases} \quad (9)$$

который соответствует значению амплитудных мерцаний, не включающих шумовые составляющие, определяемые индексом  $S_{4\text{ cor}}$  [5].

Затем с помощью «Matlab» производился отбор по номеру спутника и строились графики зависимости ионосферных мерцаний фазы и амплитуды от времени (Рис. 7):

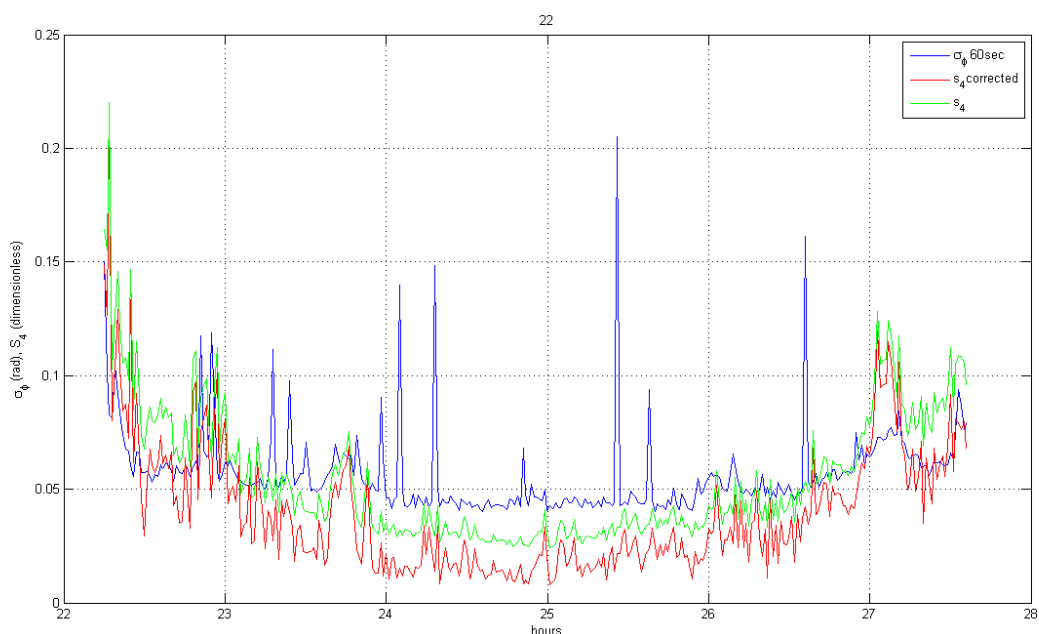


Рис. 7 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени, полученных при помощи приемника Novatel 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 22

Из графика видно, что в рассматриваемые сутки наблюдается низкий режим интенсивности мерцаний ( $S_4 < 0.3$ ). Однако на графике присутствуют резкие скачки индекса фазы. Путем синхронного во времени анализа данных выяснилось, что у приемника Novatel имеется существенный недостаток, а именно: при появлении или исчезании одного спутника из зоны «видимости» приемника, наблюдаются синхронные скачки индекса фазы, которые хорошо заметны при анализе данных с других спутников. Для наглядности, на примере спутника с номером 3, был выбран двухчасовой период со скачками фазы в моменты времени 25.42, 25.63, 26.15, 26.6, 29.92 часа (Рис. 8):

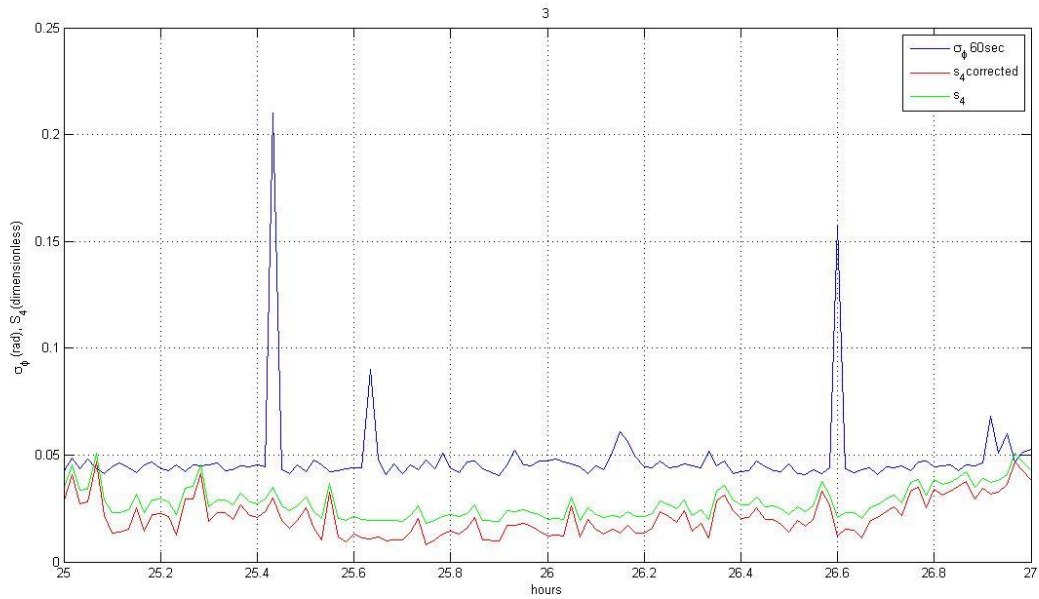


Рис. 8 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени для двухчасового периода, полученный при помощи приемника Novatel 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 3

У спутника с номером 22 имеются точно такие же скачки индекса фазы, как у спутника 3 (Рис. 9):

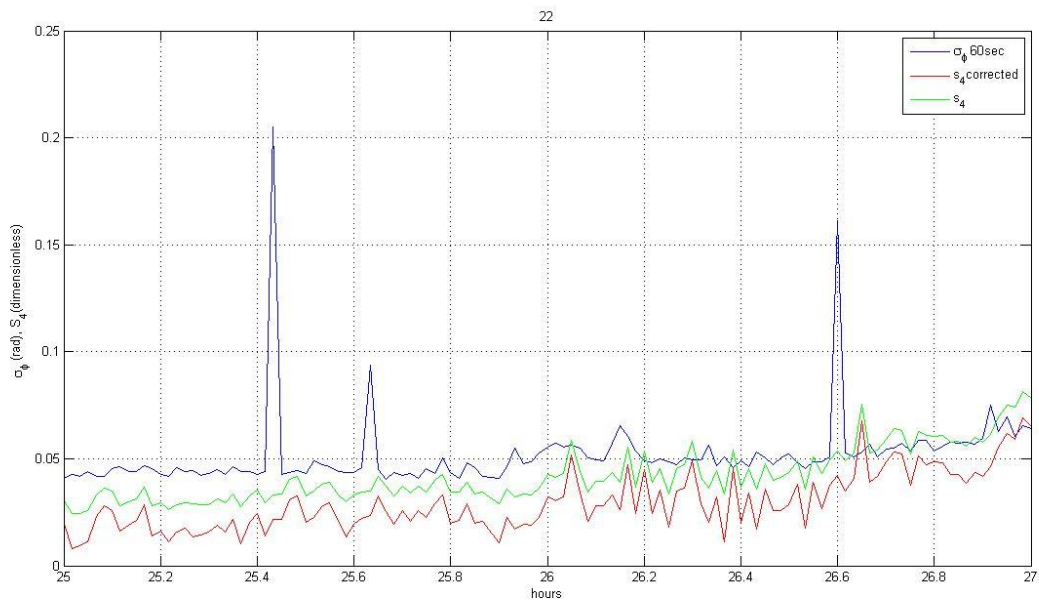


Рис. 9 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени для двухчасового периода, полученный при помощи приемника Novatel 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 22

Первый пик в момент времени 25.42 возникает вследствие ухода спутника с номером 32 из зоны «видимости» (Рис. 10):

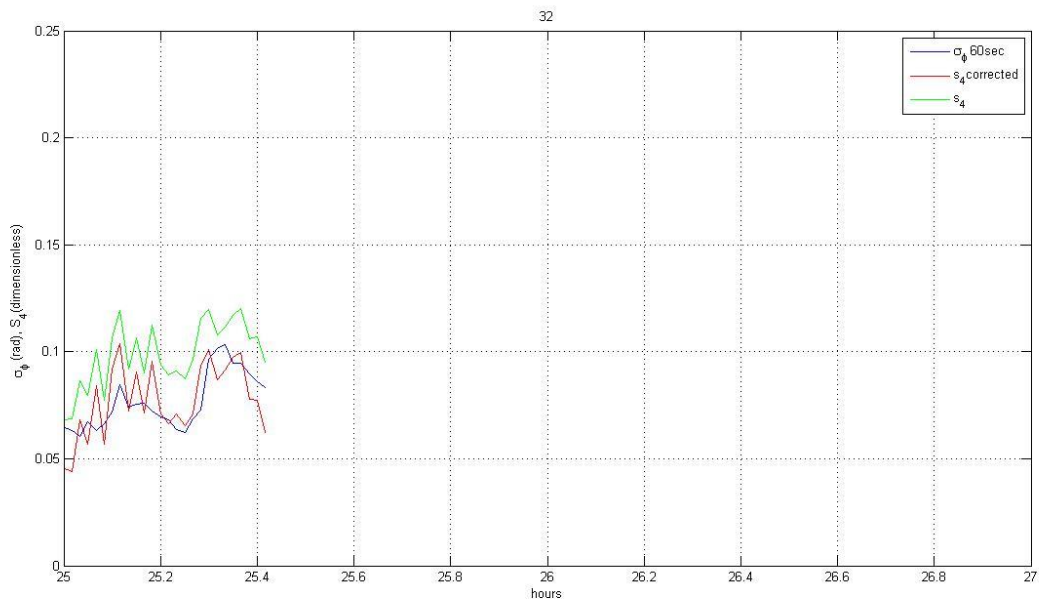


Рис. 10 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени для двухчасового периода, полученный при помощи приемника Novatel 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 32

Пик в момент времени 25.63 соответствует появлению спутника с номером 6 (Рис. 11):

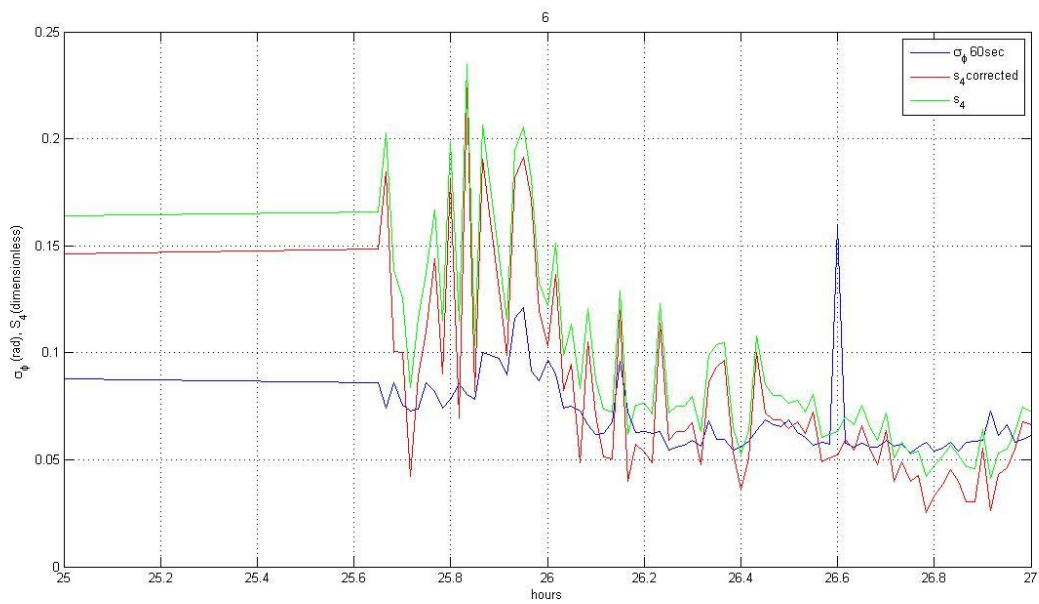


Рис. 11 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени для двухчасового периода, полученный при помощи приемника Novatel 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 6

Прямые линии до момента 25.63 часа соответствуют тому, что данный спутник был ранее в зоне видимости приемника в исследуемые сутки и являются простым сшиванием двух точек для сохранения целостности графика.



Пик в момент времени 26.15 соответствует появлению спутника с номером 9 (Рис. 12):

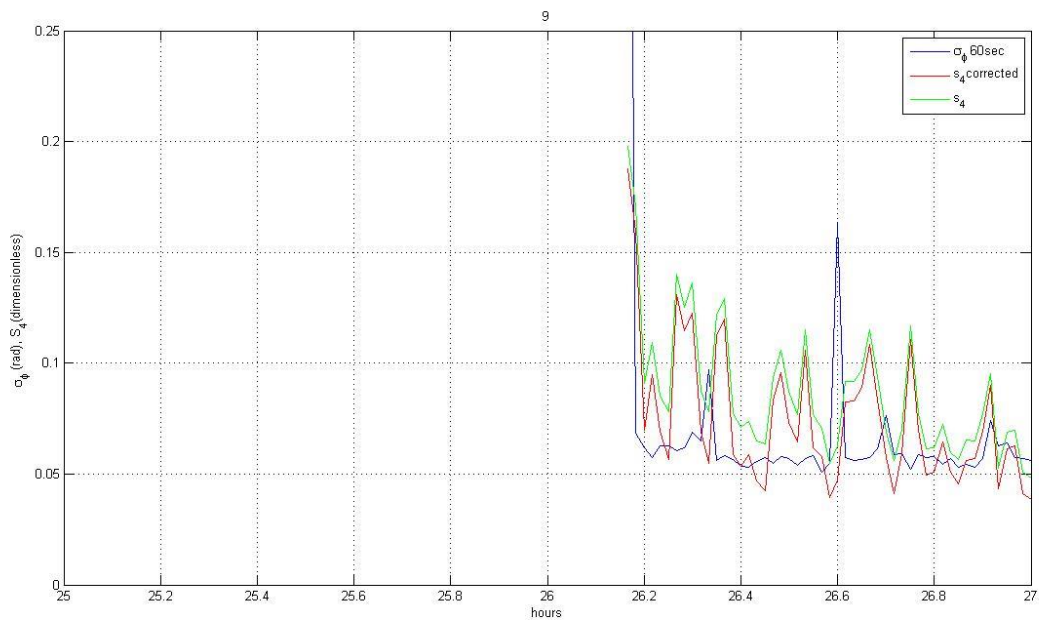


Рис. 12 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени для двухчасового периода, полученный при помощи приемника Novatel 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 9

Пик в момент времени 26.6 соответствует уходу из зоны «видимости» приемника спутника с номером 1 (Рис. 13):

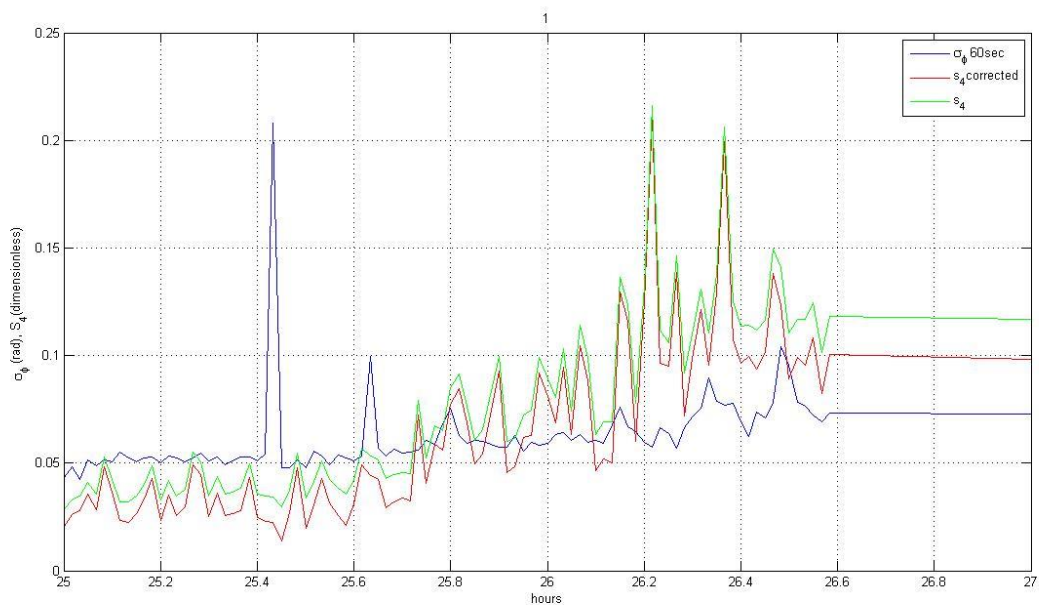


Рис. 13 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени для двухчасового периода, полученный при помощи приемника Novatel 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 1

Последний, самый слабый, пик в момент времени 29.92 соответствует появлению спутника с номером 26 (Рис. 14):

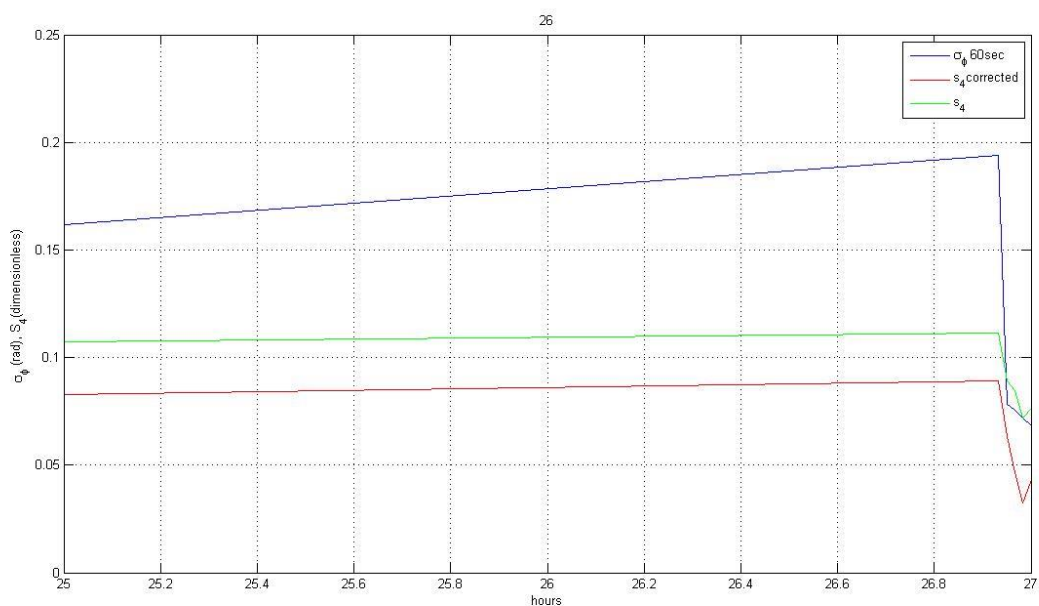


Рис. 14 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени для двухчасового периода, полученный при помощи приемника Novatel 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 26

Так же было замечено, что иногда скачков коэффициентов фазы не наблюдалось: в момент времени 26.3 часа спутник с номером 14 вышел из зоны видимости, но скачка не последовало (Рис. 15):

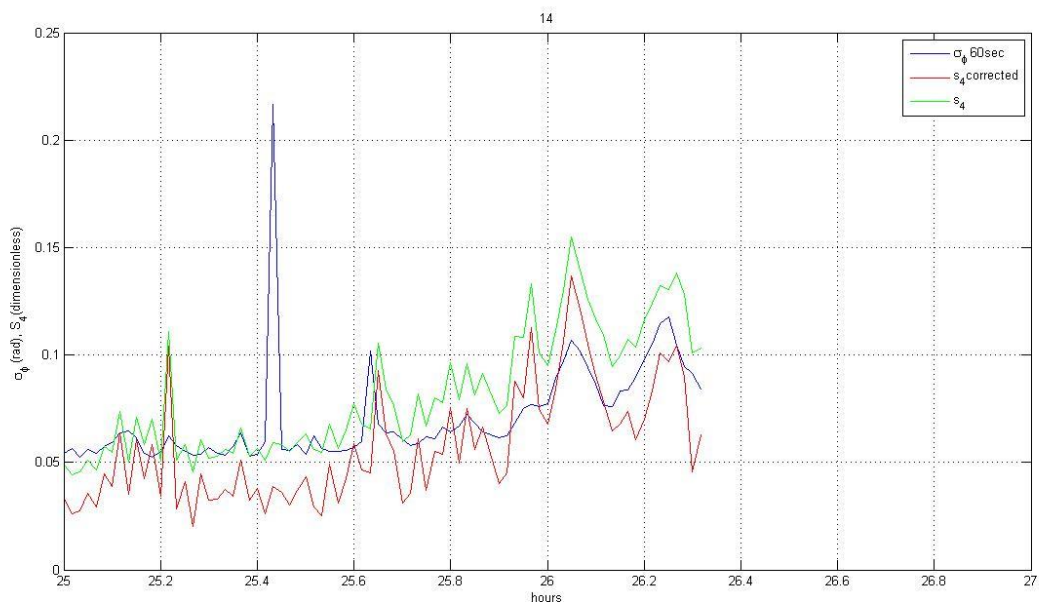


Рис. 15 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени для двухчасового периода, полученный при помощи приемника Novatel 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 14

Рассмотрим более подробно скачок индекса флуктуации фазы в момент времени 25.42 часа. Для этого использовался временной ряд фазы, полученный программой «ParseRaw». В момент ухода спутника с номером 32, детрендрованная фаза для спутника с номером 3 ведет себя следующим образом (Рис. 16):

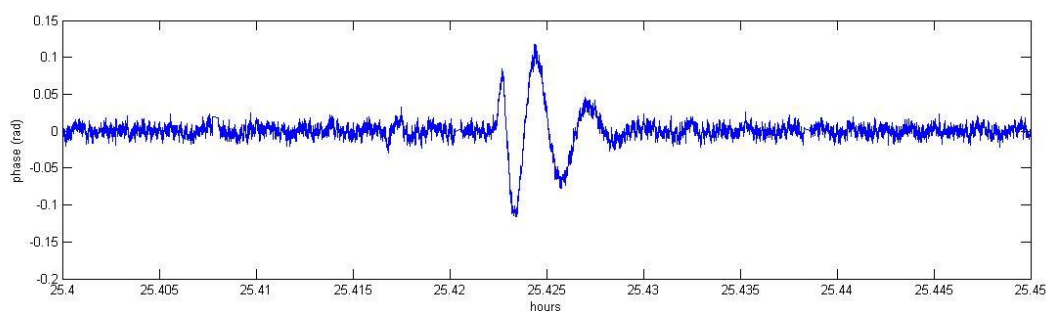


Рис. 16 График зависимости детрендрованной фазы от времени в момент ухода спутника с номером 32 из зоны «видимости» приемника Novatel для спутника с номером 3

Это можно объяснить тем, что фильтр верхних частот, с помощью которого производилось детрендрование данных, имеет частоту среза 0.1Гц, и наблюдаемые на графике осцилляции с периодом порядка 10 секунд могут быть объяснены переходным процессом после реакции фильтра на скачок фазы, который возможно произошел в момент изменения числа спутников в зоне «видимости» приемника. Наличие таких больших отклонений фазы от среднего значения, естественно, приводит к большим значениям вычисляемого индекса флуктуаций фазы.

Ещё одним недостатком данного приемника является то, что в высокочастотном режиме работы(50Гц) иногда происходят секундные пропуски данных. Ниже приведены графики пропуска данных для спутников с номерами 1 и 3 (Рис. 17):

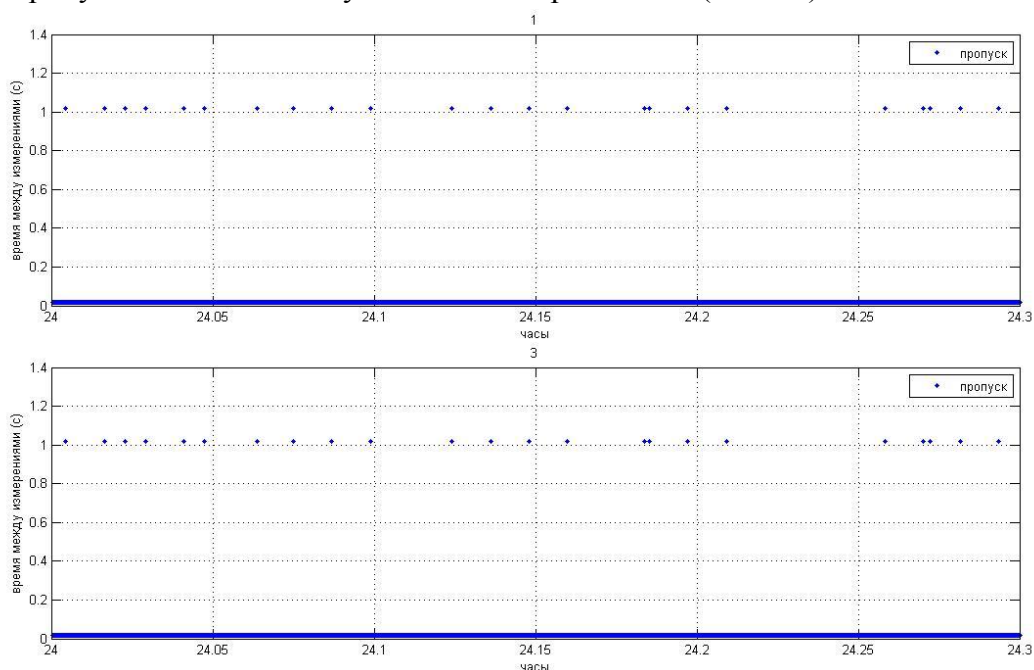


Рис. 17 Точечный график, показывающий наличие секундных пропусков данных для спутника с номером 1(сверху) и 3(снизу), полученных при помощи приемника Novatel.

Полоса снизу соответствует интервалу между измерениями в 0.02 секунды, точки же на уровне 1 соответствуют секундным пропускам между измерениями. Из графиков видно, что пропуски всегда происходят одновременно для всех спутников и длительность интервалов между пропусками есть случайная величина. Несмотря на это, на общую картину они практически не влияют, так как теряется не больше 3% измерений. Причина пропуска данных остается неизвестной и требует дальнейшего анализа. Однако эти пропуски негативно сказываются при проведении спектрального анализа сигнала, для которого требуются непрерывные измерения без пропусков отсчётов.

## Septentrio

Для этого приемника способ получения текстового файла с интересующими нас данными несколько проще. С помощью встроенного интерфейса задаем все параметры которые необходимы для получения коэффициентов мерцаний. После записи файла, содержащего бинарный код, с помощью программы «SBF Analyzer» можно сразу наблюдать за ходом коэффициентов мерцаний (Рис. 18):



Рис. 18 График зависимостей индексов мерцаний от времени, полученных с помощью «SBF Analyzer» 24 апреля 2017 года для спутника с номером 5

Однако для дальнейшего анализа нам все равно понадобится «Matlab», поэтому использовался конвертер, который автоматически преобразовал полученный файл в текстовый массив вида (Таблица 3):

WN	TOW	SVID	Azimuth	Elevation	C/N0	Total S4	S4 cor	Phi01	Phi03	Phi10	Phi30	Phi60
1946	172980	1	250,6	70,1	53,2	0,021	0,022	0,018	0,022	0,024	0,024	0,024
1946	172980	3	257,3	34,8	45,9	0,078	0,051	0,023	0,026	0,028	0,028	0,028
1946	172980	8	198,7	8,8	41,1	0,117	0,088	0,038	0,044	0,058	0,058	0,06
1946	172980	10	85,3	13	40,2	0,119	0,098	0,037	0,041	0,043	0,043	0,043
1946	172980	11	209,4	53,9	49,6	0,03	0,033	0,016	0,021	0,023	0,023	0,023
1946	172980	14	105,8	60,4	49,3	0,035	0,034	0,015	0,019	0,022	0,022	0,023
1946	172980	17	318,9	25,6	45,4	0,048	0,054	0,019	0,024	0,027	0,028	0,028
1946	172980	22	245,8	62,9	50	0,032	0,032	0,012	0,018	0,021	0,022	0,022
1946	172980	24	11,2	4,8	35,7	0,153	0,165	0,055	0,079	0,102	0,106	0,109
1946	172980	28	282	3,9	32,8	0,266	0,23	0,069	0,073	0,075	0,075	0,076
1946	172980	32	70,1	47,5	50,1	0,037	0,031	0,018	0,022	0,025	0,025	0,025

Таблица 3 Массив данных, полученный с помощью программы «sbf2ismr»

Далее строились графики зависимости индексов мерцаний от времени (Рис. 19):

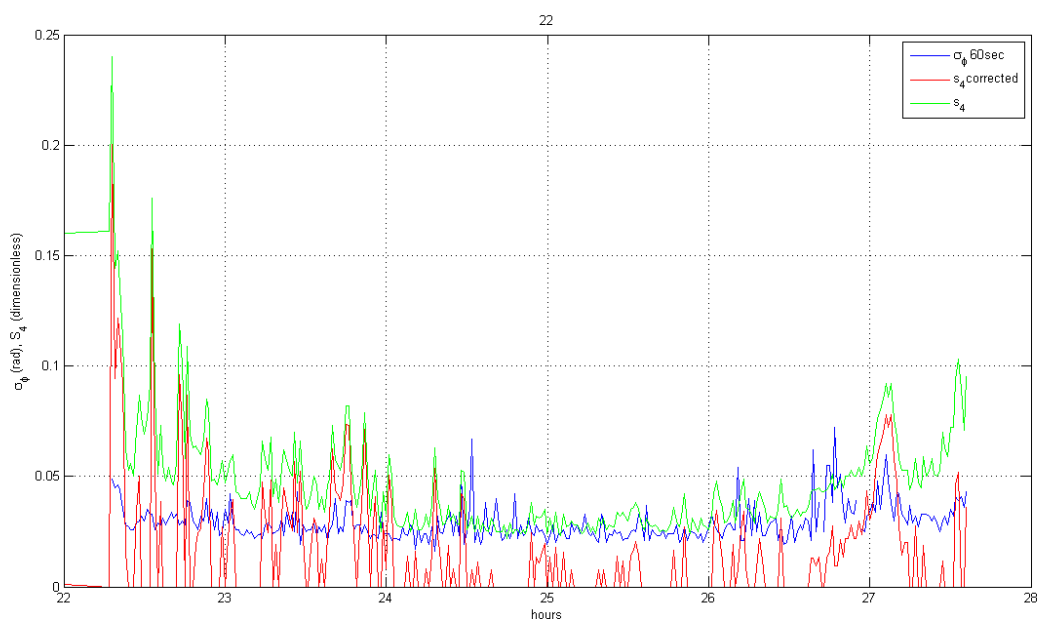


Рис. 19 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени, полученных при помощи приемника Septentrio 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 22

Сразу же бросается в глаза значение коэффициента  $S_4$  corrected: значение шума зачастую больше чем значение коэффициента  $S_4$ . Это явно нефизическое явление, а ошибка, связанная с расчетом шумов приемника, поскольку значения индекса амплитуды  $S_4$  (с учетом шумов) вполне адекватные, то дальнейший анализ будет проводиться именно для этого индекса.

Следует заметить, что нефизических пиков, в отличие от приемника Novatel не наблюдается, а, возможно из-за особенностей конструкции приемника Septentrio, значение коэффициентов мерцания несколько меньше.

## 2.2 Исследование хода индексов флуктуаций для геостационарных спутников

Представляет интерес также наблюдение за ходом индексов ионосферных мерцаний для геостационарных спутников. Данные были получены с помощью приемника Septentrio (к сожалению, для приемника Novatel аналогичные данные получить не удалось).

В зоне видимости приемника находились три геостационарных спутника с номерами: **120** (az. 229°24' el. 12°12'), **123** (az. 178° el. 22°6'), **127** (az. 151°24' el. 18°42'). Поскольку геостационарные спутники не двигаются относительно Земли, то движение спутника не оказывает влияние на временной ход фазы. Следует отметить так же, что чем ниже угол наклона к горизонту, тем большее расстояние сигнал проходит через ионосферу и в связи с этим испытывает более сильные флуктуации. Так же увеличение амплитуды флуктуаций связано с тем, что высота геостационарной орбиты порядка 36000км, что почти в 2 раза больше по отношению к высоте орбиты с GPS спутниками.

Итак, обработав полученные данные получаем картину для спутника 120 (Рис. 20):

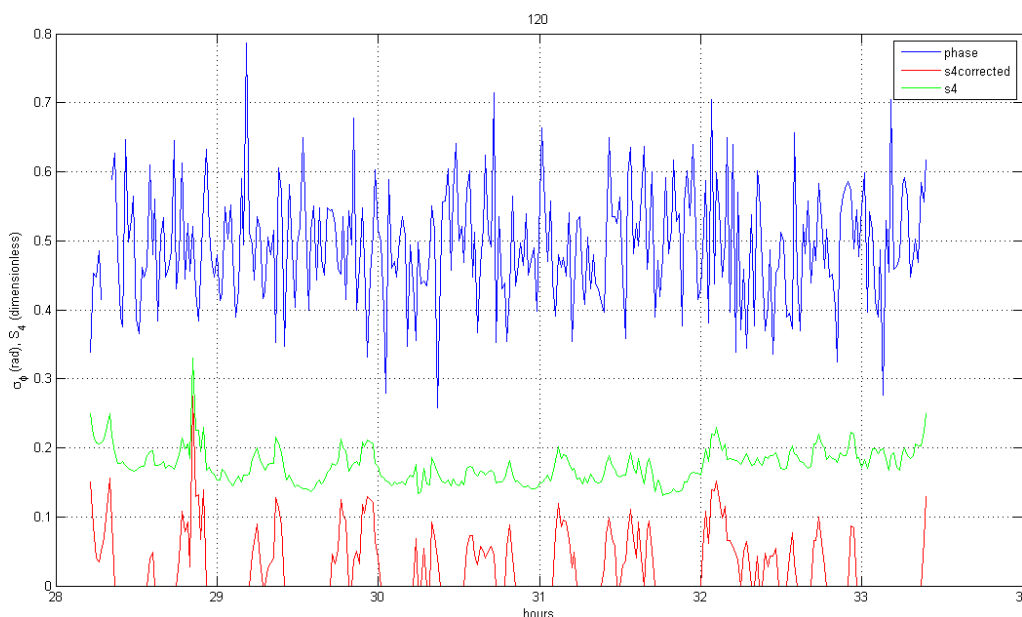


Рис. 20 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени, полученных при помощи приемника Septentrio 24-25 апреля 2017 года для геостационарного спутника с номером 120

и для спутника 127 (Рис. 21):

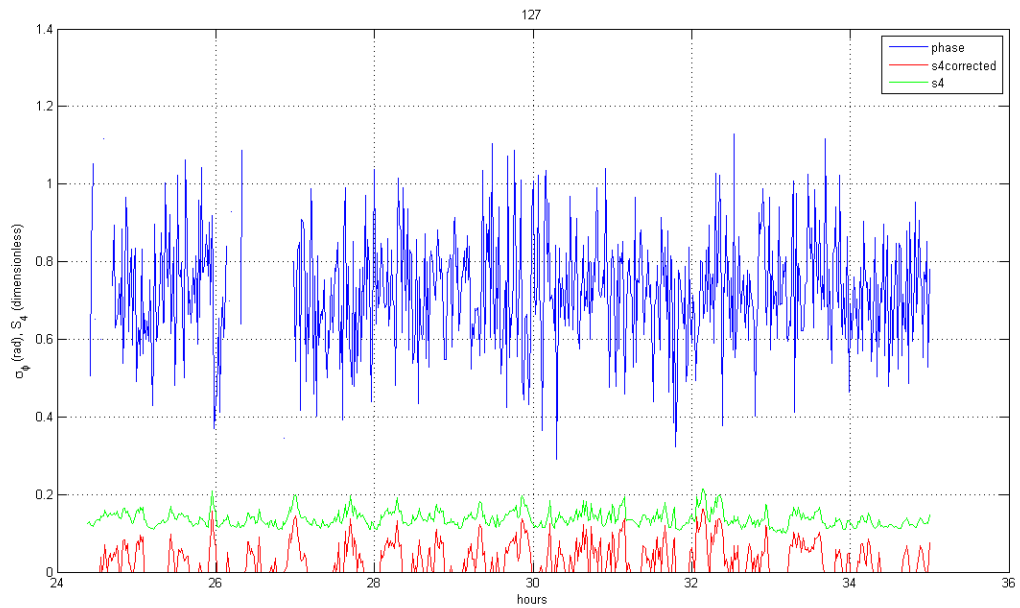


Рис. 21 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени, полученных при помощи приемника Septentrio 24-25 апреля 2017 года для геостационарного спутника с номером 127

Откуда видим, что значение индекса мерцания фазы на порядок больше чем у GPS спутников, а амплитуда индекса мерцания фазы иногда достигает значений 0.2-0.3 радиан, что достаточно много. Такие большие значения можно объяснить довольно низким углом наклона к горизонту. Если сравнить значения индекса мерцания амплитуды этих геостационарных спутников и GPS спутников, то получаются схожие значения, так как при исследовании GPS спутников была использована маска, которая не учитывала измерения в которых угол наклона к горизонту был меньше  $15^\circ$ . На представленных ранее графиках видно, что в начале и в конце измерений значение  $S_4$  зачастую достигает значения 0.2 и более.

Для 123 спутника картина выглядит иначе (Рис. 22):

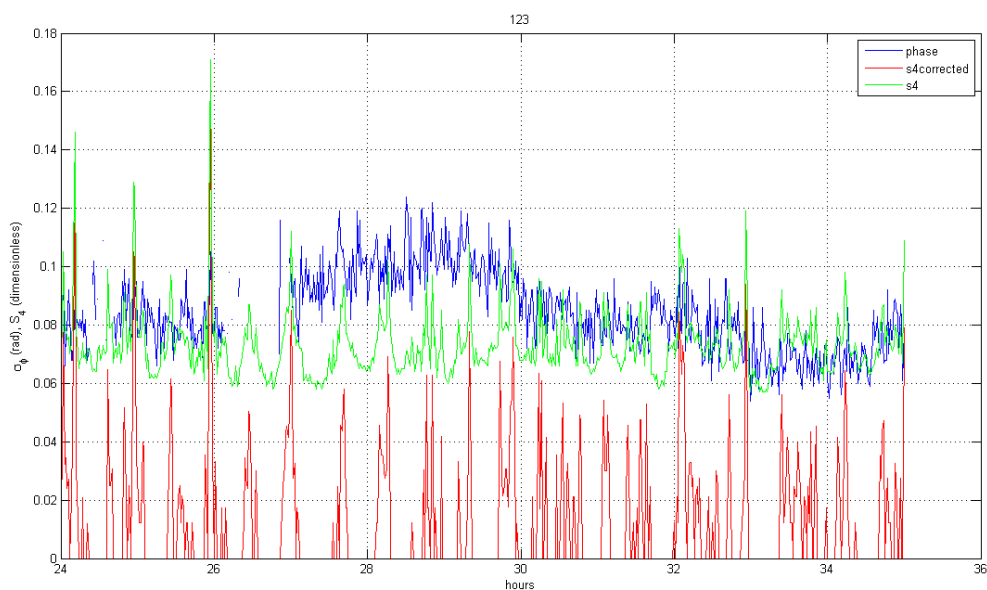


Рис. 22 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний от времени, полученных при помощи приемника Septentrio 24-25 апреля 2017 года для геостационарного спутника с номером 123

Поскольку угол к горизонту для данного спутника несколько выше (~23°), то и значения индексов флуктуаций для геостационарных спутников уже получаются соизмеримыми с аналогичными индексами для GPS спутников. Значения получаются чуть больше так как сигнал проходит большее расстояние до спутника.

Подведем итоги. Для обоих приемников были получены индексы мерцания ионосферы, однако у каждого приемника есть свои недостатки: у Novatel это секундные пропуски данных, а также искажения фазы в момент изменения количества спутников в зоне «видимости»; у Septentrio это некорректный внутренний расчет коэффициента  $S_4 \text{ cor}$ , вследствие чего невозможен дальнейший анализ при рассмотрении коэффициента  $S_4 \text{ corrected}$ , а так же при рассмотрении геостационарных спутников возникают пропуски данных при вычислении индекса мерцания фазы.

### **2.3 Исследование корреляции индексов флуктуаций, полученных на разных приёмниках**

В соответствии с определениями индексов флуктуаций фазы и амплитуды (7-8), они представляют собой оценки среднеквадратичного отклонения соответствующих случайных величин. Поскольку флуктуации амплитуды и фазы включают в себя не только искажения сигнала за счёт флуктуаций среды распространения, но также и ошибки за счет многолучевости принимаемого сигнала и наличия шумовой составляющей, то в данной части работы будет проведено исследование относительной роли этих мешающих факторов при исследовании статистических характеристик наблюдаемых сигналов.

В первую очередь, сравним зависимость от времени индексов флуктуаций, полученных при использовании двух имеющихся независимых приёмников, антенны которых разнесены на небольшое расстояние. Эффекты флуктуаций, порождённых атмосферными неоднородностями должны при этом демонстрировать схожие зависимости.

Проведя анализ ранее полученных данных, можно заметить, что для обоих приемников значения индексов ионосферных мерцаний ведут себя схоже при рассмотрении одинаковых спутников (Рис. 23):



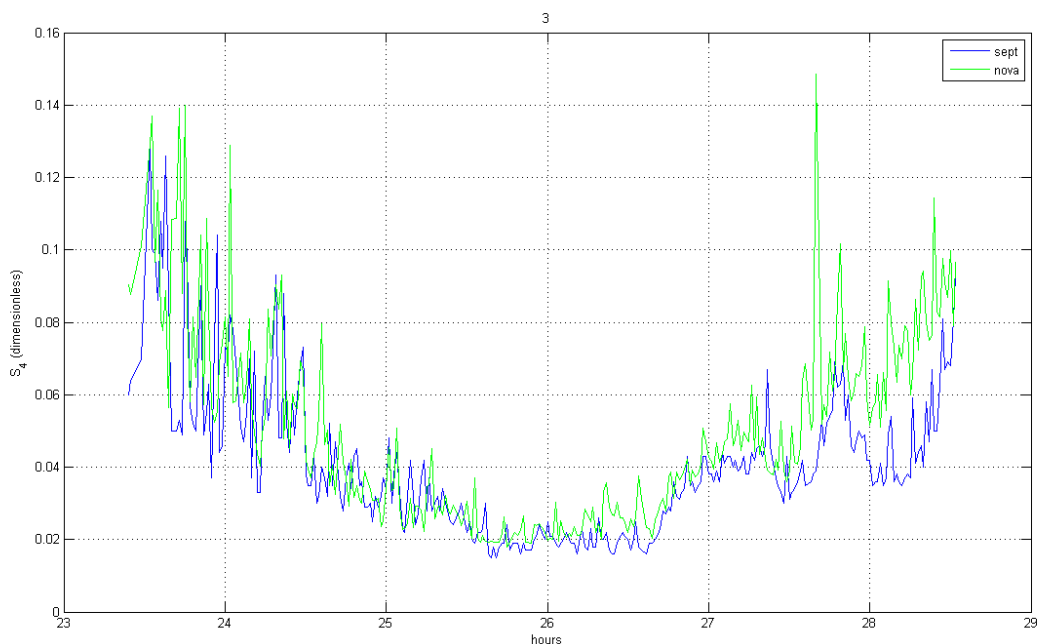


Рис. 23 График зависимостей индексов ионосферных мерцаний амплитуды от времени, полученных при помощи приемника Septentrio 24-25 апреля 2017 года для спутника с номером 3

Исходя из этого интересно проанализировать, являются ли сигналы, полученные разными приёмниками независимыми случайными функциями, или имеется некая закономерность, показывающая, что полученные данные являются следствием изменчивости ионосферы, а не случайной величиной.

Для этого было решено найти коэффициенты корреляции между значениями параметра  $S_4$  для обоих приемников. С помощью «Matlab» была написана программа, при помощи которой производился отбор данных только в те моменты времени, когда спутники с одинаковыми номерами находились в зоне видимости обоих приемников одновременно, затем из данных убирался тренд, соответствующий изменению угла возвышения спутника со временем, и оставлялась лишь высокочастотная составляющая. После этого для каждого спутника вычислялись коэффициенты корреляции между высокочастотными составляющими индексов амплитуды и фазы ионосферных мерцаний (Таблица 4):

№ спут	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
К ампл	0,244	0,414	0,127	0	0,059	0,213	0,112	0,309	0,138	0,295	0,201	0,052	0,539	0,391	0,095	0,187
К фаз	0,342	0,243	0,245	0	0,061	0,121	0,125	0,027	0,407	0,337	0,051	0,129	0,242	0,124	0,156	0,095
№ спут	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
К ампл	0,032	0,174	0,368	0,337	0,246	0,143	0,282	0,012	0,063	0,252	0,235	0,278	0,142	0,219	0,157	0,171
К фаз	0,069	0,089	0,113	0,095	0,056	0,087	0,147	0,494	0,205	0,262	0,235	0,235	0,109	0,084	0,122	0,181

Таблица 4 Полученные коэффициенты корреляции для флуктуаций индексов мерцаний амплитуды и фазы

Спутник с №4 никогда не появляется в зоне «видимости», поэтому его коэффициенты корреляции равны нулю.

Несмотря на то, что замеры производились на разных антеннах и приемниках соответственно, можно сказать, что корреляция присутствует, но она достаточно высока ( $> 0.2$ ) лишь для отдельных спутников, что соответствует тому, что оба приемника фиксировали одинаковые изменения индексов фазы и амплитуды более чем в 20% выбранного промежутка времени. В остальное время флуктуаций, возможно, просто нет, поэтому в это время индексы определяются исключительно шумовыми составляющими сигналов, которые не коррелируют друг с другом. Из этого можно сделать вывод, что приемники фиксируют не случайный шум, а изменения, происходящие в ионосфере.

## 2.4 Анализ спектров флуктуаций

Для того, чтобы оценить уровень шума полученных сигналов и наличие «полезной» (т.е. содержащей информацию о среде распространения сигнала) составляющей был проведен спектральный анализ для фазы и амплитуды. Необходимо было выбрать временной отрезок длиной порядка 10 минут и несколько спутников, находящихся в зоне видимости обоих приемников.

С помощью программ «*sb2ismr*» и «*ParseRaw*» для приемников Septentrio и Novatel соответственно были получены текстовые файлы, содержащие массивы «сырых» данных фазы и амплитуды сигнала. Далее путем обработки полученных массивов в «*Matlab*» первым делом убирался «тренд», затем детрендированные временные ряды получались путем вписывания в исходный временной ряд полинома  $n$ -ой степени с помощью метода наименьших квадратов (МНК), а затем для фазы – вычитания его из исходной величины, а для амплитуды – делением на соответствующий полином. Для того, чтобы выбрать степень вписываемого полинома, были проведены пробные расчеты с использованием полиномов различных степеней. Поскольку начиная с некоторого значения, повышение степени полинома не приводит к улучшению результата, то для оценки фазы был выбран полином четвертой степени, для амплитуды оказалось достаточно первой степени. Оценки спектра фазы и амплитуды получаются методом Уэлча, идея которого состоит в образовании псевдоансамбля периодограмм за счет разбиения наблюдаемых данных на перекрывающиеся сегменты и обработки каждого сегмента с помощью окна данных. Если запись комплексных данных  $x(n)$ ,  $0 \leq n \leq N - 1$  разбита на  $P$  сегментов по  $D$  отсчетов в каждом со сдвигом  $S$  отсчетов между соседними сегментами ( $S \leq D$ ), то максимальное число сегментов  $P$  есть целая часть величины  $(N - D)/S + 1$ . После взвешивания окном  $w(n)$ , сегмент с номером  $p$  ( $0 \leq p \leq P - 1$ ) будет содержать отсчеты  $x^{(p)}(n) = w(n)x(n + pS)$ ,  $0 \leq n \leq D - 1$ . Выборочный спектр  $p$ -го сегмента определяется выражением,  $\tilde{P}_{xx}^{(p)}(f) = \frac{1}{UDT} X^{(p)}(f) [X^{(p)}(f)]^* = \frac{1}{UDT} |X^{(p)}(f)|^2$ , где  $X^{(p)}(f) = T \sum_{n=0}^{D-1} x^{(p)}(n) e^{-i2\pi f n T}$  – дискретно-временное преобразование Фурье сегмента,  $U = T \sum_{n=0}^{D-1} w^2(n)$  – энергия окна. Среднее значение сегментных периодограмм определяет оценку спектральной плотности мощности:  $\tilde{P}_{xx}(f) = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} \tilde{P}_{xx}^{(p)}(f)$  [6]. Применение весовой функции  $w(n)$  позволяет ослабить

растекание спектра ценой незначительного ухудшения разрешающей способности. Перекрывание фрагментов введено для того, чтобы увеличить их число и уменьшить дисперсию оценки.

Ниже в двойном логарифмическом масштабе приведены полученные спектры фазы и амплитуды сигнала нескольких спутников для приемников Septentrio и Novatel слева и справа соответственно (Рис. 24)

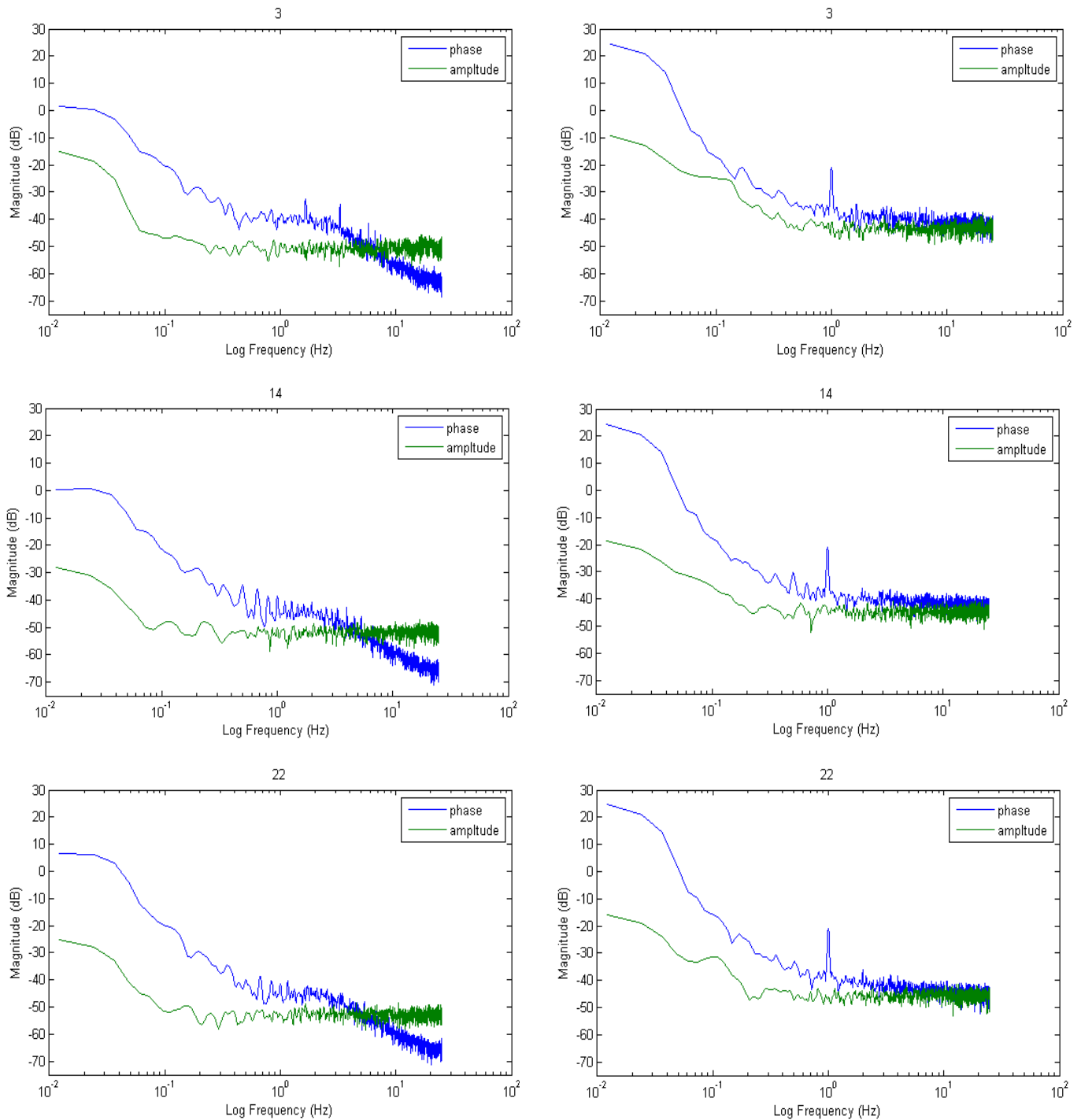


Рис. 24 Спектры фазы(синий) и амплитуды(зеленый) сигнала нескольких спутников (№3 сверху, №14 в середине, №22 снизу) для приемников Septentrio и Novatel слева и справа соответственно

Все приведённые спектры в области низких частот (до  $\sim 0.2-0.3$  Гц) убывают с ростом частоты, эта зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией, что соответствует степенному характеру убывания спектров. В высокочастотной части спектры амплитуды не имеют зависимости от частоты и представляют собой горизонтальную шумовую «дорожку». Спектры фазы в области высоких частот имеют шумовой характер и уменьшаются с ростом частоты, но ведут себя по-разному. Далее эти особенности будут проанализированы более подробно.

Проанализируем спектр амплитуды для спутника с номером 14 (Рис. 25):

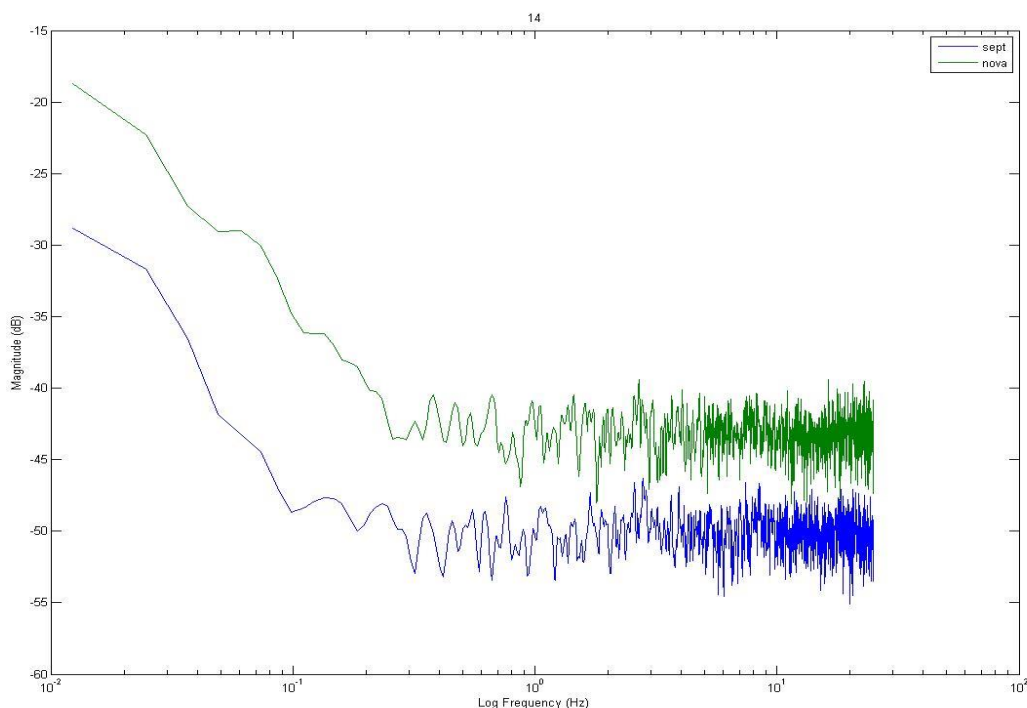


Рис. 25 Спектры амплитуды сигналов для спутника с номером 14, полученные с помощью приемников *Septentrio*(синий) и *Novatel*(зеленый)

Из полученного графика видно, что, начиная с частоты примерно 0.3 Гц и выше спектр представляет собой, фактически, белый шум с равномерным спектром. Также следует обратить внимание на то, что низкочастотные составляющие спектров имеют практически одинаковый угол наклона, а спектры в целом смещены по вертикали друг относительно друга. Это связано с тем, что размах флуктуаций амплитуды сигнала для приемника Novatel после детрендинга по абсолютной величине была в среднем в 2-3 раза больше, чем у Septentrio, а это означает что шумовая составляющая для приемника Novatel больше, и поэтому полезная составляющая имеет большую амплитуду, что видно из спектра амплитуды сигнала.

Для других спутников картина выглядит аналогичным образом (Рис. 26):

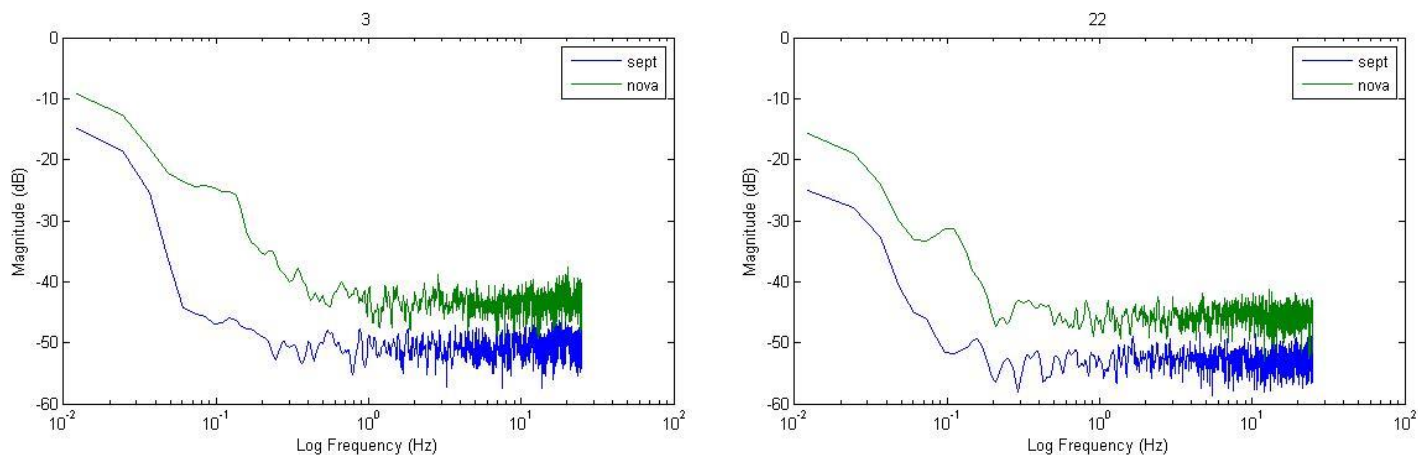


Рис. 26 Спектры амплитуды сигналов для спутников с номерами 3(слева) и 22(справа), полученные с помощью приемников Septentrio(синий) и Novatel(зеленый)

Различие уровней шума можно объяснить все тем же новым кристаллическим осциллятором в приемнике Septentrio, благодаря которому уровень шума у данного приемника несколько ниже и соответственно данные должны быть более точными, что мы и наблюдали в предыдущих частях работы.

Проведем такой же анализ для спектра фазы (Рис. 27):

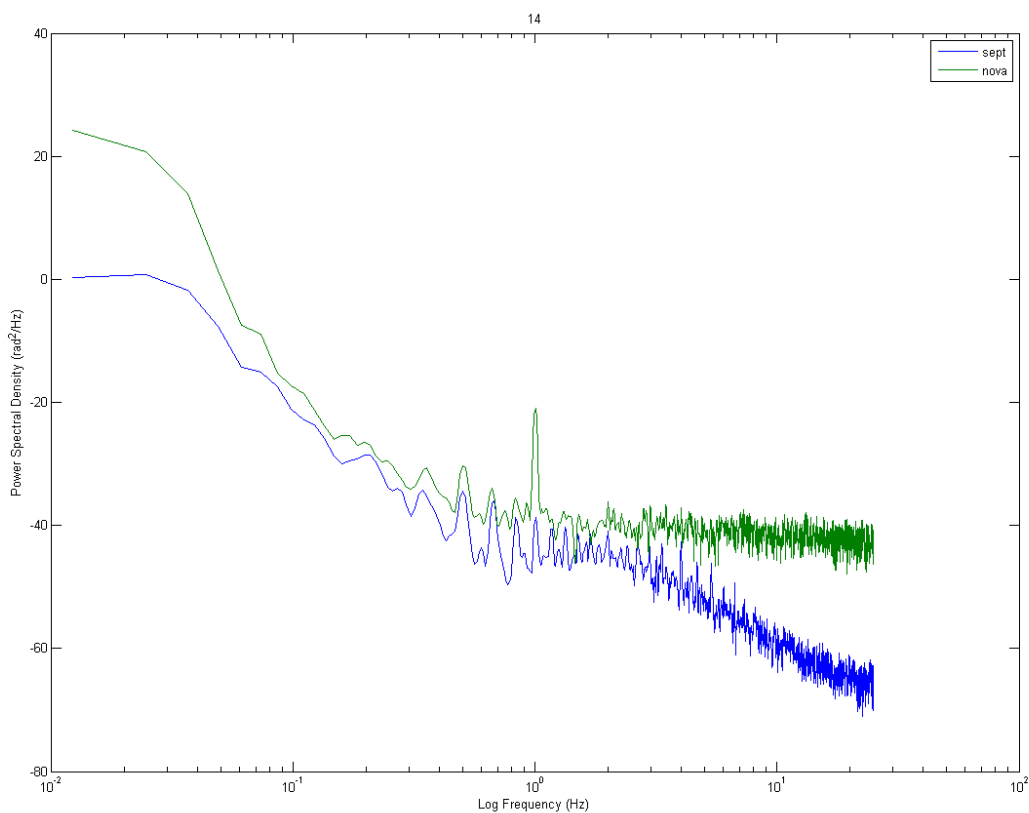


Рис. 27 Спектры фазы сигналов для спутника с номером 14, полученные с помощью приемников Septentrio(синий) и Novatel(зеленый)

Видно, что для приемника Novatel, сигнал практически так же, как и при анализе спектра амплитуды, переходит в шум, начиная с частоты около 1 Гц. Для Septentrio же видно, что, начиная с частоты 2-3 Гц, фазовый спектр продолжает уменьшаться с увеличением частоты. Это происходит потому, что фаза выходного сигнала в приёмниках считывается с выхода цепи фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которая является системой автоматического отслеживания фазы, работающая благодаря наличию отрицательной обратной связи [7]. Частотная характеристика этой цепи эквивалентна коэффициенту передачи фильтра низких частот. Разные системы ФАПЧ, применённые в приёмниках, имеют разные частотные характеристики, что и наблюдается на приведённых спектрах.

Спектры флуктуаций фазы, полученные от других спутников, ведут себя таким же образом (Рис. 28):

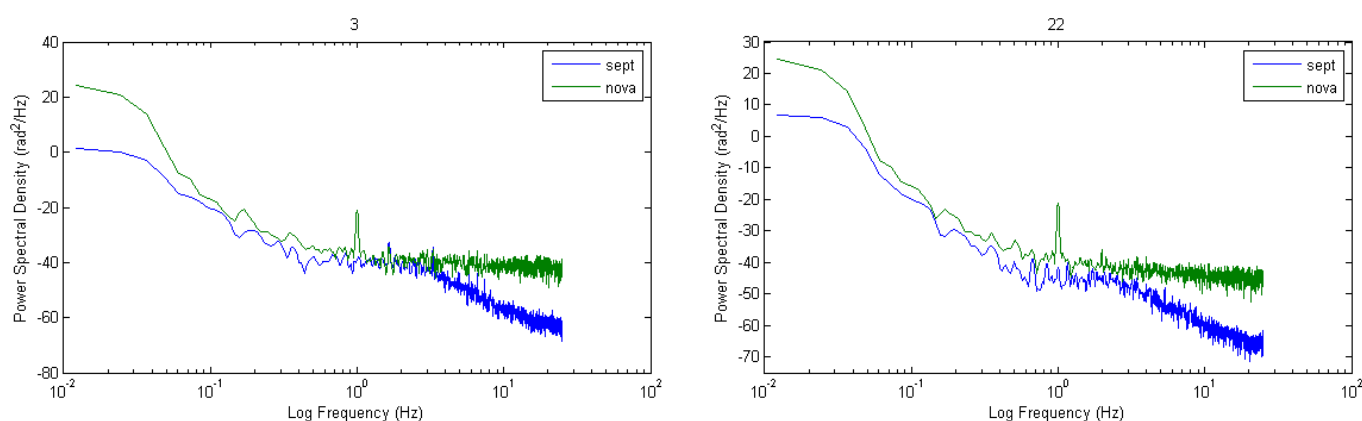


Рис. 28 Спектры фазы сигналов для спутников с номерами 3(слева) и 22(справа), полученные с помощью приемников Septentrio(синий) и Novatel(зеленый)

Из полученных графиков видно, что начиная с частоты 0.04 Гц и выше, спектры фазовых флуктуаций близки друг к другу.

Выводы:

- Исходя из результатов спектрального анализа, точность измерений приемника Septentrio должна быть выше, так как уровень шума данного приемника меньше относительно Novatel.
- Кроме того, исследование спектров флуктуаций сигналов, порождённых флуктуациями среды распространения, возможно при условии, что спектральная мощность флуктуаций превышает шумовой порог. Этот порог в наших измерениях для фазовых флуктуаций составил величину порядка  $-40 \text{ дБ-рад}^2/\text{Гц}$

### Глава 3. Анализ вкладов различных факторов в результатирующее искажение сигналов

Поскольку часть пути сигнала от спутника до Земли проходит через тропосферу, то полное искажение сигнала состоит из суммы ионосферного и тропосферного вкладов. Кроме того, возможно дополнительное искажение сигнала за счёт эффектов многолучёвости вследствие отражений от предметов, находящихся в окрестности антенны. С точки зрения диагностики среды распространения представляет интерес разделение этих вкладов. С этой целью естественно использовать факт наличия частотной зависимости показателя преломления ионосферы и отсутствие такой зависимости для используемых частот у индекса рефракции тропосферы.

Чтобы узнать, чему равны тропосферные и ионосферные составляющие сигнала рассмотрим набег фаз двухчастотного сигнала, который выражается следующим образом:

$$\varphi_1 = \varphi_{t1} + \varphi_{i1} + S_1 \quad (10)$$

$$\varphi_2 = \varphi_{t2} + \varphi_{i2} + S_2 \quad (11)$$

где  $\varphi$  – набег фазы, индексы 1 и 2 соответствуют частотам  $f_1=1575.42$ МГц и  $f_2=1227.60$ МГц, индексы t и i соответствуют тропосферной и ионосферной составляющим, а S – шумовой составляющей.

Отметим, что под термином «тропосферная составляющая» мы понимаем ту часть флуктуаций фазы, которая не относится к ионосфере, т.е. не имеет частотной зависимости, характерной для плазмы. Сюда, помимо тропосферных флуктуаций, входят изменения фазы за счёт многолучёвости, а также геометрический набег фазы за счёт изменения расстояния между приёмником и передатчиком.

Набег фазы для тропосферной составляющей выражается следующим образом:

$$\varphi_t = k \int \Delta n dz = \frac{2\pi f}{c} \int \Delta n dz = I_t f \sim f \quad (12)$$

где k – волновой вектор,  $\Delta n$  – показатель преломления,  $\int dz$  – интеграл взятый по высоте.

Показатель преломления в тропосфере не зависит от частоты сигнала, поэтому набег фазы пропорционален частоте. Рассмотрим теперь набег фазы для ионосферной составляющей:

$$\varphi_i = k \int \Delta n dz = -\frac{2\pi f}{c} \int \frac{f_p^2}{f^2} dz = \frac{I_i}{f} \sim \frac{1}{f} \quad (13)$$

где k – волновой вектор,  $\Delta n$  – показатель преломления,  $\int dz$  – интеграл взятый по высоте,  $f_p$  – плазменная частота.

В случае ионосферы показатель преломления зависит от частоты сигнала, поэтому набег фазы обратно пропорционален частоте.

Решая систему уравнений (10-13) получаем:

$$I_i = - \left( \frac{\varphi_1}{f_1} - \frac{\varphi_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} + \left( \frac{S_1}{f_1} - \frac{S_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (14)$$

$$I_t = \frac{\varphi_1 f_1 - \varphi_2 f_2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{S_1 f_1 - S_2 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (15)$$

Необходимо отметить наличие в (14, 15) шумовых добавок (вторые слагаемые в правых частях уравнений), которые будут по абсолютной величине больше, чем шум в исходных сигналах ( $S_1$  и  $S_2$  в уравнениях 10, 11) вследствие того, что шумы не обладают когерентностью. Они включены в уравнения для оценки величины шумовых составляющих, но не используются при вычислениях  $I_i$  и  $I_t$ . Исходя из полученных результатов, мы можем найти ионосферную составляющую набега фазы, путем деления (14) на соответствующую частоту, и тропосферную составляющую, путем умножения (15) на соответствующую частоту.

С помощью приемника Septentrio, используя 50Гц режим работы, были получены данные, которые обрабатывались с помощью «Matlab» по описанной выше методике, благодаря которой были вычислены флуктуации фазы двухчастотного сигнала для ионосферной составляющей (Рис. 29) и тропосферной составляющей (Рис. 30), а также исходного сигнала, не разделённого на составляющие (Рис. 31):

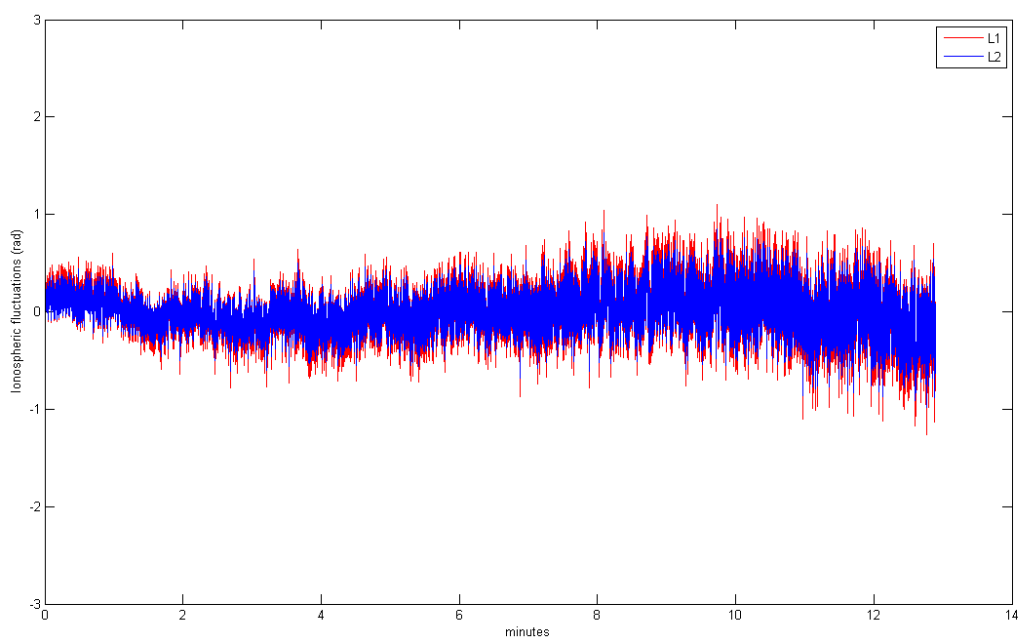


Рис. 29 График зависимости ионосферной флуктуации фазы двухчастотного сигнала (L1 – синий, L2 – красный) от времени.



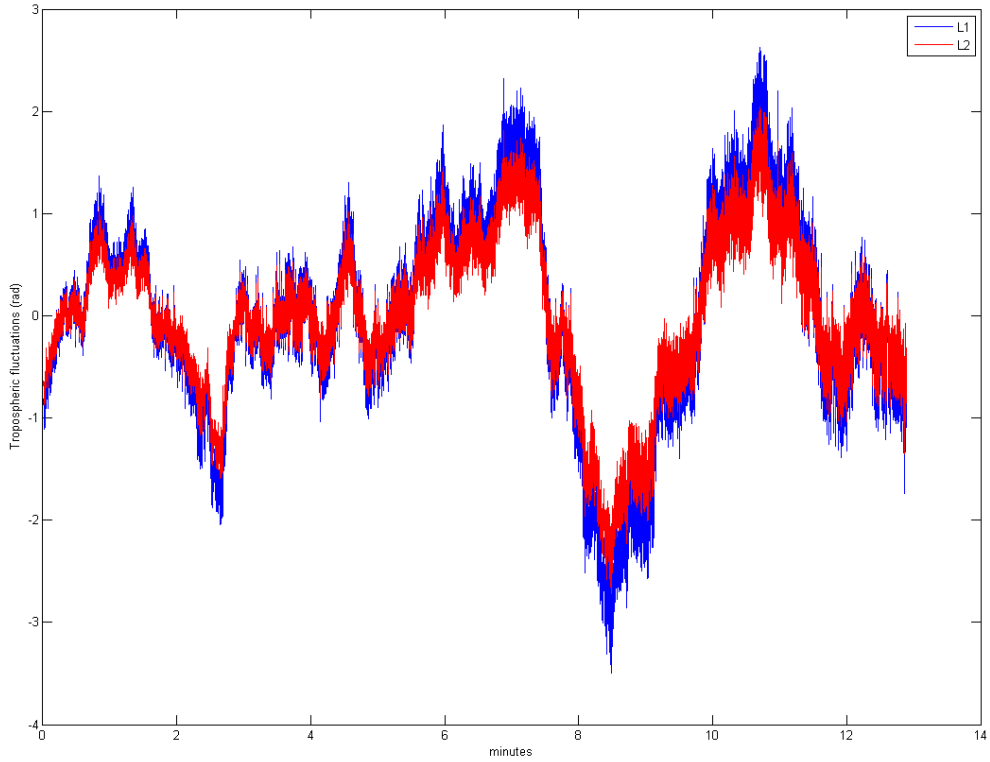


Рис. 30 График зависимости тропосферной флуктуации фазы двухчастотного сигнала (L1 – синий, L2 – красный) от времени.

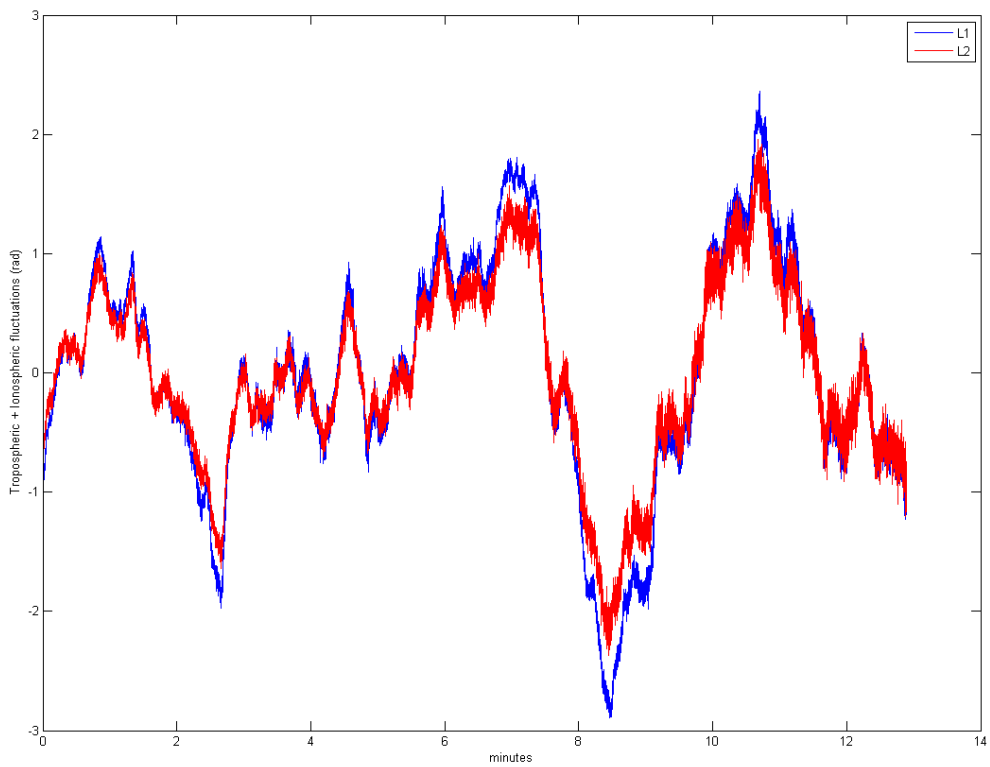


Рис. 31 График зависимости флуктуации фазы соответствующей двум частотам сигнала (L1 – синий, L2 – красный) от времени.

Видно, что ионосферная составляющая представляет собой шумоподобный сигнал без каких-либо выделяющихся особенностей (Рис. 29), и наблюдаемые на графиках фазы после исключения тренда (рис.31) колебания с размахом в несколько радиан не имеют ионосферного происхождения, и, скорее всего, возникают благодаря многолучёвости за счёт отражения от посторонних предметов, расположенных рядом с антенной. Также следует отметить, что высокочастотные шумы флуктуаций ионосферной и тропосферной составляющих (Рис. 29 и Рис. 30) имеют больший размах по сравнению целостным сигналом (Рис. 31), потому что шумы для отдельных составляющих сигнала некогерентны.

Мелкомасштабные флуктуации дифракционного происхождения и шумы, не относящиеся к исследуемому сигналу, при таком преобразовании не могут быть отнесены ни к ионосфере, ни к тропосфере, поскольку для них простые геометрооптические формулы, используемые при выводе, неверны. Только те масштабы, для описания которых пригодно приближение геометрической оптики, допускают подобное разделение. Поэтому попытаемся оценить, для каких частот оно имеет смысл.

Размер зоны Френеля для ионосферных высот ( $H=300$  км) и частоты 1575.42 МГц (L1)  $R_F = \sqrt{\lambda H} \approx 250$  метров, для тропосферного распространения – порядка 40 м. При этом, если принять гипотезу «вмороженности» неоднородностей и оценивать эффективную скорость сканирования неоднородностей лучом исходя из орбитальной скорости движения навигационного спутника, то для высоты 300 км эта скорость составит величину порядка 50 м/с, а для тропосферных высот около 10 км – 1.5 м/с. Если вмороженные неоднородности сами движутся с некоторой скоростью дрейфа, то эффективная скорость сканирования определяется векторной суммой скорости дрейфа и скорости скана спутником. В частности, скорость дрейфа (ветра) в тропосфере достигает 20 м/с, поэтому здесь эффективная скорость скана определяется этим значением. Если эта эффективная скорость известна, то можно перейти от масштабов неоднородностей к соответствующим им спектральным частотам по простой формуле  $f = v/L$ , где  $v$  – эффективная скорость сканирования, а  $L$  – масштаб неоднородностей. Тогда для частот, соответствующих масштабам зоны Френеля для ионосферных высот получаем  $F_F \approx 0.2$  Гц, а для тропосферных высот – около 0.5 Гц. Для простейших оценок можно считать, что дифракция на ионосферных неоднородностях определяет спектр для частот выше 0.2 Гц, а на неоднородностях тропосферы – для частот выше 0.5 Гц. Соответственно, низкочастотная часть спектра флуктуаций для частот меньше 0.2 Гц находится в режиме геометрической оптики.

Для проверки полученных оценок частот был проведен спектральный анализ фазы двухчастотного сигнала отдельно для частоты  $f_1$  (Рис. 32) и для частоты  $f_2$  (Рис. 33):

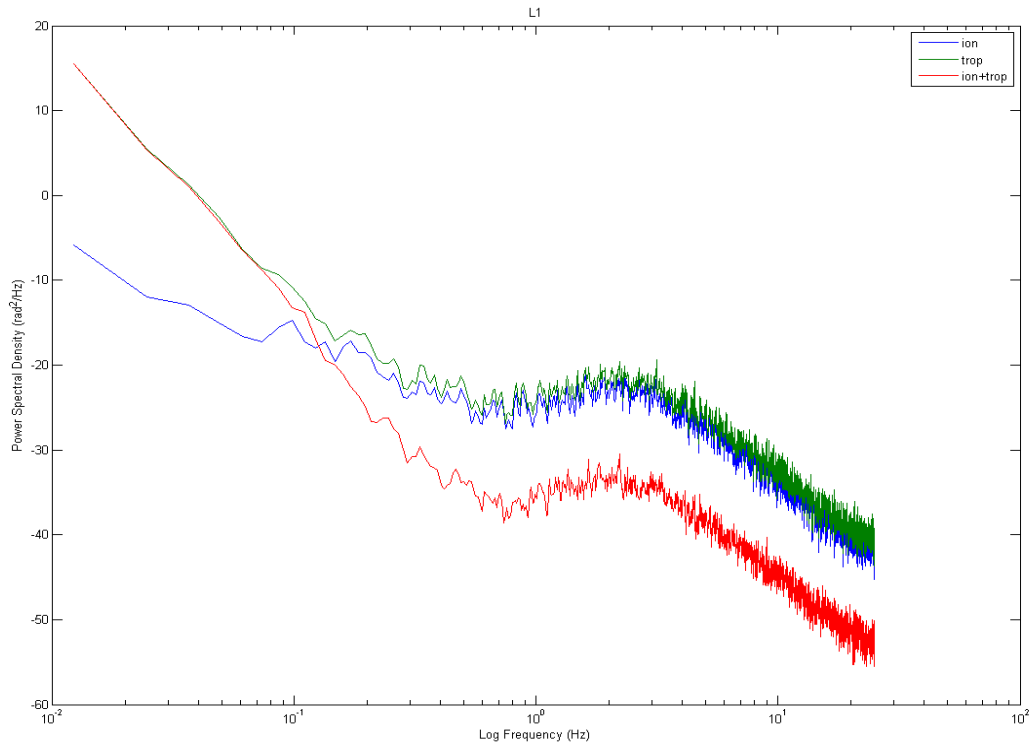


Рис. 32 Спектры фазы сигнала(красный) и его ионосферной(синий) и тропосферной(зеленый) составляющих для частоты  $f_1=1575.42\text{МГц}$

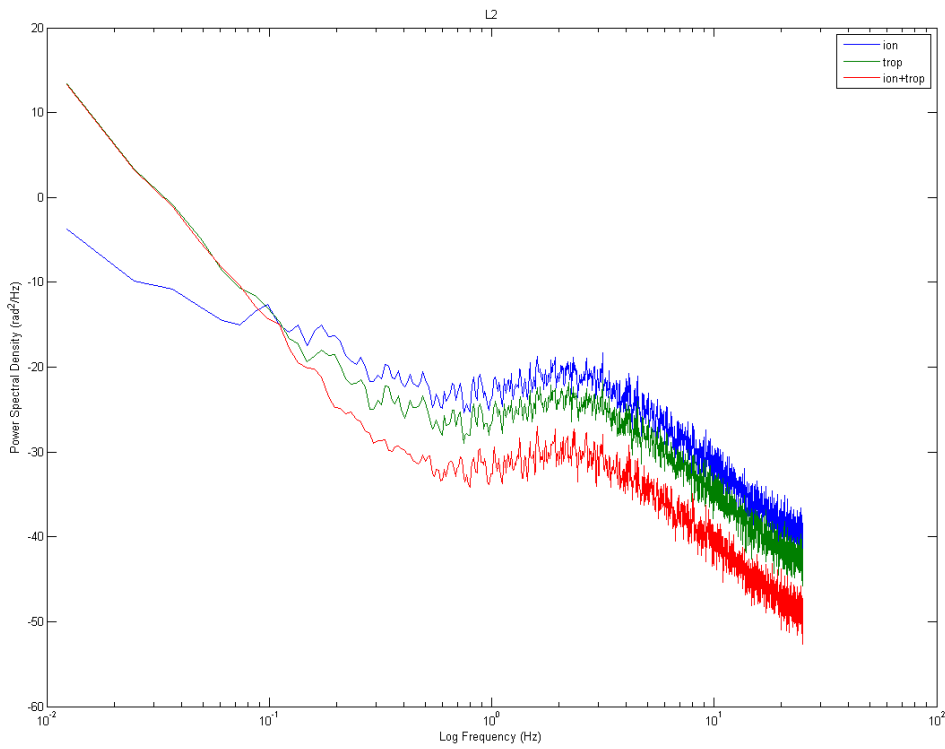


Рис. 33 Спектры фазы сигнала(красный) и его ионосферной(синий) и тропосферной(зеленый) составляющих для частоты  $f_2=1227.60\text{МГц}$

Спектральный анализ показывает, что в проделанных измерениях в области частот меньших 0.1 Гц спектр исходной фазы сигнала практически совпадает со спектром составляющей фазы, не содержащей ионосферной составляющей. При этом спектр флуктуаций фазы ионосферного происхождения лежит значительно ниже двух других упомянутых. Это соответствует уже отмеченному факту, что в этом частотном интервале спектр полной фазы определяется, в основном, эффектами многолучёвости и практически не несёт в себе информации об ионосферных флуктуациях. Что касается частот выше 0.1 Гц, то здесь разделение эффектов при помощи простых геометрических формул является, по-видимому, некорректным и вряд ли имеет физический смысл. Тот факт, что спектры составляющих сигнала расположены выше спектра исходной фазы, является следствием наличия некогерентного шума, который при используемой процедуре разделения (10-15) суммируется для обеих составляющих.

## Заключение

В работе проведены наблюдения трансionoсферных навигационных сигналов с целью выяснения возможностей имеющейся аппаратуры для получения экспериментальных данных, которые могут быть использованы для оценок параметров среды распространения сигналов.

Для наблюдений были использованы приемно-регистрационные комплексы, состоящие из двух профессиональных измерительных приемников геодезического класса производителей Septentrio и Novatel.

Анализ временного хода ПЭС и индексов ионосферных мерцаний показал, что значения, полученные с помощью приемника Septentrio, всегда меньше аналогичных значений, полученных с помощью приемника Novatel. Спектральный анализ фазы и амплитуды сигнала так же показал, что значения полезной и шумовой составляющей у приемника Novatel несколько выше. При анализе данных было выяснено, что оба приемника неидеальны, и у каждого имеются свои недостатки.

В некоторых сеансах измерений на суточном ходе ПЭС были зафиксированы быстрые нерегулярные изменения ПЭС, которые, по-видимому, являлись следствием геомагнитной бури, происходившей во время наблюдений.

При исследовании ионосферных мерцаний были получены индексы флуктуаций амплитуды мерцаний  $S_4$  и фазы мерцаний  $\sigma_\varphi$ , и коэффициенты корреляции между аналогичными величинами для обоих приёмников. Анализ коэффициентов корреляции говорит о том, что приёмники фиксируют не случайный шум, а изменения, происходящие в атмосфере.

При анализе флуктуаций на двух частотах было выяснено, что в условиях эксперимента (область средних широт  $\sim 60^\circ$  с. ш.) ионосферная составляющая флуктуаций

в большинстве случаев значительно слабее других факторов (тропосфера, многолучёвость). Поэтому для исследования ионосферных неоднородностей в наших условиях требуются длительные наблюдения с последующим отбором данных для анализа.

### **Благодарность**

Автор признателен сотрудникам ресурсного центра «Геомодель» за предоставленную возможность использования приемной аппаратуры Septentrio при выполнении работы.

## Литература

1. El-Rabbany A. Introduction to GPS: the global positioning system. – Artech house, 2002.
2. Терещенко Е. Д. и др. Определение полного электронного содержания по сигналам спутников глобальной навигационной системы ГЛОНАСС //Вестник Кольского научного центра РАН. – 2015. – №. 1 (20).
3. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M. GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms, Publisher: ESA Communications, ESTEC, Noordwijk, Netherlands. – ISBN 978-92-9221-886-7, 2013.
4. Recommendation ITU-R P.531-10 Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems
5. PolARxS Application Manual, Version 2.5.0, March 04, 2015
6. Кривошеев В. И. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ): Учебно-методические материалы. Н. Новгород: ННГУ, 2006. 117 с.
7. Zhang L., Morton Y. GPS Carrier Phase Spectrum Estimation for Ionospheric Scintillation Studies //Navigation. – 2013. – Т. 60. – №. 2. – С. 113-122.