

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

О.Г. ХУТОРОВА

**ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ РАДИОСИГНАЛАМИ
СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

**КАЗАНЬ
2025**

УДК 528.8
ББК 22.336
X98

*Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией
Института физики КФУ
протокол № 6 от 12 марта 2025*

Рецензент:

кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры радиофизики КФУ, Р.Р. Латыпов

Хуторова О.Г.

X98 Зондирование ионосферы радиосигналами спутниковых навигационных систем. Лабораторный практикум /
О.Г. Хуторова. – Казань: Казанский федеральный университет,
2025. – 26 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для подготовки бакалавров и магистров в области радиофизики и распространения радиоволн, космической геодезии, физики атмосферы. Представлены задания лабораторных работ для курса «Радиофизические методы исследования атмосферы, ионосферы и космоса». Рассматривается метод просвечивания атмосферы Земли излучением спутников навигационных систем, целью которого является дистанционное определение параметров состояния ионосферы.

УДК 528.8
ББК 22.336

© Казанский федеральный университет, 2025

© Хуторова О.Г., 2025

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

- ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы
- СНС – спутниковые навигационные системы
- ГЛОНАСС – Глобальная Навигационная Спутниковая Система, российская спутниковая система навигации
 - GPS – Global Positioning System, глобальная система позиционирования США
 - ПЭС – полное электронное содержание ионосферы
 - ТЕС – Total Electron Content (полное электронное содержание ионосферы)
 - UTC – Universal Time, Coordinated – Всеобщее скоординированное время
 - c - скорость света
 - f_1, f_2 – рабочие частоты ГНСС
 - P_1, P_2 – дополнительные пути радиосигналов, обусловленные групповым запаздыванием в ионосфере, измеренные по времени распространения;
 - L_1, L_2 – число набегов фазы на рабочих частотах ГНСС;
 - λ_1, λ_2 – длины волн несущих на частотах f_1, f_2 ;

ВВЕДЕНИЕ

В области физики атмосферы и околоземного космического пространства одним из самых современных, высокоэффективных и перспективных методов исследований является прием радиосигналов со спутниковых аппаратов высокоорбитальных навигационных спутников на сети приемных пунктов. Этот метод позволяет получать информацию о структуре и динамике атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли.

Разработан лабораторный практикум для формирования практических навыков по зондированию ионосферы радиосигналами глобальных навигационных спутниковых систем.

!!! ВАЖНО. Прежде чем приступать к выполнению практикума, необходимо прочитать учебное пособие [1], документацию к приемнику [2], для того, чтобы выполнить следующие задачи.

- Изучить принципы работы спутниковых навигационных систем.
- Изучить теорию распространения радиосигналов в нейтральной атмосфере Земли и ее ионосфере.
- Понять принципы дистанционного зондирования атмосферы радиосигналами спутниковых навигационных систем.
- Изучить инструкцию работы с ГНСС-приемником NovAtel OMV -V3 и ПО NovAtel Connect (подключение, вывод радиоизмерений, запись данных в файлы).

Далее можно приступать к последовательному выполнению заданий лабораторных работ.

Задание № 1

- Проверить подключение ГНСС-приемника NovAtel OMV-V3 к антенне и компьютеру. Включить компьютер и приемник.
- Запустить ПО Novatel Connect [2].
- Инициировать ввод данных с приемника через последовательный порт.
- Включить окна вывода измерений, объяснить физический смысл измеряемых параметров. Объяснить принцип работы спутниковых навигационных систем.
- Включить окно вывода полученных координат антенны, подождать несколько минут, очистить данные. Оценить разброс координат, объяснить результаты.
- Вывести измерения координат антенны в файл, получить координаты пункта измерения, усредненные за 30 мин. Объяснить метод измерения координат антенны приемника.
- Объяснить физический смысл радиоизмерений приемника ГЛОНАСС – GPS: псевдодальностей по кодовому измерению на частотах $f1$ и $f2$ ($P1$, $P2$), фазовых измерений на частотах $f1$ и $f2$ ($L1$, $L2$) и доплеровских измерений на частотах $f1$ и $f2$ ($D1$, $D2$).
- Вывести эти радиоизмерения приемника в файл за период 30–40 мин с частотой измерений 1 сек. Конвертировать файл измерений из двоичного формата в стандартный формат Rinex 2.10 программой Novatel Convert4 (см. Приложение 2). Полученный файл Rinex использовать для выполнения следующих заданий.

Задание № 2

- Для визуализации и обработки данных радиоизмерений, представленных в формате Rinx, использовать пример программы – Приложение 3. Программа написана на языке python. Требуются дополнительно модули `matplotlib`, `numpy`, `georinx`.

- Изучить алгоритм работы программы, понять процесс выборки измерений, построение графиков спутниковых измерений для полученного примера данных: псевдодальности, фазовых измерений, доплеровских измерений. Вместе с полученным в задании №1 файлом анализировать суточные файлы ГНСС-измерений, данные преподавателем.

!!! ВАЖНО. Корректно задавайте имя файла в программе, диапазон времени выборки данных, параметры сигнала

- Объяснить физический смысл радиоизмерений приемника ГЛОНАСС – GPS: псевдодальностей по кодовому измерению на частотах f_1 и f_2 (P_1 , P_2), фазовых измерений на частотах f_1 и f_2 (L_1 , L_2) и доплеровских измерений на частотах f_1 и f_2 (D_1 , D_2).

- Отследить качество данных с каждого спутника (данные должны быть без пропусков, в канале записи должны быть данные только одного спутника). Подобрать для дальнейших заданий выборки сырых измерений объемом не менее 30 минут с записью, содержащие данные с одного спутника. Сделать не менее четырех выборок, каждая по 30-40 минут, соответствующие разным условиям (зима – лето, день – ночь).

- Вывести псевдодальность по кодовому измерению на частоте $f1$ ($P1$) в виде графика и объяснить получившуюся зависимость. Вывести псевдодальность по кодовому измерению на частоте $f2$ ($P2$) в виде графика и объяснить получившуюся зависимость. Оценить временной тренд значений псевдодальности до каждого спутника, разброс значений псевдодальности. Объяснить результаты.

- Вывести фазовые измерения на частоте $f1$ ($L1$) в виде графика и объяснить получившуюся зависимость. Вывести фазовые измерения на частоте $f2$ ($L2$) в виде графика и объяснить получившуюся зависимость. Оценить временной тренд значений фаз радиосигнала для каждого спутника, разброс значений. Объяснить результаты.

- Вывести доплеровские измерения на частоте $f1$ ($D1$) в виде графика и объяснить получившуюся временную зависимость. Вывести доплеровские измерения на частоте $f2$ ($D2$) в виде графика и объяснить получившуюся зависимость.

- Вывести измерения соотношения сигнал/шум на частоте $f1$ ($S1$) и $f2$ ($S2$) в виде графика и объяснить получившуюся временную зависимость, разброс значений.

- Ответить на вопрос: можно ли измерения параметров радиосигналов считать случайными функциями, обосновать ответ.

Задание № 3

- На основе предыдущей программы сделать выборки измерений с нескольких спутников, пригодные для зондирования ионосферы. Следует подобрать время (30-60 минут) и номер спутника так, чтобы отображались графики $L1$ и $L2$, отличные от нуля во всем диапазоне времени, не имеющие пропусков и скачков.

!!! ВАЖНО. Для расчетов ПЭС нужно, чтобы число и время измерений $L1$ и $L2$ строго совпадали (отредактировать программу так, чтобы удалялись строки с пустыми значениями $L2$ и $L1$)

- Рассчитать полное электронное содержание ПЭС (TEC – total electron content), по сигналам с нескольких спутников по фазе за этот период времени.

Формула для вычисления TEC вдоль луча зрения из точки приема на навигационный ИСЗ, (m^{-2}) [17]:

по кодовым значениям псевдодальности (групповому запаздыванию):

$$TEC = -\frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_1 - P_2) + nP];$$

по измерениям фазового пути:

$$TEC = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + nL],$$

где f_1, f_2 – рабочие частоты ГНСС; P_1, P_2 – дополнительные пути радиосигналов, обусловленные групповым запаздыванием в ионосфере, м.; $L_1 \lambda_1, L_2 \lambda_2$ – дополнительные пути радиосигналов, обусловленные фазовым запаздыванием в ионосфере, м.; L_1, L_2 – число набегов фазы на рабочих частотах ГНСС; λ_1, λ_2 – длины волн, м.; K – постоянная неоднозначности фазы (неизвестное начальное значение); nP, nL – погрешности определения группового и фазового пути.

- Как изменяются параметры радиосигналов, проходящих через ионосферу и нейтральную атмосферу?

- Объяснить влияние ионосферы на распространение радиоволн.
- Объяснить временную зависимость ПЭС.
- Оценить соотношение сигнал/шум, его среднее значение и дисперсию. Сравнить с ПЭС. Объяснить результаты.

- Аппроксимировать временные ряды ПЭС линейной или полиномиальной зависимостью. Оценить какая функция аппроксимирует тренд ПЭС и соотношение сигнал/шум лучше. Объяснить результаты.
- Вычесть полученные тренды (аппроксимации) из временных рядов. Оценить среднее значение и дисперсию, временную зависимость полученных выборок. Объяснить результаты.
- Можно ли полученные флуктуации ПЭС считать случайным процессом?
- Проверить, являются ли флуктуации ПЭС стационарным процессом, функцией со стационарными приращениями.
- Оценить статистические параметры флуктуаций ПЭС: среднее значение и дисперсию, плотность распределения, автокорреляционную функцию, структурную функцию, спектр. Построить графики. Объяснить результаты.

Задание № 4

Известно, что возмущения в ионосфере зависят от времени суток и сезона [3, 4]. Для исследования суточной и сезонной динамики ПЭС необходимо выполнить следующее.

- Провести выборку данных ПЭС со спутника, взятых в дневных и ночных условиях по локальному времени (желательно подобрать выборку одних и тех же спутников).
- Сравнить статистические параметры ПЭС и флуктуаций ПЭС (среднее значение и дисперсию, плотность распределения, корреляционную функцию, структурную функцию, спектр), полученные в разное время суток. Объяснить результаты.

Задание № 5

Известно, что возмущения в ионосфере зависят от космической погоды (солнечных вспышек, солнечного ветра), геомагнитной активности. Для исследования зависимости флуктуаций ПЭС от солнечной и геомагнитной активности выполнить следующее.

- Найти данные о магнитных бурях, солнечных вспышках, солнечных протонных событиях для подбора реализаций спутниковых измерений.

- Сайт данных о космической погоде - Мировой центр данных по солнечно-земной физике [6].

- Данные о магнитных бурях – индексы геомагнитной активности, спутниковые измерения магнитного поля и потоков космических лучей можно найти по нижеследующим ключевым ссылкам.

- Планетарный K-индекс (<https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>)

- Наблюдения потоков солнечного ветра и геомагнитного поля – спутники GOES (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/GOES/>)

- Данные о солнечных вспышках, протонных событиях (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru)

- Выбрать файлы данных, соответствующие спокойным и возмущенным условиям. Провести выборку данных ПЭС со спутника, взятых в спокойных и возмущенных условиях (желательно подобрать выборку одних и тех же спутников в одно время суток, но в разные дни).

- Сравнить статистические параметры флуктуаций ПЭС (среднее значение и дисперсию, плотность распределения, корреляционную функцию, спектр), полученные в спокойных и возмущенных условиях. Объяснить результаты.

Задание № 6

- Найти в базе данных международной службы IGS – GNSS (https://igs.org/products/#orbits_clocks) файл с точными эфемеридами спутников навигационной системы (формат sr3), соответствующий дате измерений ГНСС-приемника. Там же найти описание формата данных sr3 и использовать файлы эфемерид для визуализации эфемерид спутников, измерения сигналов которых проведены в заданиях №1 и №3. Программу визуализации эфемерид ГНСС спутников см. в Приложении 6.

- Рассчитать по координатам приемника и траекториям спутника дальность радиотрасс распространения сигнала от спутника до приемника, сравнить с измеренными значениями, объяснить результаты (можно воспользоваться программой визуализации эфемерид ГНСС спутников, представленной в Приложении 6).

- Рассчитать по координатам пункта и траекториям спутника углы возвышения и азимут радиотрасс, объяснить алгоритм расчета и результаты.

- Построить зависимость измерений дальности до спутника от угла возвышения радиотрассы.

- Построить зависимость соотношения сигнал/шум и доплеровского смещения частоты от угла возвышения радиотрассы, объяснить результаты.

- Построить зависимость разности дальности до спутника и измеренной псевдодальности от угла возвышения радиотрассы, объяснить результаты.

- Сравнить временные зависимости ПЭС и флуктуаций ПЭС с дальностью радиотрассы и углом возвышения радиотрассы.

- Написать отчет по применению глобальных систем радионавигации в атмосферных исследованиях. Отчет должен содержать отдельные разделы по каждому заданию. В отчете ответить на все поставленные вопросы. Оформить отчет по ГОСТ 7.32-2017.

ПРИЛОЖЕНИЯ. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ

Приложение 1. Технические характеристики ГНСС-приемника NovAtel OMV-V3

В лаборатории кафедры радиоастрономии для исследований используется приемник NovAtel OMV-V3 с антенной Novatel GPS-702, имеющего 72 канала слежения. Оборудование геодезического класса с технологией подавления многолучевости.

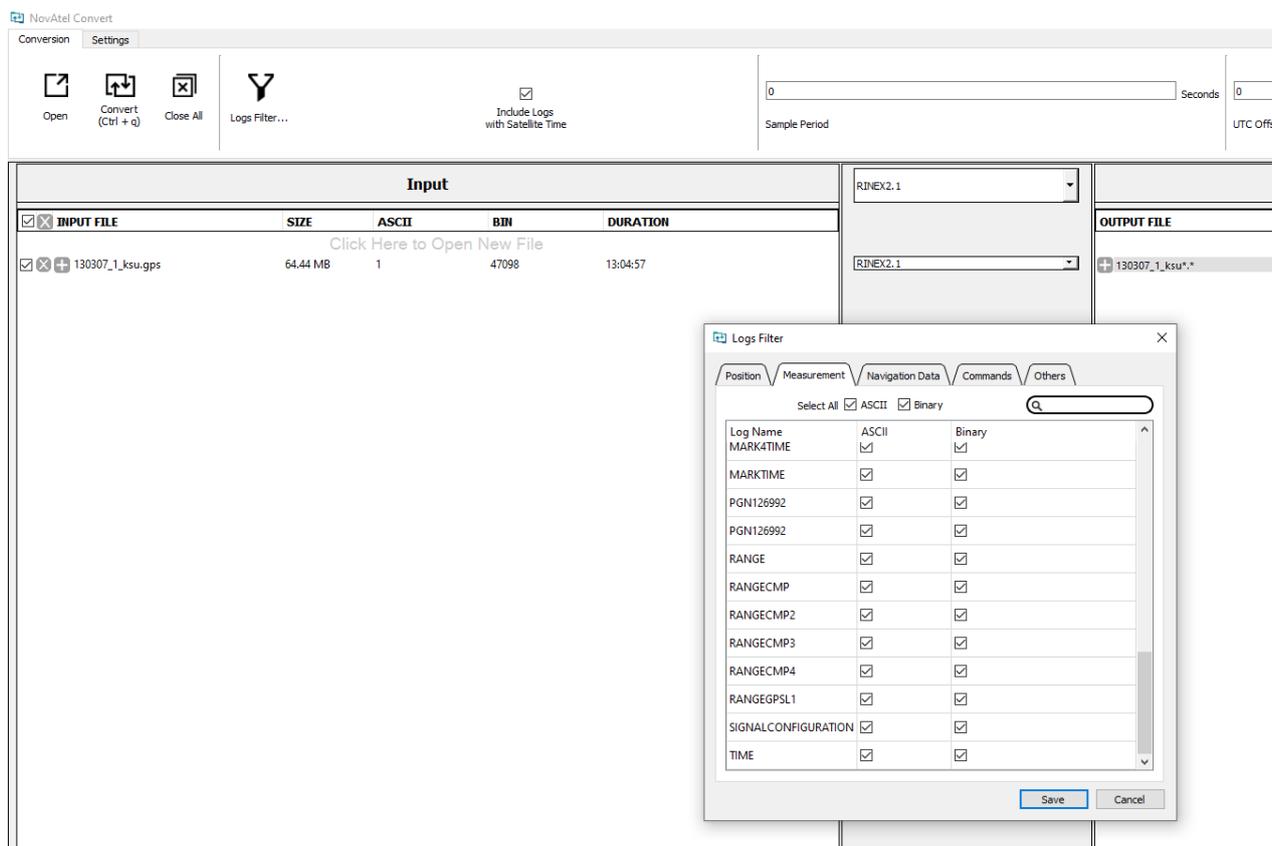
Антенна Novatel GPS-702 с платой приемника OEM-V3
Трехсистемный GPS, ГЛОНАСС, Galileo
72 канала слежения
Двухчастотный, рабочие частоты $f1 = 1575,42$ МГц и $f2 = 1227,60$ МГц
Минимальная чувствительность – 135 Дб
Технология подавления многолучевости принимаемого сигнала
Точность измерений фазы несущей – 0,5 мм
Частота выдачи измерений – до 20Гц
Диапазон рабочих температур от -40°C до $+75^{\circ}\text{C}$

Рабочие частоты 1575,42 МГц и 1227,60 МГц позволяют исключить влияние ионосферы. В приемнике используется оригинальная высокоточная система подавления интерференций при приходе нескольких отраженных радиосигналов, прошедших различные пути в атмосфере. Для ввода данных с приемника в компьютер имеет 3 COM порта и один USB порт.

Приложение 2. Преобразование данных из двоичного формата

Для преобразования данных из двоичного формата в формат RINEX используется программа NovAtel Convert из папки, в которую установлено математическое обеспечение приемника. Диалоговое окно NovAtel Convert показано на рисунке.

Преобразование данных из двоичного формата в формат RINEX



Загрузка двоичного файла кнопкой Open. Кнопка Convert – запуск конвертации файлов. Кнопка Logs Filter вызывает окно выбора конвертируемых параметров. Выпадающее меню – выбор формата вывода.

Приложение 3. Формат RINEX

Для того чтобы привести данные, полученные приемниками различных производителей, к единому стандартному формату, используется их представление в формате RINEX.

Каждый из файлов RINEX состоит из заголовка и основного массива записанных данных. В заголовке к файлу результатов наблюдений содержится следующая основная информация:

- версия формата и показатели, идентифицирующие файл;
- дата и время начала сеанса наблюдений;
- условное название пункта;
- информация о наблюдателе и его организации;
- тип приемника и антенны;
- приближенные координаты пункта в системе WGS-84;
- величины, характеризующие вынос фазового центра относительно закрепленной на местности марки;
- система отсчета фазовых измерений;
- вид наблюдений;
- время записи первого наблюдения;
- другая вспомогательная информация.

Следующий за заголовком массив включает в себя:

- данные, характеризующие эпоху наблюдений (год, месяц, число, часы, минуты и секунды);
- количество спутников в записанной эпохе и их номера;
- уход показаний часов приемника (в секундах); значения определенных псевдодальностей с использованием C/A-кода и P-кода (в метрах);

- результаты фазовых измерений (для эпохи, начиная со второй, приводятся приращения фазы относительно предыдущей эпохи в долях цикла с соответствующим знаком);
- доплеровский сдвиг частоты сигнала (Гц).

Данные представлены в виде строк. Порядок полей в строке указан в заголовке перед подстрокой «TYPES OF OBSERV».

Пример заголовка и начала массива данных представлен ниже.

```

2.10          OBSERVATION DATA      M (MIXED)          RINEX VERSION / TYPE
Convert 2.6.6          24-PsPcC,.-2023 10:39  PGM / RUN BY / DATE
Signal Strength values S1,S2 are in dBz

                                NovAtel GPSCard
0.0000          0.0000          0.0000
0.0000          0.0000          0.0000          0.0000
1              1
1              1              7              G02              G03              G04              G05              G06              G07              G08WAVELENGTH FACT L1/2
1              1              7              G09              G10              G11              G12              G13              G14              G15WAVELENGTH FACT L1/2
1              1              7              G16              G17              G18              G19              G20              G21              G23WAVELENGTH FACT L1/2
1              1              7              G24              G25              G26              G27              G28              G29              G30WAVELENGTH FACT L1/2
1              1              7              G31              G32              R01              R02              R03              R04              R05WAVELENGTH FACT L1/2
1              1              7              R06              R07              R08              R09              R10              R11              R12WAVELENGTH FACT L1/2
1              1              7              R13              R14              R15              R16              R17              R18              R19WAVELENGTH FACT L1/2
1              1              5              R20              R21              R22              R23              R24              WAVELENGTH FACT L1/2
8              C1              L1              D1              S1              P2              L2              D2              S2              # / TYPES OF OBSERV
1.000          INTERVAL
2023           07           30           02           58           11.0000000          GPS          TIME OF FIRST OBS
2023           07           31           00           02           26.0000000          GPS          TIME OF LAST OBS
Leap Seconds Unknown          COMMENT
                                END OF HEADER
23 07 30 02 58 11.0000000 0 13G05G28G12G06G11G25G29G20R12R11R21R22
                                R05
23807027.37246 125106787.970 6          3606.32646          42.196          23807029.63946
97485830.114 6          2810.13046          42.232
22627422.41346 118907904.940 6          -309.19546          41.175          22627420.52944
92655458.101 4          -240.93144          37.912
21750425.05048 114299262.610 8          -2951.58648          46.181          21750423.15148
89064369.361 8          -2299.93948          46.261
23704192.68541 124566379.383 1          -3450.89841          32.107          23704194.19942
97064706.416 2          -2689.01242          33.009
21051978.97449 110628896.573 9          -1285.61949          48.639          21051976.91747
86204341.949 7          -1001.78047          44.974
20174844.46849 106019545.521 9          -574.83749          49.866          20174843.99249
82612614.040 9          -447.92549          49.828
21600007.90649 113508817.852 9          2346.24749          47.928          21600005.64649
88448423.623 9          1828.24549          48.005
22214069.73247 116735751.996 7          2023.92547          44.292          22214068.65944
90962925.842 4          1577.08844          38.559
20141193.71445 107590645.568 5          1764.12645          39.332          20141196.53845
83681619.257 5          1372.09945          39.124
20351798.23248 108753828.752 8          -2949.62248          46.521          20351798.10646
84586286.915 6          -2294.15146          41.815

```

В примере данные представлены в виде строк со следующими полями:

- $C1$ – псевдодальность по C/A -коду на несущей частоте $f1$.
- $P1, P2$ – псевдодальность по P -коду на частотах $f1, f2$ соответственно.
- $L1, L2$ – фазовые измерения на частотах $f1, f2$ соответственно.
- $D1, D2$ – доплеровский сдвиг частоты на частотах $f1, f2$ соответственно.
- $S1, S2$ – отношение сигнал/шум.

Приложение 4. Программа обработки радиоизмерений сигналов ГНСС-спутников

```
# libraries import
# ++++++
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
import georinex as gr #georinex library
#+++++
# obs import
# имя файла скопируйте имя из папки вместе спутем
Rinex_filename = "KZN\\220315_la.22O"
#+++++
#get the RINEX file header
# вывод первой и последней эпохи измерений
hdr = gr.rinexheader(Rinex_filename)
print("Первая эпоха данных", hdr['t0'])
print("Последняя эпоха данных ", hdr['t1'])
print("Доступные измерения", hdr['fields'])
dt=float(hdr['INTERVAL']) #частота измерений в сек
#+++++
#Задайте интервал времени выборки из файла
time_limit=['2022-03-15T06:00', '2022-03-15T06:59']
#+++++
#выборка измерений
obs = gr.load(Rinex_filename,meas=['L1', 'L2'], tlim=time_limit)
obsCDS = gr.load(Rinex_filename,meas=['C1','D1','S1'],
    tlim=time_limit)
#time
t = obs.variables['time'][:].astype('datetime64')
strtime='Дата:'+t[0].values.astype('str')[0:10]+' время: '
```

```

t[0].values.astype('str')[11:16] + "-" + t[len(t) - 1].
values.astype('str')[11:16]
print(strtime)

#Plot for all satellites L2:
fig = plt.figure(0)
fig.suptitle('L2 for all satellites\n'+strtime)
plt.plot(t,obs['L2'])
plt.xlabel('time')
plt.show()
#+++++
#Доступные спутники
sv=obs.variables['sv'][:]
print('Доступные спутники', sv.values)
#ВВОД номера спутника в массиве доступных спутников
K=int(np.random.random()*len(sv))
#K=20
#Phase L1&L2
str_SN='Спутник:'+str(sv[K].values)
L1= obs.variables['L2'][:,K]
L2= obs.variables['L2'][:,K]
print(str_SN, 'Число измерений L1: ', L1.shape, ' L2: ',L2.shape,
'Интервал измерений, с:', dt)
strtime=strtime+"\n"+str_SN
# выборка измерений конец
#+++++
#Plot for K satellites L1&L2:
fig = plt.figure('L1 L2')
fig.suptitle(strtime)
plt.subplot(2,1,1)
plt.plot(t,L1, label="L1", color='red')
plt.xlabel('time')

```

```

plt.ylabel('L1')
plt.legend()
plt.subplot(2,1,2)
plt.plot(t,L2, label="L2", color='green')
plt.xlabel('time')
plt.ylabel('L2')
plt.legend()
plt.show()
#++++++
#Plot for K satellites C1&D1&S1:
C1= obsCDS.variables['C1'][:,K]
D1= obsCDS.variables['D1'][:,K]
S1= obsCDS.variables['S1'][:,K]
#++++++
fig = plt.figure('C1 D2 S1')
fig.suptitle(strtime)
plt.subplot(3,1,1)
plt.plot(t,C1, label="C1")
plt.ylabel('C1')
plt.legend()
plt.subplot(3,1,2)
plt.plot(t,D1, label="D1", color='green')
plt.ylabel('D1')
plt.legend()
plt.subplot(3,1,3)
plt.plot(t,S1, label="S1", color='red')
plt.ylabel('S1')
plt.xlabel('time')
plt.legend()
plt.show()
#++++++
#Regression

```

```

#Сигнал шум и его аппроксимация
#(только для данных без пропусков и скачков)
S11= S1[np.isnan(S1)==0] #выбираем ненулевые данные SNR
#_____ Преобразуем эпохи во время в секундах
time0=np.zeros(len(S11))
for it in range (len(S11)):
    time0[it]=(it)*dt
time= time0[np.isnan(S1)==0]
#_____
#полиномиальная аппроксимация измерений S1
k=2 #степень полинома
z = np.polyfit(time, S11, k)
po2S1 = np.poly1d(z)
P1=po2S1(time)
fig = plt.figure(3)
plt.plot(time, S11)
plt.plot(time, P1)
plt.xlabel('time,s',fontsize=10)
plt.ylabel('S1, DB/Hz',fontsize=10)
plt.grid()
plt.show()

```

Приложение 5. Файлы орбит спутников

Файлы орбит формата sp3 являются продуктами Всемирной Службы ГНСС (IGS) и могут быть получены с ее сайта по адресу <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/>

Имя файла орбит имеет структуру:

igs+GPSWEEK+DAY+.sp3

где igs – это стандартное слово для финальных продуктов,

GPSWEEK – номер недели,

GPS, DAY – номер дня в недели GPS (воскресенье – 0, понедельник – 1, суббота - 6),

sp3 – расширение файла.

Воспользуемся GPS календарем за 2012 год:

http://www.bkg.bund.de/nn_178726/geodIS/GREF/SharedDocs/Downloads/GPS__Kalender/GPS__Kalender__2012,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/GPS_Kalender_2012.pdf

Находим, что этот день – пятница, номер GPS недели 1700. Соответственно:

GPSWEEK = 1700

DAY = 5

Имя файла за день измерений: igs17005.sp3

Соответственно имя файла за предыдущий день: igs17004.sp3

Имя файла орбит за последующий день igs17006.sp3

Приложение 6. Программа визуализации орбит спутников

```
# libraries
#from datetime import datetime
import pandas as pd
from netCDF4 import Dataset
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.stats import linregress
from math import radians
from numpy import trunc
import georinex as gr #georinex library
#+++++
#Задание координат антенны
KSU_coord=(2352370.385,2717400.358,5251527.938,
55.791382503, 49.11826255, 132.237)
A_lat=radians(KSU_coord[3])
A_lon=radians(KSU_coord[4])
Xa=KSU_coord[0]*1e-3
Ya=KSU_coord[1]*1e-3
Za=KSU_coord[2]*1e-3
#+++++
#выборка измерений начало
# имя файла
#+++++
sp3_filename = "esa21100.sp3"

#переменные, считанные из файла
sp3=gr.load(sp3_filename)
#print(sp3.variables)

sv= sp3.variables['sv'][:]
```

```

# UTC - время
t3= sp3.variables['time'][:] #epoch
Year = trunc(t3[0].astype(float)/3600/24/1e9/365.25)+1970
#время в сутках с начала года
t = t3.astype(float)/(3600.*24*1e9)-trunc(365.25*(Year-1970))
ECEF=sp3.variables['ECEF'][:]
#эфемериды
X=sp3.variables['position'][:,:,0]
Y=sp3.variables['position'][:,:,1]
Z=sp3.variables['position'][:,:,2]
#+++++
# расчет длины радиотрассы
#+++++
O=np.zeros((len(Z), len(Z[0])))
for j in range(len(Z[0])):
    for i in range(len(Z)):
        O[i,j]=np.sqrt( (X[i][j]-Xa)**2+ (Y[i][j]-Ya)**2+
            (Z[i][j]-Za)**2 )

clock=sp3.variables['clock'][:] #clock bias [96, 32][time,sv]
dclock= sp3.variables['dclock'][:]

#+++++Figures+++++
Ns=18 #номер спутника в массиве доступных
fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(t3,O[: , Ns], label=' длина радиотрассы ')
ax.set_ylabel('km')
ax.legend()
plt.show()
#+++++Figures+++++

```

ЛИТЕРАТУРА

1. Хуторова О.Г. Зондирование атмосферы и ионосферы радиосигналами спутниковых навигационных систем. – URL: https://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F_648003560/Zondirovanie_radiosignalami.pdf (дата обращения: 02.03.2024).
2. NovAtel Connect User Guide NovAtel Inc. – URL: https://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F1163026515/NovAtel_Connect_User_Guide.pdf (дата обращения: 02.03.2024)
3. Афраймович Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова. – Иркутск: Ин-т солнечно-земной физики СО РАН: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 479 с.
4. Hofmann-Wellenhof B. Global positioning system: theory and practice / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins – Springer Science & Business Media, 2012. – 191 p.
5. The International GNSS Service (IGS). – URL: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/> (дата обращения: 02.03.2024)
6. Мировой центр данных по солнечно-земной физике. – URL: <http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html> (дата обращения: 02.03.2024)

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Задание № 1	5
Задание № 2	6
Задание № 3	7
Задание № 4	9
Задание № 5	10
Задание № 6	11
Приложения. Программно-аппаратный комплекс мониторинга атмосферы	12
Приложение 1. Технические характеристики ГНСС-приемника NovAtel OMV-V3	12
Приложение 2. Преобразование данных из двоичного формата	13
Приложение 3. Формат RINEX	14
Приложение 4. Программа обработки радиоизмерений сигналов ГНСС-спутников	17
Приложение 5. Файлы орбит спутников	21
Приложение 6. Программа визуализации орбит спутников	22
Литература	24

Учебное издание

Хуторова Ольга Германовна

**ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ РАДИОСИГНАЛАМИ
СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие