

Министерство образования и науки Украины

Харьковский национальный университет

имени В. Н. Каразина

А.М. Цымбал, В.Н. Федоренко, Ю.Б. Милованов

**Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по спецкурсам
кафедры космической радиофизики**

Харьков 2008

УДК 550.388.2 (075.8)

ББК 26.239я73

Ц94

Рекомендовано ученым советом радиофизического факультета Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина

(протокол №5 от 22 мая 2007 г.)

Ц94 Методические указания к выполнению лабораторных работ по спецкурсам кафедры космической радиофизики / Составители: Цымбал А.М. , Федоренко В.Н., Милованов Ю.Б. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2008. - 52 с.

В методических указаниях приведены необходимая информация по тематике лабораторных работ, указания по их выполнению, контрольные вопросы, список рекомендуемой и дополнительной литературы.

УДК 550.388.2 (075.8)

ББК 26.239я73

Ц94 Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із спецкурсів кафедри космічної радіофізики / Укладачі: Цымбал А.М. , Федоренко В.Н., Милованов Ю.Б. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2008. - 52 с.

У методичних вказівках наведені необхідна інформація з тематики лабораторних робіт, вказівки по їх виконанню, контрольні питання, список літератури, що рекомендується, та додаткової.

УДК 550.388.2 (075.8)

ББК 26.239я73

© Харьковский национальный университет
имени В.Н. Каразина, 2008

© Цымбал А.М., Федоренко В.Н., Милованов Ю.Б., 2008

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ ПО РЕГИСТРАЦИЯМ РАДИОСИГНАЛОВ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ СРЕДНЕОРБИТНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ GPS И ГЛОНАСС. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

Цель работы – ознакомиться с методикой определения полного электронного содержания ионосферы по регистрациям радиосигналов среднеорбитных навигационных ИСЗ, провести расчеты полного вертикального электронного содержания ионосферы по регистрациям сигналов, полученным в лабораторной работе №1 (соответствующие RINEX файлы).

При подготовке к лабораторной работе следует изучить теоретические основы метода спутникового радиозондирования околоземного космического пространства и источники погрешностей метода.

Общие сведения о методах радиозондирования околоземного космического пространства

Одним из важных и актуальных вопросов исследования околоземного космического пространства является разработка методов прогнозирования условий в этой среде - так называемой "космической погоды". При этом необходимо всесторонне исследовать зависимости параметров околоземного пространства от разных факторов: солнечной активности, сезона, времени суток, широты, магнитной активности и др. Такие исследования важны не только для создания физических моделей процессов, которые протекают в околоземном пространстве, но и для дальнейшего развития различных радиотехнических систем (связи, радиолокации, радионавигации, радиоастрономии и др.), надежное и эффективное функционирование которых прямо зависит от условий в среде, где распространяются радиосигналы.

Для проведения измерений параметров разных областей околоземного пространства, в частности ионосферы, используются различные методы, которые можно разделить на две группы: прямые и косвенные, большей частью дистанционные. К последним относятся радиофизические методы зондирования. Суть этих методов состоит в нахождении связи между параметрами среды и измеренными характеристиками распространения радиосигналов.

К числу радиофизических методов относится и метод спутникового радиозондирования. В этом методе в качестве зондирующих, пробных, радиоволн используются радиосигналы спутников, большей частью разных радионавигационных систем, которые находятся на разных орбитах. В настоящее время – это радиосигналы низкоорбитных ИСЗ (с высотой орбиты $Z < 1000$ км) систем "Цикада" (Россия) и среднеорбитных ИСЗ ($Z \sim 20\ 000$ км) систем NAVSTAR (GPS) (США) и ГЛОНАСС (Россия). При этом используются измерения таких параметров как фаза, доплеровский сдвиг частоты, амплитуда, время распространения (или так называемая псевдодальность).

Основные параметры ионосферы, которые позволяет измерять метод спутникового радиозондирования – это полное электронное содержание ионосферы, которое является

индикатором глобального состояния ионосферы, а также параметры неоднородностей электронной концентрации, вызывающих мерцания радиосигналов, и волновых возмущений ионосферы.

Поскольку в каждой спутниковой навигационной системе имеется большое количество ИСЗ с подобными орбитами, появляется возможность систематических измерений в разных географических районах и в разных геофизических условиях, то есть практически осуществлять мониторинг состояния ионосферы. Так, в это время, при наличии на территории США широкой сети пунктов приема радиосигналов ИСЗ системы NAVSTAR есть возможность построения карт электронного содержания (для этого региона) через каждые 15 минут. Такие широкие возможности и сравнительно небольшая стоимость соответствующих радиотехнических систем обусловили широкое распространение метода спутникового радиозондирования. Следует отметить, что вследствие специфики фазовых измерений (фаза измеряется с точностью до целого числа циклов), в настоящее время определение N_0 ведется, в основном, по измерениям псевдодальностей на двух частотах. Этим измерениям присущи довольно большие случайные ошибки, вследствие чего затруднительно исследовать тонкую структуру вариаций N_0 (вариации с малыми пространственными масштабами). Поэтому актуальным является развитие методов фазовых измерений N_0 .

Отметим также необходимость одновременных измерений по радиосигналам низкоорбитных и среднеорбитных ИСЗ. При этом по совместным измерениям в одном пункте наблюдения можно определить такой важный параметр как электронное содержимое в протоносфере, а измерения доплеровского сдвига частоты низкоорбитных ИСЗ позволяют более точно определять параметры волновых возмущений.

Методика определения электронного содержания ионосферы по регистрациям радиосигналов среднеорбитных ИСЗ

Приемники радиосигналов ИСЗ систем ГЛОНАСС или NAVSTAR регистрируют время Δt распространения сигналов от ИСЗ на двух частотах и соответствующие фазы. На выходе приемника обычно выдается так называемая псевдодальность: $P = c \Delta t$ (c – скорость света). Эту величину можно записать в виде:

$$P = R_0 + \Delta R_{тр} + \Delta R_{ион} + \delta R, \quad (1),$$

где R_0 – расстояние от ИСЗ до приемника, $\Delta R_{тр}$, $\Delta R_{ион}$ – поправки на тропосферу и ионосферу, δR – ошибки измерений.

При измерениях на двух частотах, вследствие разной зависимости поправок от частоты, можно выделить составляющую за счет ионосферы, которая в первом приближении определяется полным электронным содержанием N_f между ИСЗ и приемником (наклонное полное электронное содержание). Формула для определения N_f имеет вид

$$N_l = \frac{(P_2 - P_1) \cdot f_2^2}{40.35(1 - f_2^2 / f_1^2)}, \text{ м}^{-2} \quad (2),$$

где $f_{2,1}$ – частоты сигналов в Гц, $P_{2,1}$ – измеренные (в м) на этих частотах псевдодальности.

Таким образом, казалось бы, есть прямой путь определения N_l по измерениям псевдодальности. Однако, как показывают экспериментальные данные, такие измерения подвержены случайным ошибкам (влияние препятствий, многолучевость и др.). Пример таких измерений N_l приведен на рис.1. Естественно, что проследить точно временные и пространственные изменения электронного содержимого ионосферы по таким измерениям невозможно.

Следует отметить, что значительно меньше подвержены случайным погрешностям фазовые измерения. Но при этом возникает проблема неоднозначности фазовых измерений (абсолютно измеряются лишь изменения фазы сигнала от точки к точке при перемещении ИСЗ).

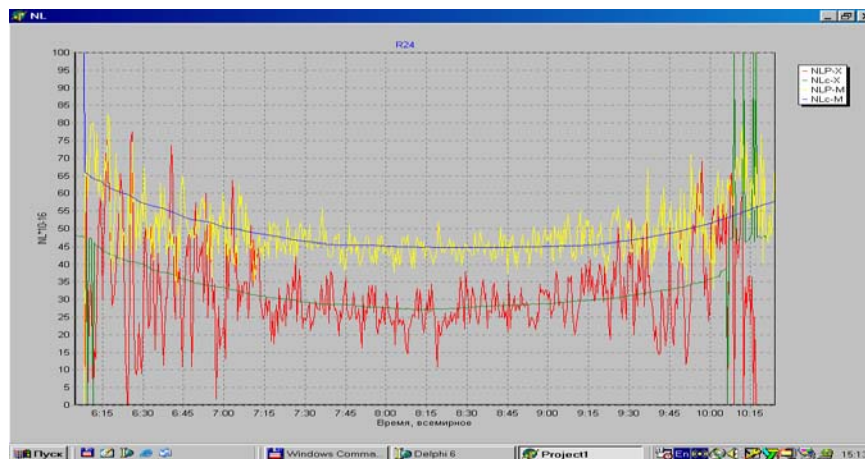


Рис.1. Временные зависимости N_l , полученные по регистрациям псевдодальностей, и соответствующие усредненные кривые

В любой момент времени для фазы сигнала можно записать выражение: $\Phi = \Phi_0 + \Phi_{\text{экс}}$, где

Φ_0 – набег фазы сигнала на всем пути приемник–ИСЗ в какой-либо момент времени, $\Phi_{\text{экс}}$ – измерения фазы, начиная от этого момента.

Для получения составляющей набег фазы за счет ионосферы в приемном устройстве значения фазы умножаются на величину длины волны для соответствующей частоты. С учетом этого можно записать выражение:

$$\frac{\Phi_{01}\lambda_1 - \Phi_{02}\lambda_2}{2\pi} + \frac{\Phi_{1\text{экс}}\lambda_1 - \Phi_{2\text{экс}}\lambda_2}{2\pi} = 40,35N_l \frac{(1 - f_2^2 / f_1^2)}{f_2^2}, \quad (3)$$

где $\Phi_{01,02}$ – неизвестные константы.

Используется следующая методика для их нахождения.

Перепишем выражение (3) в виде:

$$A = \frac{\Phi_{01}\lambda_1 - \Phi_{02}\lambda_2}{2\pi} = 40,35N_l \frac{(1 - f_2^2 / f_1^2)}{f_2^2} - \frac{\Phi_{1\text{экс}}\lambda_1 - \Phi_{2\text{экс}}\lambda_2}{2\pi}. \quad (4)$$

В левую часть (4) входят неизвестные константы $\Phi_{01,02}$. В правую часть – экспериментальные значения фазы и величина N_l .

Определяем величину A для каждого момента времени (A_i), подставляя в качестве N_l его значения, полученные по измерениям псевдодальностей. Далее усредняем полученные значения A_i и считаем неизвестной обобщенной константой величину

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i, \quad (5)$$

где N - количество точек измерений.

Окончательно для определения N_l имеем выражение:

$$N_l = \frac{(L_1\lambda_1 - L_2\lambda_2 + A)f_2^2}{40,35(1 - f_2^2 / f_1^2)}, \quad (6)$$

где $L_{1,2} = \frac{\Phi_{1\text{экс},2\text{экс}}}{2\pi}$.

Размерность величин f и λ в этом выражении, соответственно, Гц и м.

Далее электронное содержание в вертикальном столбе ионосферы - N_0 - определяется из соотношения:

$$N_0 = N_l \cos\left[\arcsin \frac{R_a}{R_a + 450} \cos \beta\right], \quad (7)$$

где R_a - радиус Земли (км).

Величина N_0 относится к точке (называемой подыоносферной) на поверхности Земли с координатами, которые определяются проекцией точки пересечения луча к ИСЗ со сферической поверхностью радиусом $R_a + 450$ км (центр поверхности совпадает с центром Земли).

Пакет программ для обработки регистраций радиосигналов среднеорбитных навигационных спутников

1. Программы обработки

Программирование велось на языке Object Pascal с использованием объектно-ориентированной технологии. Построение трехмерных графиков и схем запрограммировано на языке AutoLisp в среде AUTOCAD. Поскольку AutoLisp есть интерпретатором, ориентированным на среду AUTOCAD, то для построения трехмерных графиков необходимо наличие AUTOCAD в операционной системе.

Вид интерфейсов программ при обработке радиосигналов среднеорбитальных навигационных спутников приведен на рис. 2.

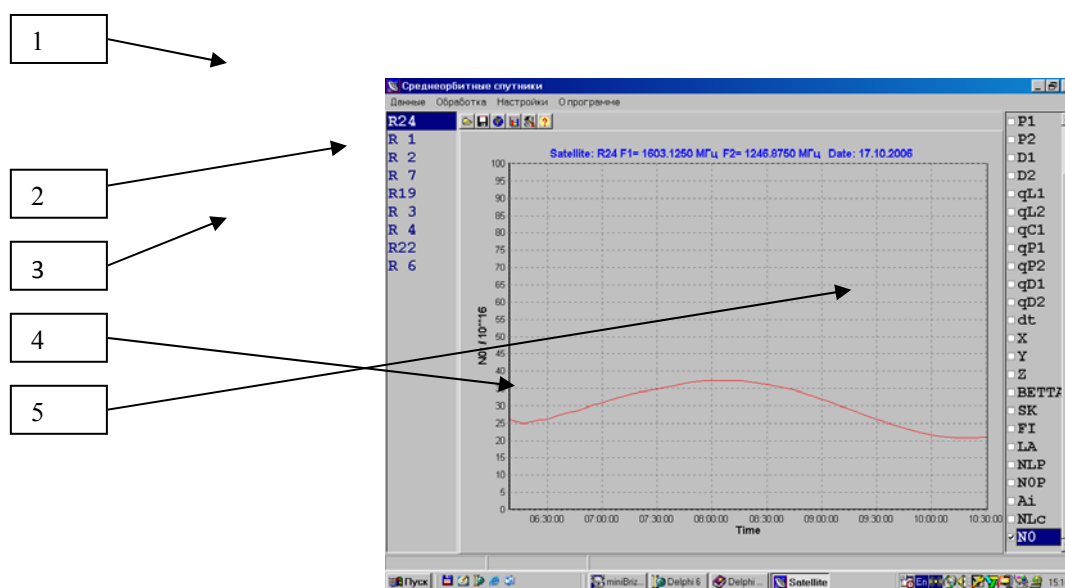


Рис. 2. Интерфейс программы обработки регистраций сигналов среднеорбитальных спутников

Стрелками указаны следующие элементы интерфейса:

- 1- меню.
- 2- панель кнопок.
- 3-список спутников.
- 4-график параметров.
- 5-список параметров для расчета.

2. Инструкция для пользователей программы

Главный интерфейс программы состоит из меню, панели с кнопками быстрого доступа, графика для представления параметров измерений и результатов расчета, списка выбора имени спутника, списка выбора имени параметров измерений и расчета, кнопки выхода.

Вспомогательные диалоги расширяют главный интерфейс программы. Их функции:

- настройки ;
- формирование списка фрагментов пролета спутника ;
- оценка мгновенного спектра представленного фрагмента кривой.

Меню имеет функции:

Данные

Открыть – вызов диалога ввода пары файлов (регистрации выходных данных приемников радиосигналов ИСЗ типа ГЛОНАСС). Первый файл содержит суточные измерения значений псевдодальностей и фазы в границах радиовидимости. Расширение имени файла заканчивается буквой "o". Вторым файлом вносятся координаты спутников, которые периодически передаются со спутников, номера спутников и z-составляющую скорости, в абсолютной системе координат. Расширение имени файла заканчивается буквой "g". Время приведено мировое. Для ввода выбирается любой из этих файлов, второй вводится автоматически. После ввода данных имена спутников заносятся в список выбора, а дальше для каждого спутника и моментов измерения рассчитываются:

- абсолютные координаты;
- ϵ, β -азимут и угол места в локальной системе пункта наблюдения;
- коэффициент перехода от N_L к N_0 ;

φ, λ - широта и долгота подыоносферной точки.

Приемник радиосигналов ИСЗ измеряет также и псевдодальности от спутников GPS. Но для них пока что нет данных о координатах и рабочих частоты, и эти измерения нельзя использовать для определения N_0 . Имена этих спутников не заносятся в список выбора. Но данные по псевдодальностям для GPS спутников можно просматривать, если установить флажок в диалоге <Настройки. Регистрация. Просматривать данные с GPS спутников>.

Сохранить вызывает диалог сохранения текстов файл.

Формируется файл с текстовой таблицей входных и рассчитанных данных для анализа в программе Microsoft Office Excel.

Для оценки N_0 необходимо вначале рассчитать среднее значение параметра A . Оно рассчитывается на всем фрагменте или части пролета спутника. Во время выбора среднего A на всем фрагменте необходимо выбрать для просмотра один из параметров, которые рассчитываются – $N_L, N_{LL}, N_{Lc}, A_i, N_0$. При формировании просмотра одного из этих параметров рассчитывается и среднее A в границах, которые приведены в разделе "Настройки. Расчет. A минимальное максимальное". Если оценивается среднее A по части фрагмента пролета, надо выбрать для просмотра параметр A_i ; с помощью манипулятора "Мышь" выбрать на кривой область A_i и активировать функцию меню "Обработка. Среднее A ". В результате рассчитывается среднее A для выбранной области и загружается диалог "Настройки. Расчет". Поле редактирования "Среднее A " вмещает результат расчета, а флажок "не использовать" указывает на использование среднего A при расчете N_0 .

Для разрешения формирования орбитных и рассчитанных данных в исходном файле служат флажки в разделе "Настройка. Регистрация. Вывод траектории" и "Настройка. Регистрация. Вывод результатов расчета".

Сохранить путь для визуализации

Текущий фрагмент пролета спутника с абсолютными координатами, траектория подыоносферной точки в координатах широта - долгота и значения N_0 выводятся во временный файл "REPOTRS\OUT_ORB.TXT" для следующего формирования схем и графиков в среде AutoCAD. Надо загрузить AutoCAD в OS Windows, если он не был загружен, а дальше просмотреть результаты расчетов с помощью специально разработанных программ (см. ниже).

Спектр фрагмента кривой

Рассчитывается спектр той части кривой, которая отображается на графике в данный момент (с учетом удаления тренда). Вызывается диалог с графиком просмотра кривой спектра. В этом диалоге предусмотрена возможность сохранения результатов расчета в текстовый файл (кнопка "Отчет"). Данные в этом файле представляют два столбика: значения частот (Гц) и значения амплитуд спектра. Также возможен вывод изображения в BMP формате (кнопка "Сохранить изображение").

Среднее A

Расчет среднего A по части фрагмента пролета спутника. Смотри функцию "Сохранить".

Настройки

Вызывается диалог. Диалог включает параметры, необходимые для расчетов. Параметры сгруппированы по трем закладкам – **Расчет, Регистрация и Пункт наблюдения**.

Расчет

Два поля ввода "A" "минимальное" и "максимальное" служат ограничителями для расчета величины среднее A.

Два поля ввода " $L1*\Lambda_1-L2*\Lambda_2$ " "минимальное" и "максимальное" – для ограничиваия этой величины.

Поля ввода "Средняя высота ионосферы" – может изменяться в зависимости от гелиогеофизических условий. Обычно эта высота 350-450 км.

Поля ввода "Среднее A" и флажок "не использовать". См. "Сохранить"

"Регистрация" имеет три флажка:

Просматривать данные с GPS спутников

Разрешает запись имени спутника в "списке выбора имени спутников" с последующим просмотром его результатов измерений.

Вывод траектории

Разрешает вывод орбитных данных в основную таблицу вывода. См. "Сохранить"

Вывод результатов расчета

Разрешает вывод результатов расчета в основную таблицу вывода. См. "*Сохранить*"

"Пункт наблюдения" имеет три поля:

широта, градусы

долгота, градусы

высота над уровнем моря – для выбранного пункта наблюдения,

а также таблицу со списком координат всех пунктов наблюдения, которые используются.

Мышью на строке в таблице выбирается новый пункт наблюдения. В таблицу можно занести новые данные или исправить старые. Список пунктов наблюдения сохраняется в файле "observer.db" в формате PARADOX.

В программе

Информация о версии программы и авторе.

Кнопки быстрого доступа повторяют функции меню, которые часто используются.

Список выбора имени спутника формируется при введении начальных данных. При выборе имени спутника из списка предлагается выбрать в диалоге пролета фрагмент пролета. "Суточный пролет" спутника разбивается на фрагменты, если связь со спутником "утеряна" более чем на два часа. Первым в списке идет фрагмент с именем "ALL" – это "суточный пролет". Остальные фрагменты определяются по интервалу времени, в течение которого была связь.

Список выбора имени параметров измерений и расчетов.

Заполняется при введении. Имеет список имен параметров, которые измеряются и рассчитываются.

Для удобства анализа графики параметров L1 и L2 приводятся вместе. Это относится и к P1, P2 и NL.

Кнопка выхода – завершение работы с программой.

Для визуализации результатов расчетов по отдельному фрагменту используется программа AutoCAD. Возможности трехмерного моделирования, которые имеет эта программа, использованы и для представления результатов расчетов пролета среднеорбитных спутников. Программы визуализации разработаны в среде AutoCAD на языке AutoLisp.

График N_0 на карте восточной Европы. Карта восточной Европы получена из поисковой системы в INTERNET GOOGLES.MAP. На карте красными кружками отмечен путь подыоносферной точки. Вдоль этого пути по оси OZ отложены значения $N_0 \times 10^{-16}$ (так называемые TECU - единицы полного электронного содержания). В верхней части графика проставлены метки времени через 30 минут. За пределами $43^\circ \div 58^\circ$ северной широты и $22.5^\circ \div 50^\circ$ восточной долготы график не строится.

Схема пролета среднеорбитного спутника.

Траектория спутника отмечается зеленой линией.

Синяя сфера обозначает Землю.

Красная сфера – сфера, соответствующая высоте ионосферной точки.

Желтые кружки – положение ионосферной точки (пересечение луча от пункта наблюдения к спутнику со сферой для высоты ионосферной точки).

Зеленые кружки отмечают путь подыоносферной точки.

Белый четырехугольник обозначает положение карты Восточной Европы.

Белые линии показывают схему расчета подыоносферной точки. Вид дается со стороны оси OZ в абсолютной системе координат (со стороны северного полюса). Расстояния приведены в км.

Примечание: В файле Freq.txt приводятся номера спутников ГЛОНАСС и их рабочие частоты по состоянию на 19.09.2006.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Загрузить две программы с рабочего стола компьютера:

1. AutoCAD 2002
2. Среднеорбитные

2. Далее в программе «Среднеорбитные» :

2.1. Открыть файл данных.

Способы:

- меню <Данные> <Открыть>
- клавиша <F3>
- кнопка: <Открыть файл>

Выбрать файл наблюдений (*.??o) или файл траектории (*.??g)

Результат: Вводятся полностью в память компьютера два файла – файл наблюдений и файл траекторий.

2.2. Выбрать спутник на правой панели и нажать клавишу <ENTER>

Результат: Появится диалог со списком фрагментов суточных измерений.

2.3. Выбрать фрагмент (отдельный пролет) и нажать кнопку <Принять>.

Результат: Будет обрабатываться только этот фрагмент данных.

2.4. Выбрать в правой панели имя визуализируемого параметра <A_i>

Результат: На центральной панели появится график A_i.

2.5. Выбрать участок кривой A_i без помех.

Способ: Манипулятором мышью левой клавишей отметить верхний левый и нижний правый угол прямоугольной области, в которой содержится участок кривой.

Результат: Рассчитывается среднее <A_i> в указанном участке для дальнейших расчетов.

2.6. Разрешить использовать среднее <A_i> для дальнейших расчетов.

Способы:

- меню <Обработка> <Среднее A>

- клавиша <F6>

Появляется диалог “Настройки”. В строке «Среднее A» приводится результат расчета. В случае, если мы хотим использовать эту величину для дальнейших расчетов, установить флажок «отметить». Иначе среднее будет браться по всему фрагменту.

Далее нажмите кнопку в диалоге «Принять».

2.7. В правой панели снять флажок с параметра <A_i>.

Результат: Исчезнет график <A_i>

2.8. Выбрать в правой панели имя визуализируемого параметра <N₀>

Результат: На центральной панели появится график N₀.

2.9. Сохранить данные траектории спутника и профиль N₀ для визуализации.

Способы:

- меню <Обработка> <Сохранить путь для визуализации>

- клавиша <SHIFT>+<F2>

- кнопка: <Сохранить путь для визуализации>

Результат:

Выводится рабочий файл с данными, необходимыми для построения схемы пролета и графика подыоносферной точки.

В подтверждение вывода появляется диалог с сообщением «Вывод завершен».

Нажать кнопку <ОК> в диалоге подтверждения.

3. В программе «AutoCAD 2002» находим две кнопки внизу слева с комментариями:

«Подыоносферная точка» и «Схема пролета». Нажимая ту или иную кнопку, строим соответствующий график.

Лабораторное задание

1. Изучить методику определения полного вертикального электронного содержания.
2. Изучить пакет программ для расчета электронного содержания.
3. Провести расчеты электронного содержания по данным регистраций радиосигналов ИСЗ ГЛОНАСС (см. лабораторную работу № 1).
4. Построить зависимости электронного содержания от широты и долготы подыоносферных точек (программа «AutoCAD 2002»).
5. Проанализировать полученные результаты.
6. Оформить отчет по лабораторной работе.

Методические указания

1. Подготовить для проведения расчетов файл выходных данных регистраций радиосигналов ИСЗ ГЛОНАСС в формате RINEX.
2. Изучить основы работы с программой AUTOCAD.

Контрольные вопросы

1. Каковы возможности метода спутникового зондирования при исследовании околоземного космического пространства?
2. Какие допущения сделаны при получении исходных формул для псевдодальности и фазы радиосигналов ?
3. Почему для определения электронного содержания используются регистрации радиосигналов на двух когерентных частотах ?
4. Какой смысл имеет фазовая постоянная Φ_0 ?
5. Каковы преимущества использования радиосигналов ИСЗ среднеорбитных навигационных систем при определении электронного содержания ?
6. Какое пространственно-временное разрешение данного метода определения электронного содержания ?
7. Каковы источники ошибок определения электронного содержания с использованием данной методики ?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. - М.: Мир, 1973. - 502 с.
2. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. - М.: Связь, 1969. - 156 с.
3. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. - М.: Наука, 1984. - 392 с.
4. Солодовников Г.К., Синельников В.М., Крохмальников Е.Б. Дистанционное зондирование ионосферы Земли с использованием радиомаяков космических аппаратов. - М.: Наука, 1988. - 191 с.
5. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. - М.: Наука, 1988. - 528 с.
6. Мисюра В.А., Набока А.М., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф. Распространение радиоволн в околоземном и космическом пространстве. Часть 3. Теория и расчет регулярных эффектов в геометрооптическом приближении. - Харьков.: ХГУ, 1992. - 268 с.

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанцев М.Ю., Фатеев Ю.Л. Определение ионосферной погрешности измерения псевдодальностей в одночастотной аппаратуре систем ГЛОНАСС и GPS. // Журнал радиоэлектроники. - 2002. - N 12.
2. Афраимович Э.Л., Астафьева Э.И., Кирюшкин В.В. Ионосферное возмущение в ближней зоне землетрясения на острове Хоккайдо 25 сентября 2003 г. // Электронный журнал "Исследовано в России". - 2004. - С. 1955-1963. - <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/183.pdf>
3. Afraimovich E.L., Palavarchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances. // J. of Atmosph. and Solar-Terr. Phys. 60 - 1998. - P. 1205-1223.
4. Афраимович Э.Л., Астафьева Э.И., Воейков С.В. Генерация ионосферных неоднородностей при распространении уединенной внутренней гравитационной волны во время мощной магнитной бури 30.10.2003 г.

// Электронный журнал "Исследовано в России". - 2004. - С. 1964-1970. - <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/184.pdf>
5. Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Voeikov S.V. Travelling wave packets of total electron content disturbances as deduced from global GPS network data. // arXiv:physics/0211046.-2002.-V1.-№11.- P. 1-38.
6. Syndergaard S. A new algorithm for retrieving GPS radio occultation total electron content. // Geophys. Res. Lett.-2002.-V. 29.- №16.- P.55-1-55-4.
7. Аким Э.Л., Тучин Д.А. Ионосферная составляющая измерений псевдодальности околоземных космических аппаратов. // Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Препринт.-2004.- С.16.

8. Leonovich L.A., Afraimovich E.L., Romanova E.B., Tashilin A.V. Estimating the contribution from different ionospheric regions to the TEC response to the solar flares using data from the international GPS network. //Annales Geophysicae.-2002, 20.- P. 1935-1941.