

**КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**  
**кафедра радиоастрономии**

**А.Р. Низамеев, Г.М. Тептин, О.Г. Хуторова**

# **СПУТНИКОВАЯ РАДИОТОМОГРАФИЯ ТРОПОСФЕРЫ**

Учебно-методическое пособие

**КАЗАНЬ – 2015**

УДК 528.8

*Принято на заседании кафедры радиоастрономии  
протокол № 12 от 5 марта 2009 г.*

Рецензент: проф. КНИИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева д.т.н. О.Ш. Даутов

**А.Р. Низамеев, Г.М. Тептин, О.Г. Хуторова СПУТНИКОВАЯ  
РАДИОТОМОГРАФИЯ ТРОПОСФЕРЫ.** Казань: КФУ, 2015, 26 с.

Данное учебно-методическое пособие предназначено для использования в курсе «Радиофизические методы исследования атмосферы, ионосферы и космоса», «Спутниковый мониторинг Земли», «Физика атмосферы». Курс ориентирован на подготовку специалистов в области радиофизики и распространения радиоволн, специальных радиотехнических систем, космической геодезии. Рассматривается метод просвечивания атмосферы Земли излучением спутников навигационных систем.

Пособие содержит материал, необходимый для выполнения лабораторных работ по спутниковой радиотомографии тропосферы, практические задания для самостоятельной реализации и методику их выполнения.

© Казанский университет, 2015

© Низамеев А.Р., Тептин Г.М., Хуторова О.Г., 2015

## Оглавление

Оглавление .....	3
Введение.....	4
Компоненты программы.....	12
Данные.....	14
Выполнение расчетов .....	16
Некоторые особенности использования программы.....	22
Задание .....	25
Литература .....	26

## Введение

Пособие рассчитано на студентов старших курсов, магистров и аспирантов. От читателя ожидается, что он знаком с MatLab, владеет основами программирования и знаком с физикой распространения радиоволн. Для использования программы глубоких знаний MatLab совершенно не обязательно. Умение писать скрипты потребуется тем, кто собирается расширять/дополнять программу.

Прежде чем приступать к выполнению практикума, изучите теоретический материал (Хуторова О.Г. ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ РАДИОСИГНАЛАМИ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ Учебное пособие / О.Г. Хуторова; Каз.федер.ун-т. – Казань, 2011. – 117 с.).

Данная программа для выполнения расчетов базируется на теории спутниковой радиотомографии. Кратко приведем основные ее принципы. Для восстановления трехмерной структуры индекса рефракции радиоволн в тропосфере используется сеть спутников (ИСЗ) GPS-ГЛОНАСС и сеть наземных приемных станций. Орбиты ИСЗ вычисляются с очень высокой точностью. Радиопередатчики спутников непрерывно излучают сигналы в направлении Земли. Используя радиосигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), можно провести исследование тропосферы.

Измеренная наземным приемником фаза радиосигнала, отправленного спутником - результат радиопросвечивания атмосферы и, следовательно, несет в себе информацию, характеризующую состояние ее слоев. Эта информация накапливается через изменяющееся с высотой значение индекса рефракции  $N$ , который, в свою очередь, связан с высотным распределением метеорологических параметров: давлением, температурой, влажностью.

Для сантиметрового диапазона радиоволн ряд исследователей приводят в своих работах следующее выражение, связывающее индекс рефракции с атмосферными параметрами:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} + 4.03 \cdot 10^7 \frac{N_e}{f^2}$$

где  $p$  – атмосферное давление, мб;

$T$  – температура, К;

$e$  – парциальное давление водяного пара, мб;

$N_e$  – электронная концентрация, м<sup>-3</sup>;

$f$  – частота радиоволн, Гц.

Как известно, при определении координат объекта радиотехническими методами дальность до цели определяется путем умножения измеренного времени запаздывания отраженного от цели импульса относительно зондирующего импульса на скорость света в вакууме. Однако вследствие рефракции радиоволн направление прихода отраженной волны не совпадает с истинным направлением на цель. Также и дальность из-за разности скорости распространения волны в атмосфере и в вакууме не соответствует истинной.

Разные значения индекса рефракции приводят к разным временным задержкам радиосигналов в атмосфере. Параметром, характеризующим такое воздействие в тропосфере, может являться вертикальный профиль индекса рефракции радиоволн. Поэтому для использования приемной аппаратуры спутниковых навигационных систем в качестве станций мониторинга необходима оценка этого параметра из фазовых измерений.

Флуктуации измеряемых параметров радиосигналов СНС при распространении в неоднородной атмосфере обусловлены изменением индекса рефракции. Систематическое изменение имеет в основном высотный ход. Высотный градиент метеопараметров в атмосфере формирует высотный профиль индекса рефракции дециметровых радиоволн и вызывает явление вертикальной рефракции. Температура и влажность часто изменяются с

высотой немонотонно. От земной поверхности до высот 5-6 км существуют инверсии, слои с резким падением температуры, а также облачные слои до высот 10-12 км. Вертикальные градиенты показателя преломления достигают значений от нескольких единиц до 10-20 N-единиц/м (1 N-единица =  $(n - 1) \cdot 1000000$  соответствует изменению оптического пути 1 мм на км). Интенсивность изменений метеопараметров падает с увеличением высоты над земной поверхностью. Динамические процессы в реальной атмосфере формируют неоднородную изменчивую трехмерную структуру индекса рефракции дециметровых радиоволн.

Таким образом, вертикальный профиль индекса рефракции характеризует стратификацию атмосферы, а его изменчивость – временные флуктуации атмосферных параметров.

Дополнительный путь радиоволны от спутника до антенны, связанный с рефракцией в атмосфере

$$L = 10^{-6} \int_s N(s) ds \quad (1)$$

Интеграл взят по линии радиотрассы от спутника до антенны.

Для решения обратной задачи восстановления высотной и горизонтальной структуры тропосферы мы выбрали данные о фазе сигнала с каждого спутника, так как измерения фазы (электрической длины пути радиоволны) более точны, чем измерения псевдодальности (группового пути). Для исключения ошибок в ходе часов применяется метод разностных измерений для разнесённых пунктов с известными координатами.

Наличие сети приемников GPS-ГЛОНАСС позволяет снимать характеристики радиосигнала на трассах Земля-спутник и вычислять соответствующие тропосферные задержки в пространственно-разнесенных пунктах. Двухчастотная система приемников позволяет исключить влияние ионосферы на вычисление значений тропосферной задержки.

Система спутников GPS- ГЛОНАСС позволяет одновременно наблюдать на небесной полусфере несколько источников радиосигнала, что позволяет дистанционно зондировать сетью антенн различные участки тропосферы под разными углами места радиотрасс.

Для решения задачи восстановления вертикального профиля индекса рефракции радиоволн используется метод решения некорректных обратных задач, основанные на решении интегральных уравнений.

Задача сводится к решению интегрального уравнения (1) относительно высотного профиля индекса рефракции. Решение обратной задачи (1) есть интегральное нелинейное уравнение первого рода, представляющее собой некорректную задачу. Искомая величина – функция  $N(h)$ . Модель измерений описывает типичное интегральное уравнение, в которое неизвестная функция  $N(h)$  входит в виде части подынтегральной функции.

Для оценки тропосферной задержки из данных спутниковых навигационных систем необходимо составить систему уравнений, связывающую интересующие параметры с измерениями. В основе составления этой системы лежит уравнение измерения фазы несущей:

$$\Phi = S(t - \tau - dt_R) + c \cdot (dt_R - dt_S) + N \cdot \lambda + STD - I + \varepsilon$$

здесь  $\Phi$  - измеренная фаза в метрах;  $t$  - время записи сигнала приемником;  $\tau$  - время транзита сигнала от спутника до приемника;  $dt_R$  - ошибка часов приемника;  $S$  - геометрическая дальность между антенной приемника и спутником в момент передачи сигнала  $t - \tau - dt_R$ ;  $c$  - скорость света в вакууме;  $dt_S$  - ошибка часов спутника;  $\lambda$  - длина несущей волны;  $STD$  - наклонная задержка сигнала в тропосфере в направлении спутника;  $I$  - ионосферная задержка;  $\varepsilon$  - прочий шум измерений.  $N$  - Фазовая неоднозначность (в циклах), остающаяся постоянной во времени.

При вычислении геометрической дальности используются данные высокоточных эфемерид орбит спутников в формате *sp3*, получаемые через Всемирную Службу ГНСС. Этим мы корректируем ошибки часов спутника. Ошибки часов спутника также корректируются применением синхронных измерений с двух пространственно-разнесенных антенн приемников ГНСС.

Время распространения сигнала можно определить с достаточной точностью следующим образом:

$$\tau = \frac{S(t)}{c} .$$

Оценка ошибки часов приемника, необходимая для определения времени передачи сигнала  $t - \tau - dt_R$ , определяется с помощью кодового измерения  $P$ :

$$dt_R = \frac{P - S(t - \tau)}{c} + dt_S .$$

Для корректировки ошибок ионосферы, в случае двухчастотных приемников используется метод измерений на частотах  $L1$  и  $L2$ . Линейные комбинации двухчастотных измерений не содержат ионосферных погрешностей первого порядка. Ионосферная задержка может быть устранена формированием ионосферно-свободной комбинации разности фазовых путей двух пространственно-разнесенных антенн. В обычных условиях удаляется ионосферный эффект первого порядка. Однако, при исключении ионосферного влияния никак не оговаривается проявление турбулентных процессов и их влияние на оценки структуры полей тропосферных параметров.

На сети приемников, разнесенных на малые базы в несколько километров, ионосферные поправки устраняются с использованием одного двухчастотного приемника.

Для того чтобы исключить влияние ионосферной составляющей  $I$ , в спутниковых навигационных системах используются измерения, сделанные на двух несущих частотах:

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= S(t - \tau - dt_R) + c \cdot (dt_R - dt_S) + N_1 \cdot \lambda_1 + STD - I_1 + \varepsilon_1 \\ \Phi_2 &= S(t - \tau - dt_R) + c \cdot (dt_R - dt_S) + N_2 \cdot \lambda_2 + STD - \gamma^2 \cdot I_1 + \varepsilon_2\end{aligned},$$

где  $\gamma = 77/60$  - отношение несущих частот. Здесь использован тот факт, что основная часть ионосферной задержки обратно пропорциональна квадрату частоты. Полученная система позволяет сформировать ионосферно-свободную комбинацию:

$$F = \frac{\gamma^2 \cdot \Phi_1 - \Phi_2}{\gamma^2 - 1} = S(t - \tau - dt_R) + c \cdot (dt_R - dt_S) + N_F + STD + \varepsilon_F$$

Где  $N_F$  - ионосферно-свободная фазовая неоднозначность (в метрах).

$STD$  – вектор измерений – свободные члены в уравнении.

Двойным дифференцированием фазовых измерений мы добиваемся устранения вклада ошибок часов спутника и ошибок часов приемника. Вектор неизвестных – значения индекса рефракции на различных высотных уровнях в тропосфере.

Для решения задачи пространственного распределения индекса рефракции радиоволн в тропосфере применяется метод радиотомографии [2]. В данном методе используется дискретизация атмосферы по вокселям (элементарный объем в виде параллелепипеда). Для каждого вокселя вводится постоянный индекс рефракции, как неизвестная величина.

Дискретизируя (1) получаем аналитическую запись:

$$STD_j = 10^{-6} \cdot \sum_i N_i \cdot \Delta S_{i,j} \quad (2)$$

где  $STD_j$  – задержка радиолуча в тропосфере,  $N_i$  – индекс рефракции  $i$ -го вокселя,  $\Delta S_{i,j}$  – длина пути радиолуча в  $i$ -ом вокселе для  $j$ -го уравнения (спутника).

Выражение (2) представляет собой систему уравнений. Решение которой – суть обратной задачи томографии. Для составления системы уравнений (2) требуется выбрать сетку элементарных объемов (вокселей). На рис. 1 приведены некоторые примеры такой сетки. Кроме того требуется рассчитать  $STD_j$  – свободный член, связанный с измерениями ГНСС. Программа **tomography** вычисляет вторые разности фазовых измерений [2, 3] и составляет систему уравнений (2) именно на эти величины.

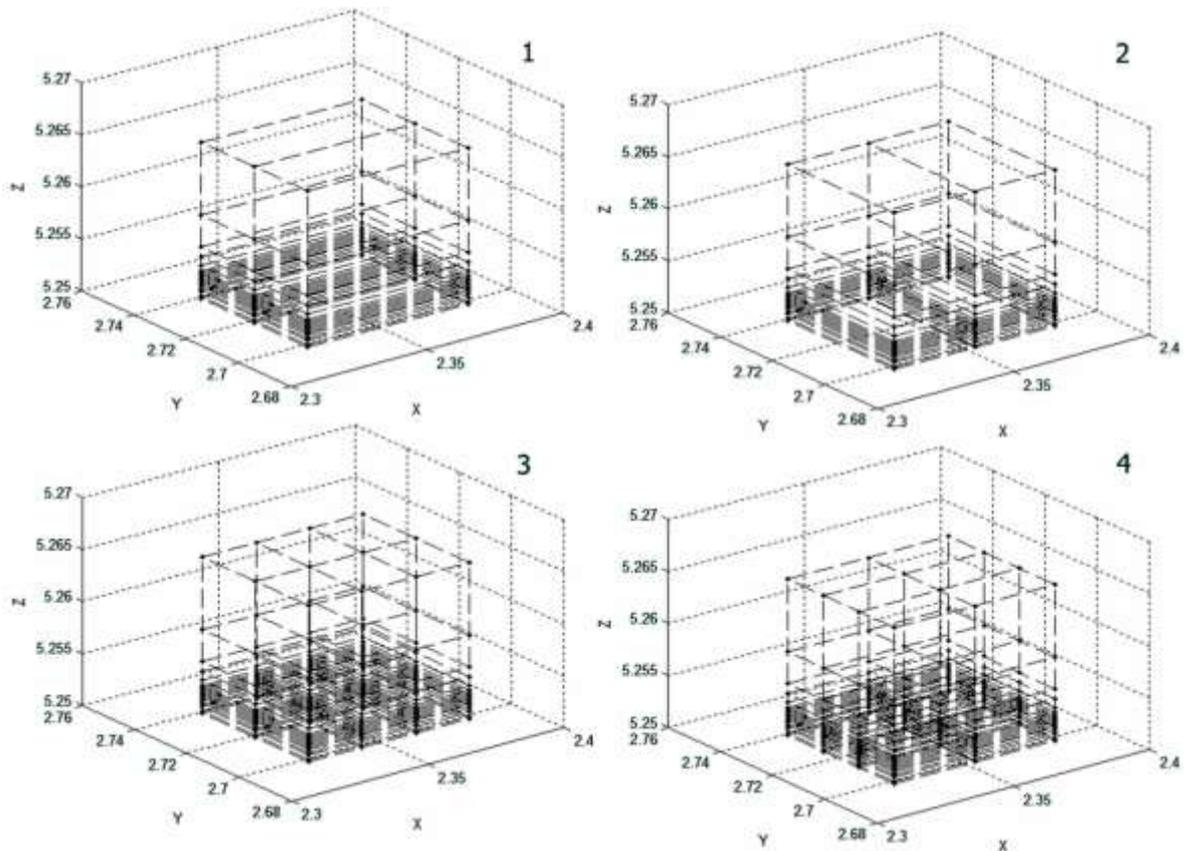


Рис. 1. Сетка вокселей, состоящая из двух столбцов (1 и 2), из 6 столбцов (3 и 4)

Подробнее о спутниковой томографии можно узнать из [4]. Основные процессы, которые выполняет программа при расчете:

- обработка данных ГНСС (RINEX файлы, эфемериды),
- обнаружение зафиксированных спутников,

- построение сетки вокселей,
- вычисление вторых разностей фазовых измерений,
- вычисление ионосферных поправок,
- составление системы уравнений (2) для решаемой задачи,
- если требуется – накопление данных для более эффективного решения задачи,
- решение системы уравнений (2),
- отображение результатов в виде графика,
- предоставляет дополнительно необходимые инструменты, напрямую не связанные с решением обратной задачи томографии (слияние входных данных, визуальное отображение структуры вокселей и расположения станций и радиозонда и т.д.).

## Компоненты программы

Перечислим основные компоненты программы. Код ***tomography*** разделен на папки, согласно его предназначению.

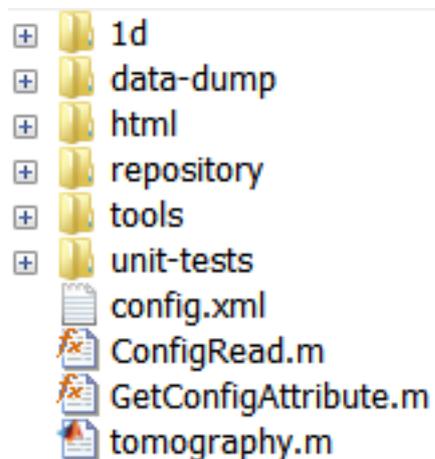


Рис. 2. Компоненты программы tomography

Папка ***1d*** содержит код, который является устаревшим (deprecated). Это ранняя версия программы, разработанная для одномерных расчетов. В последних версиях эта программная часть не используется.

В папке ***data-dump*** сохранены дампы рабочей базы данных. Это нужно для быстрого старта расчетов. Дампы можно сохранять самостоятельно и мы настоятельно рекомендуем это для того, чтобы избежать повторения процесса обработки входных данных при повторяющихся расчетах. Например, файл ***2009-08-18\_local-noon.mat*** содержит сохраненную базу данных для локального полдня за 18 августа 2009 г. Кроме этого ***data-dump*** содержит файлы с макетами данных для модульных тестов. Каждый модульный тест загружает необходимые для себя данные для автоматического тестирования определенного метода (процедуры) программы. Например, ***cap-DoubleDiff.mat*** – макеты данных для метода ***GetDoubleDiff***.

Компонента ***html*** используется для отображения текстовых или графических сообщений при помощи html разметки.

Хранилище *repository* – ядро программы. Каждый файл представляет собой независимый метод (подпрограмму). **ВНИМАНИЕ:** изменения этой части программы может привести к ее полной неработоспособности.

Модуль *tools* является надстройкой к основной программе. Это набор инструментов, которые не принимают непосредственное участие в расчетах, а используется для дополнительных операций. Например, графическое представление сгенерированной программой структуры вокселей, запуск мониторинга и т.д.

В *unit-tests* собраны модульные тесты. Их предназначение – автоматическая прогонка частей программы с целью выявления ошибок. Работают на основе макетов данных.

В *config.xml* записана конфигурационная информация для запуска программы.

Методы *ConfigRead.m* и *GetConfigAttribute.m* выполняются до подключения ядра программы и предназначены для ее подготовки к работе.

Компонента *tomography.m* собирает все части программы (модули, методы, данные и т.д.) и выполняет расчеты. Запуск программы осуществляется именно через эту компоненту.

## Данные

Для проведения расчетов необходимы следующие входные данные:

1. координаты приемников (антенн),
2. данные наблюдений (в формате RINEX),
3. координаты спутников (эфемериды).
- 4.

Для получения 1 и 2 из списка, указанного выше, требуются текстовые файлы наблюдений в формате The Receiver Independent Exchange Format (RINEX). Это данные записей приемных станций, которые с определенной периодичностью фиксирует записи «видимых» в данной местности спутников. Подробнее о формате RINEX можно узнать из [5]. Третий элемент из списка выше – эфемериды GPS спутников. Это общедоступные данные по координатам спутников, записанные с фиксированной периодичностью. Точные эфемериды состоят из общеземных геоцентрических координат каждого спутника, определенных в Общеземной наземной системе отчета и включают поправки часов. Эфемериды вычисляются для каждого спутника с интервалом 15 мин. Точные эфемериды – это продукт постобработки. Данные собираются станциями слежения, расположенными по всей территории Земли. Далее эти данные передаются в Международную Службу GPS (IGS), где и происходит вычисление точных эфемерид. Точные эфемериды становятся доступными приблизительно через 2 недели после времени сбора данных и имеют точность менее 5 см и 0.1 нс.

По адресу <ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/product/> или <ftp://ftp.glonass-iac.ru/IGS/PRODUCTS/> можно найти данные эфемерид спутников GPS/ГЛОНАСС и описания сервисов IGS.

Все эти данные в общем случае поступают в программу *tomography* в виде текстовых файлов. Программа их обрабатывает и производит необходимые расчеты. Необходимо отметить, что процесс обработки данных

является наиболее ресурсоемким и продолжительным. Это связано с тем, что число входных данных велико. Поэтому в *tomography* реализована схема кэширования данных и только первый расчет требует обработки файлов с данными. После очистки рабочей области в MatLab кэш удаляется из памяти ПК. Для того чтобы обработанные данные по спутникам и антеннам можно было использовать в независимости от состояния рабочей области (например, на другом ПК), необходимо экспортировать глобальные переменные, т.е. сохранить на жесткий диск, и в последующем загружать их в рабочую область.

Перечень глобальных переменных:

- globAnt
- globObsDate
- globObsSat
- globSp3Date
- globSp3Sat

Описанная процедура сохранения данных будет описана в разделе «Некоторые особенности использования программы».

## Выполнение расчетов

Для выполнения расчетов требуется выполнить следующий алгоритм действий:

1. найти необходимые файлы данных (по дате и имеющимся приемникам),
2. выбрать структуру для сетки вокселей (этот вопрос является весьма сложным, поэтому в данной работе будет указана рекомендуемая сетка в задании),
3. запустить программу,
4. программа запросит выбрать файлы данных – выбрать необходимые,
5. после выполнения расчетов вывести график для одного из столбцов вокселей (это будет вертикальным профилем индекса рефракции тропосферы).

Для более детального разбора алгоритма работы приведем пример расчета за 18 августа 2009 г. в 8 утра по местному времени (т.е. по московскому). Приступим к выполнению расчетов, согласно с приведенным выше алгоритмом.

**Пункт №1.** Начнем с того, что местное время нужно перевести в UTC (всемирное координированное время). Именно UTC время фиксируется в файлах наблюдений и эфемерид спутников. Время в Казани определяется по часовому поясу UTC+4, поэтому нам требуется использовать данные за время 4 час 00 минут по UTC. Результатом этого пункта у нас является набор файлов наблюдений и файл с эфемеридами.

**Пункт №2.** Выберем структуру  $3 \times 2 \times 16$ . Это означает, что по оси X будет 3 вокселя, по оси Y – 2 вокселя и по оси Z – 16 (рис.1-3). Основной системой координат, используемой в данной работе выступает геоцентрическая прямоугольная гринвичская система координат, начало которой расположено в центре масс Земли, ось Z направлена в средний северный полюс, ось X

направлена в точку пересечения Гринвичского меридиана с экватором, ось  $Y$  дополняет систему до правой. Далее воксели по оси  $Z$  будут называться слоями.

Теперь разберемся, как в программе *tomography* указать необходимую структуру вокселей для расчетов. В разделе «Компоненты программы» мы упоминали, что есть конфигурационный файл программы. В этот файл включены две настройки, которые позволяют задать нужную размерность сетки вокселей: *x-voxels* и *y-voxels*.

**Пункт №3.** Программа запускается в MatLab. Учебная версия программы *tomography* снабжена скриптом запуска для упрощения работы. Поэтому достаточно в папке программы дважды кликнуть на файл *start.m*, что приведет к запуску MatLab и подготовки рабочей папки. Перед началом вычислений необходимо удостовериться, что командная строка MatLab открыта и доступна для ввода команд (это потребуется при использовании инструментов программы). В меню MatLab (наверху экрана) выбрать *Desktop – Command Window* (см. рис. 4). Теперь необходимо перейти в редактор кода (*Editor*) и нажать кнопку запуска (рис. 3). Если курсор установлен в окно редактора кода, то программу можно запустить клавишей *F5*. О том, что программа запущена, будет свидетельствовать надпись с копирайтом в командной строке.



Рис. 3. Запуск программы

**Пункт №4.** Ввод данных для расчета. Это файлы с расширением *sp3*. Один файл содержит координаты спутников за сутки. Итак, в появившемся окне с запросом файла выбираем нужный файл (в нашем случае это *igs15452.sp3*). Программа произведет обработку файла (во время обработки будет отображаться прогресс-бар) (рис. 5).

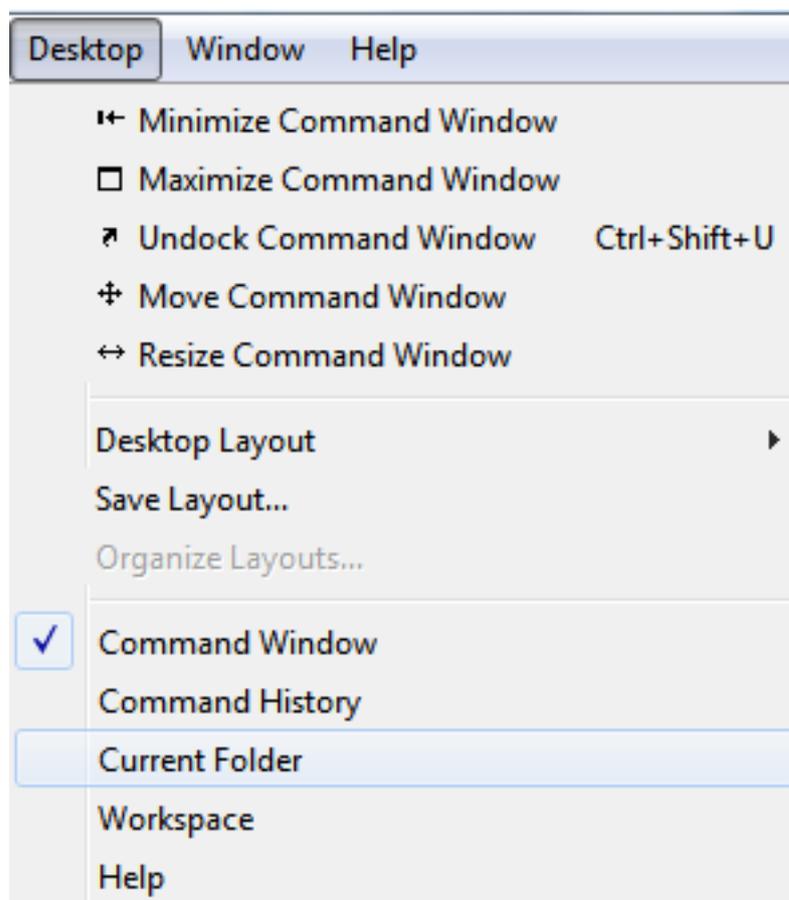


Рис. 4. Открыть окно командной строки

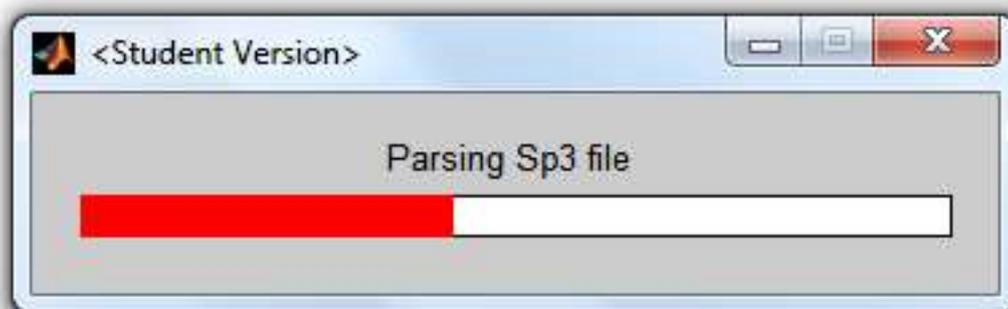


Рис. 5. Обработка файла эфемерид спутников

После успешного завершения данной операции отобразится окно для выбора файла наблюдений. Тут нужно быть внимательным, т.к. нужно ввести несколько файлов. Окно позволяет указать несколько файлов. Для облегчения поиска будут отображаться только файлы наблюдений (с расширениями *.obs* и файлы, расширения которых заканчиваются на «o»). В этом окне необходимо

выбрать все файлы, которые будут использоваться в расчетах. Следует отметить, что программа перед обработкой проводит проверку файлов по содержанию: если он не соответствует данным наблюдений, то выдается предупреждение и некорректный файл в расчетах использоваться не будет.

Через несколько секунд появится прогресс-бар, в нем будет отображаться информация о ходе выполнении обработки файлов (в скобках указывается номер обрабатываемого файла по счету, например «1 of 7»). Отметим, что данный процесс довольно длительный и занимает около 15-20 минут. В это время следует ожидать завершения обработки всех файлов.

После того, как обработка всех файлов с данными завершено, программа предложит выбрать время расчета. Следует указать время, для которого производится расчет. Но крайне не рекомендуется выбирать нулевую секунду часа, поэтому мы выберем для расчета 4 часа 0 минут 5 секунд. Кроме этого, для сложной сетки вокселей программа позволяет сделать накопление данных за период с интервалом 5 секунд. Не будем подробно описывать процедуру и просто приведем таблицу для выбора значения поля *Period*:

Количество вокселей	Значение поля <i>Period</i>	Пример структуры сетки
32	1	1×2×16, 2×1×16
64	2	2×2×16
96	3	3×2×16, 2×3×16

Максимальное значение этого поля – 5. При попытке ввести больше или неверное значение будет выдано предупреждение, и выполнение расчетов остановится. Необходимо повторно запустить программу – обработка данных уже выполняться не будет, сразу появится окно выбора времени. Мы выбрали структуру 3×2×16, поэтому из таблицы следует указать *Period* равным трем (рис. 6).

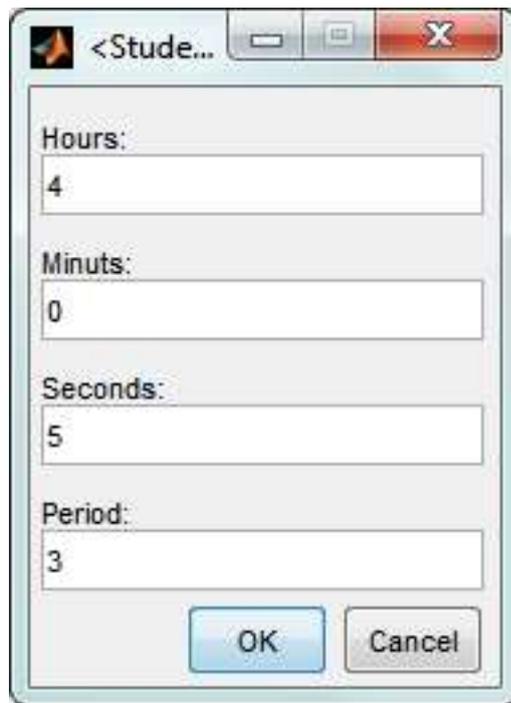


Рис. 6. Выбор времени и периода накопления данных

**Пункт 5.** Итак, данные введены, время расчета указано. После этого программа выполнит вычисления и выдаст результат в виде графика (вертикальный профиль индекса рефракции тропосферы). По умолчанию программа **tomography** построит графики для двух первых столбцов вокселей сетки. Для лучшего понимания приведем порядок нумерации столбцов. Наименьший номер присвоим вокселю с минимальными координатами узлов, далее увеличение происходит по оси X. При достижении последнего вокселя на оси X переходим на один по оси Y в направлении увеличения. Ось Z имеет наименьший приоритет в нумерации вокселей (по ней увеличение будет происходить в последнюю очередь). Для наглядности приведем структуру  $2 \times 2 \times 2$  на рис. 7. Номер столбца вокселей будет совпадать с номером вокселя в первом (нижнем слое).

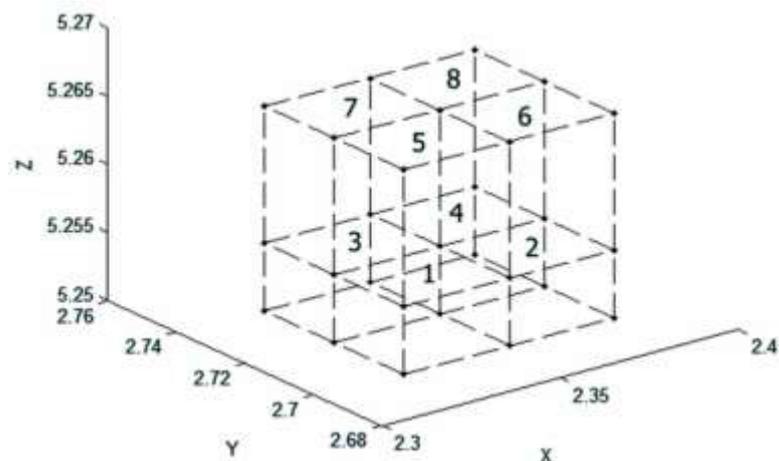


Рис. 7. Порядок нумерации вокселей

Для того чтобы построить вертикальный профиль для необходимого столбца следует воспользоваться специальным инструментом (компонента программы **tomography**) *refractivity\_plotter*. Номер столбца вокселей указывается в конфигурационном файле (*plot-voxel-column*). Производится это аналогично тому, как указывается размер сетки вокселей.

## Некоторые особенности использования программы

Используемой программе tomography свойственна строгость в использовании. Например, выше указывалось, что при ошибочном вводе данных выполнение программы завершается без возможности повторного ввода. Отменить обработку файлов можно, закрыв окно прогресс-бара (рис. 5). При этом рекомендуется очистить рабочую область командой

*clear all;*

и перезапустить программу. Все команду следует вводить в окно командной строки Matlab (см. пункт №3 в предыдущем разделе). Символ >> обозначает, что CLI готов к вводу команд. Если в начале строки не встречаются указанные символы, значит в данный момент идет выполнение расчетов или вывод сообщения в окно.

При запуске программы не из текущего каталога Matlab выдаст сообщение с вопросом: изменить каталог или добавить? Следует выбирать пункт изменить каталог (Change Folder).

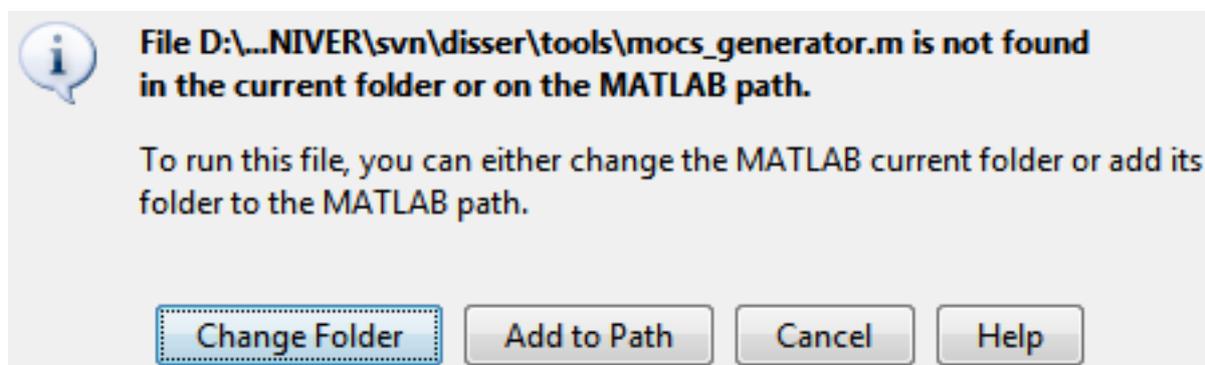
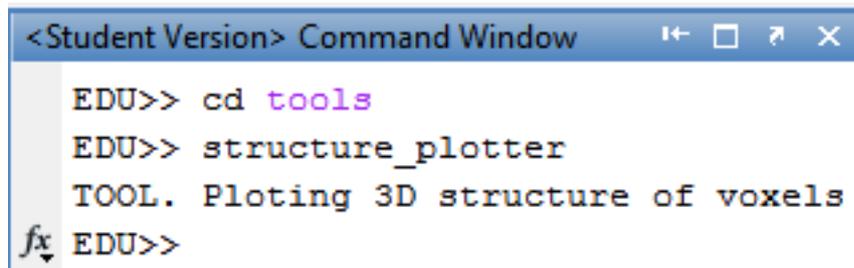


Рис. 8. Изменить каталог

Дополнительные компоненты программы запускаются через CLI (command line interface) в Matlab. Например, для запуска инструмента, отображающего структуру вокселей, следует перейти в папку инструментов (командой *cd*) и ввести имя инструмента (оно распознается как команда):

*cd tools*  
*structure\_plotter*

Как это выглядит см. на рис. 9. Теперь подробнее разберемся с обработкой данных. Выше говорилось о том, что обработанные данные кэшируются и при повторном запуске программы их обработка не требуется. Но это справедливо только до очистки рабочей области (очистить можно командой *clear all* или закрыв Matlab).



```
<Student Version> Command Window
EDU>> cd tools
EDU>> structure_plotter
TOOL. Ploting 3D structure of voxels
fx
EDU>>
```

Рис. 9. Использование инструмента

Глобальные данные (кэш) можно сохранить через контекстное меню в рабочей области (рис. 10). Чтобы открыть рабочую область в меню Matlab выберите *Desktop* и установите галочку *Workspace*.

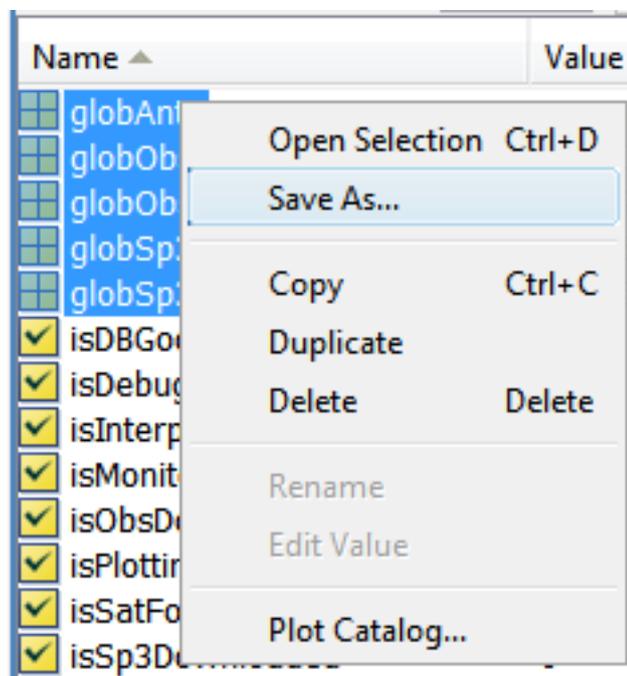


Рис. 10. Сохранения кэша в файл

В будущем этот файл может быть использован в любое время. Для импорта данных из файла следует его открыть через меню Matlab или загрузить, как показано на рис. 11.

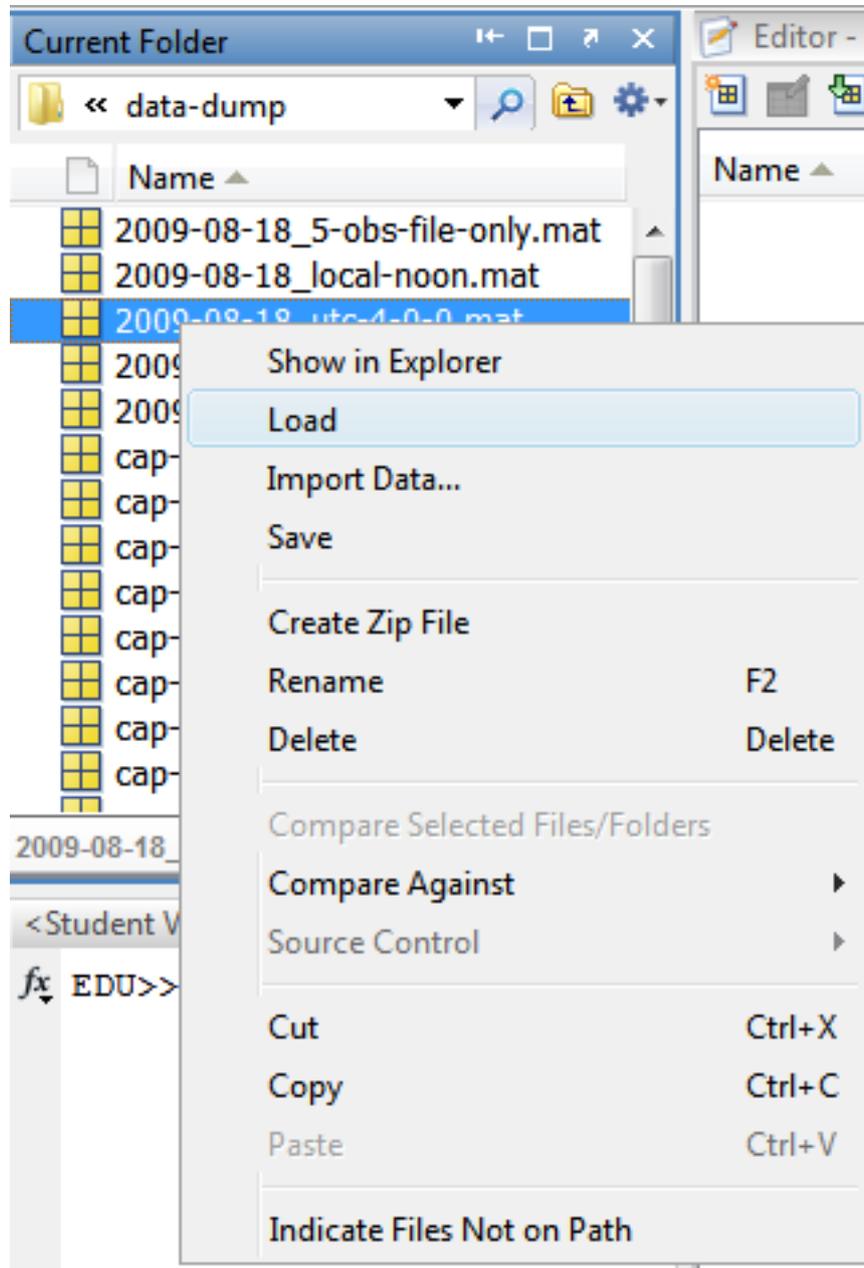


Рис. 11. Загрузка данных из файла

Если файл был правильно сохранен, то после загрузки в рабочей области восстановятся все глобальные переменные.

## Задание

### *Первое задание*

Запустите программу и выберите любой файл/файлы с данными. Отменить выполнение программы, нажав *Cancel* в окне выбора времени расчета. Кэш данных сформирован. Выполните процедуру экспорта данных в файл, а затем загрузите из файла.

**Результат выполнения задания:** сохраненный файл с глобальными данными.

### *Второе задание*

Выполнить расчет вертикального профиля индекса рефракции для местности с координатами  $X = xx$   $Y = yy$   $Z = zz$ . Допустимый диапазон разброса координат: ---. День 19 августа 2009 г. Время расчета – 9.00 по местному времени. Результат представить в виде графика  $h(N)$  и привести использованную сетку вокселей (структура в виде  $X \times Y \times Z$  и рисунок этой сетки). Воспользоваться специальным инструментом программы для построения сетки.

## Литература

1. Troller, M. Tomographic Determination of the Spatial Distribution of Water Vapor Using GPS Observations / M. Troller, A. Geiger, E. Brockmann, J.-M. Bettems // *Advances in Space Research*. - 2006. - V.37. - P.2211-2217.
2. Низамеев, А.Р. Трехмерная структура индекса рефракции радиоволн в тропосфере по измерениям сети приемных станций GPS-ГЛОНАСС [Текст] / А.Р. Низамеев, Е.С. Нефедьев, И.Р. Низамеев, Г.М. Тептин // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2012. – № 9. – С. 27 – 31.
3. Schüler, T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation / T. Schüler – München: Univ. der Bundeswehr, 2001. – 364p.
4. Куницын, В.Е. Радиотомография ионосферы [Текст] / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева. – М.: Физматлит, 2007. – 336 с.
5. Gurtner, W. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2 / W. Gutner, L. Estey // *specification*
6. Хуторова О.Г. ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ РАДИОСИГНАЛАМИ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ Учебное пособие / О.Г. Хуторова; Каз.федер.ун-т. – Казань, 2011. – 117 с.