

5279

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СПУТНИКОВЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Методические указания
к лабораторным работам

Рязань 2018

УДК 621. 396.98

Спутниковые радионавигационные системы: методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост. Е.В.Васильев. Рязань, 2018. 16 с.

Содержат теоретические сведения и указания по выполнению четырех лабораторных работ по дисциплине «Спутниковые радионавигационные системы»

Предназначены для студентов факультета радиотехники и телекоммуникаций специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Табл. 3. Ил. 8. Библиогр.: 3 назв.

Спутниковая радионавигационная система, навигационный спутник, TLE-элементы, ГЛОНАСС, GPS

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра радиотехнических устройств РГРТУ (зав. кафедрой д-р техн. наук Ю.Н. Паршин)

Спутниковые радионавигационные системы

Составитель: В а с и л ь е в Евгений Викторович

Редактор Н.А. Орлова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 30.05.18. Формат бумаги 60 x 84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 30 экз. Заказ .

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Лабораторная работа № 1

Моделирование орбитального движения искусственных спутников Земли в TLE-формате

1.1. Теоретические сведения

Траектория движения искусственного спутника Земли (ИСЗ) называется орбитой. Если считать Землю строго сферической, а действие гравитационного поля Земли единственной силой, действующей на спутник, то движение ИСЗ подчиняется известным законам Кеплера. Оно происходит в неподвижной плоскости, проходящей через центр масс Земли, - плоскости орбиты. Согласно первому закону Кеплера, орбита имеет форму эллипса, в одном из фокусов которого находится центр масс Земли. Вторым и третьим законами Кеплера определяются форма орбиты и скорость движения спутника в каждой точке орбиты.

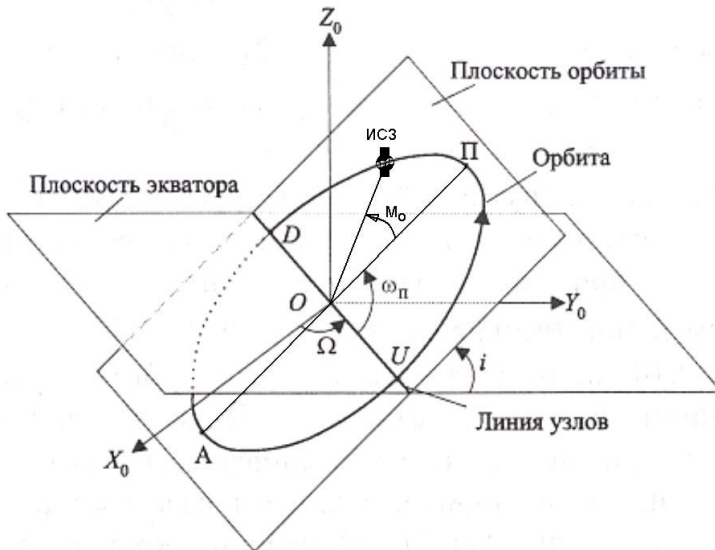


Рис. 1.1. Кеплеровские элементы орбиты

Для того чтобы полностью описать орбитальное движение ИСЗ, необходимо определить шесть кеплеровых элементов орбиты, рис. 1.1 [1]:

- большая полуось орбиты;
- эксцентриситет орбиты;

- **наклонение** плоскости орбиты по отношению к экваториальной плоскости (i), в градусах;
- **долгота восходящего узла** орбиты (Ω), в градусах;
- **аргумент перигея** (ω_n), в градусах;
- **истинная аномалия** или **средняя аномалия** (M_0), в градусах.

Орбитальные элементы в формате TLE (Two Line Elements) определяются для многих тысяч космических объектов из базы данных NORAD [2]. TLE всегда состоит из двух строк форматированного текста, то есть каждая позиция в конкретной строке имеет определенное значение. Кроме того, им может предшествовать строка с названием объекта (нулевая строка) – до 24 символов. Пример записи нулевой, первой и второй строк для международной космической станции приведен на рис. 1.2.

```
ISS (ZARYA)
1 25544U 98067A   08264.51782528 -.00002182 00000-0 -11606-4 0 2927
2 25544   51.6416 247.4627 0006703 130.5360 325.0288 15.72125391563537
```

Рис. 1.2. Запись TLE для МКС (ISS «Zarya»)

Расшифровка значений позиций первой и второй строк приведена на рис. 1.3 и рис. 1.4 соответственно. Дадим здесь необходимые дополнительные пояснения к таблицам, содержащимся в этих рисунках.

Под эпохой (элементы 7 и 8 первой строки – год, день и время в пределах этого дня) понимается момент времени, на который были определены эфемериды, то есть кеплеровы элементы орбиты и другие параметры движения спутника, содержащиеся в первой и второй строках. По сути, координаты ИСЗ, определяемые с помощью двухстрочной записи в формате TLE, и являются эфемеридами, то есть они позволяют предсказать с определенной точностью положение ИСЗ в пространстве на момент времени, отличающийся от эпохи, но не являются истинными координатами спутника в этот момент времени.

К некоторым строкам содержится комментарий «подразумевается, что число начинается с десятичного разделителя». Это обозначает, что приведенное в TLE число должно быть для верного понимания дополнено слева нулем и десятичной точкой. Например эксцентриситет, содержащийся во второй строке, позиции 27-33 (рис. 1.4) имеет значение 0.0006703.

Номер спутника в базе NORAD для 1 и 2 строк должен совпадать.

Строка 1 (начало)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 |
| 1 | 2 | 5 | 5 | 4 | 4 | U | | | 9 | 8 | 0 | 6 | 7 | A | | | | 0 | 8 | 2 | 6 | 4 | | 5 | 1 | 7 | 8 | 2 | 5 | 2 | 8 | |
| 1 | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Строка 1 (продолжение)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 |
| - | . | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 8 | 2 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | | | - | 1 | 1 | 6 | 0 | 6 | - | 4 | | 0 | | | 2 | 9 | 2 | 7 |
| 9 | | | | | 10 | | | | | 11 | | | | | 12 | 13 | | | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | |

Строка 1 (значение позиций)

| Номер | Положение | Содержание | Пример |
|-------|-----------|---|--------------|
| 1 | 01-01 | Номер строки | 1 |
| 2 | 03-07 | Номер спутника в базе данных NORAD | 25544 |
| 3 | 08-08 | Классификация (U=Unclassified — не секретный) | U |
| 4 | 10-11 | Международное обозначение (последние две цифры года запуска) | 98 |
| 5 | 12-14 | Международное обозначение (номер запуска в этом году) | 067 |
| 6 | 15-17 | Международное обозначение (часть запуска) | A |
| 7 | 19-20 | Год эпохи (последние две цифры) | 08 |
| 8 | 21-32 | Время эпохи (целая часть — номер дня в году, дробная — часть дня) | 264.51782528 |
| 9 | 34-43 | Первая производная от среднего движения (ускорение), делённая на два [виток/день ²] | -00002182 |
| 10 | 45-52 | Вторая производная от среднего движения, делённая на шесть (подразумевается, что число начинается с десятичного разделителя) [виток/день ³] | 00000-0 |
| 11 | 54-61 | Коэффициент торможения $B^{\dot{}}$ (подразумевается, что число начинается с десятичного разделителя) | -11606-4 |
| 12 | 63-63 | Изначально — типы эфемерид, сейчас — всегда число 0 | 0 |
| 13 | 65-68 | Номер (версия) элемента | 292 |
| 14 | 69-69 | Контрольная сумма по модулю 10 | 7 |

Рис. 1.3. Первая строка в формате TLE

1.2. Задание для выполнения

В лаборатории на своем рабочем месте запустите программу, позволяющую моделировать движение спутника по данным TLE, изучите её интерфейс, движение спутников. Проконтролируйте правильность указания своего местоположения (если это Рязань, то можно ввести 39,5 градусов восточной долготы, 54,5 градуса северной широты, 100 метров над уровнем моря), а также правильность указания текущего времени - местного MSK или всемирного – UTC/UT/GMT.

Строка 2 (начало)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | |
| 2 | 2 | 5 | 5 | 4 | 4 | | | 5 | 1 | . | 6 | 4 | 1 | 6 | | | 2 | 4 | 7 | . | 4 | 6 | 2 | 7 | | | 0 | 0 | 0 | 6 | 7 | 0 | 3 | |
| 1 | 2 | | | | 3 | | | | | | 4 | | | | | | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Строка 2 (продолжение)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 |
| 1 | 3 | 0 | . | 5 | 3 | 6 | 0 | | 3 | 2 | 5 | . | 0 | 2 | 8 | 8 | | 1 | 5 | . | 7 | 2 | 1 | 2 | 5 | 3 | 9 | 1 | 5 | 6 | 3 | 5 | 3 | 7 |
| 6 | | | | 7 | | | | | | 8 | | | | | | 9 | | | | | | 10 | | | | | | | | | | | | |

Строка 2 (значение позиций)

| Номер | Положение | Содержание | Пример |
|-------|-----------|--|-------------|
| 1 | 01-01 | Номер строки | 2 |
| 2 | 03-07 | Номер спутника в базе данных NORAD | 25544 |
| 3 | 09-16 | Наклонение в градусах | 51.6416 |
| 4 | 18-25 | Долгота восходящего узла в градусах | 247.4627 |
| 5 | 27-33 | Эксцентриситет (подразумевается, что число начинается с десятичного разделителя) | 0006703 |
| 6 | 35-42 | Аргумент перицентра в градусах | 130.5360 |
| 7 | 44-51 | Средняя аномалия в градусах | 325.0288 |
| 8 | 53-63 | Частота обращения (оборотов в день) (среднее движение) [виток/день] | 15.72125391 |
| 9 | 64-68 | Номер витка на момент эпохи | 56353 |
| 10 | 69-69 | Контрольная сумма по модулю 10 | 7 |

Рис. 1.4. Вторая строка в формате TLE

Откройте один из имеющихся текстовых файлов, содержащих информацию в формате TLE, изучите способ представления этой информации, используя рис. 1.3. и рис. 1.4, но не вносите в него изменений. Сохраните данный файл под другим именем, а затем оставьте в нем единственную запись TLE.

Загрузите этот файл в программу, моделирующую движение спутников. Пронаблюдайте в реальном времени движение этого единственного спутника для того, чтобы убедиться в отсутствии ошибок в файле.

По заданию преподавателя придайте этому спутнику определенные параметры движения, измените характеристики орбиты. Включите режим симуляции (не реального времени). Вводя в программу необходимые моменты времени, докажите, что движение спутника соответствует заданным параметрам.

По заданию преподавателя организуйте спутниковую группировку (например, несколько спутников в одной орбитальной плоскости на равных расстояниях и т. п.) и докажите правильность модели.

Сделайте выводы по лабораторной работе. Оформите отчет.

Лабораторная работа № 2

Моделирование орбит СРНС ГЛОНАСС и GPS

2.1. Теоретические сведения

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) ГЛОНАСС и GPS (NAVSTAR) предназначены для создания радионавигационного поля на всей поверхности Земли, что позволяет пассивной аппаратуре потребителей принимать сигналы нескольких спутников одновременно и за счет этого определять свое местоположение. В то же время мощность передатчиков на навигационных спутниках ограничена десятками Ватт, что не позволяет выводить спутники на слишком высокие (например, геостационарные) орбиты. С учетом этих соображений параметры орбит навигационных спутников группировок ГЛОНАСС и GPS были выбраны следующим образом [1, 3], как показано в табл. 2.1 и на рис. 2.1.

Дополнительно к информации, представленной в табл. 2.1, можно учесть, что в спутниковой группировке ГЛОНАСС расположение спутников в каждой плоскости сдвинуто по отношению к соседней плоскости на 15 градусов по аргументу широты, что позволяет обеспечивать равномерное покрытие всей обслуживаемой территории.

Как следует из табл. 2.1, место на орбите, в котором в данный момент находится спутник, определяется аргументом широты. Это угол между направлениями из центра Земли на восходящий узел и на спутник. В лабораторной работе № 1 за эту функцию отвечал параметр «средняя аномалия», см. рис. 1.1 и рис. 1.4.

Таблица 2.1

| Параметр | ГЛОНАСС | GPS |
|--|----------|----------|
| Количество активных спутников в орбитальной группировке | 24 | 24 |
| Количество орбитальных плоскостей | 3 | 6 |
| Количество спутников в орбитальной плоскости | 8 | 4 |
| Наклонение орбиты, градусов | 64,8 | 55 |
| Высота орбиты, км | 19130 | 20180 |
| Время обращения, час: мин: сек. | 11:15:44 | 11:56:00 |
| Разнос спутников в одной орбитальной плоскости по аргументу широты, градусов | 45 | 90 |
| Взаимный сдвиг плоскостей орбит по долготе, градусов | 120 | 60 |
| Эксцентриситет орбит | 0 | 0 |

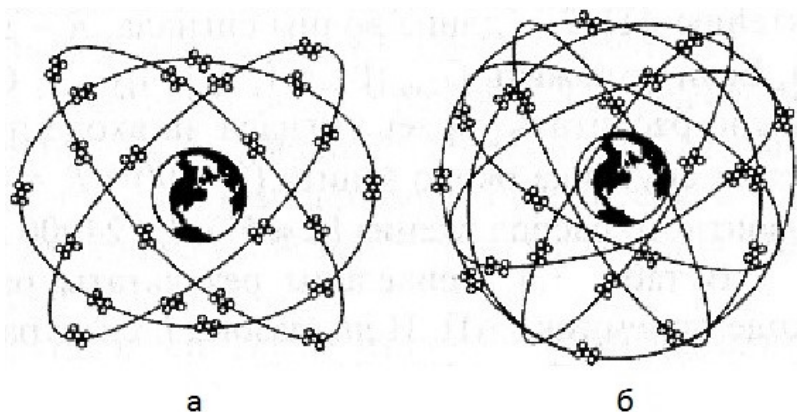


Рис. 2.1. Орбитальные плоскости спутниковых группировок:
а – ГЛОНАСС; б – GPS

Кроме активных (то есть излучающих навигационный сигнал) навигационных спутников в составе орбитальной группировки СРНС, имеются также резервные спутники, которые могут быть введены в строй командой с наземного центра управления в случае неисправности одного из активных спутников. Так, на момент написания данного методического пособия общее число навигационных спутников группировки NAVSTASR включает 32 космических аппарата.

2.2. Задание для выполнения

В лаборатории на своем рабочем месте запустите программу, позволяющую моделировать движение спутника по данным TLE. Загрузите текстовый файл, содержащий сведения о спутниках системы GPS, например `gps-ops.txt`. Проконтролируйте правильность указания своего местоположения (если это Рязань, то можно ввести 39,5 градусов восточной долготы, 54,5 градуса северной широты, 100 метров над уровнем моря), а также правильность указания текущего времени - местно MSK или всемирного – UTC/UT/GMT.

Изучите орбитальное движение спутников в режиме симуляции и в режиме реального времени. При наличии мобильного навигатора системы GPS настройте в нём режим отображения наблюдаемых спутников и сравните результаты, полученные от навигатора и от используемой вами компьютерной программы. Выводы (обозначения наблю-

даемых спутников, совпадения или расхождения в их положениях при двух способах отображения эфемерид) запишите в отчет. Удалось ли вам таким образом отделить резервные спутники от активных?

Сохраните используемый файл с TLE-данными спутников GPS под другим именем. Введите (путем добавления в этот файл своей TLE-записи) в спутниковую группировку новый «резервный» спутник, присвоив ему оригинальное имя. Этот спутник должен принадлежать к одной из используемых системой GPS орбит.

Загрузите измененный таким образом файл в компьютерную программу, отображающую спутники. При необходимости откорректируйте положение своего спутника таким образом, чтобы он находился на достаточном удалении от активных спутников, не мешая им. Если в вашей бригаде несколько студентов, каждый из них должен таким же образом ввести свой спутник в орбитальную группировку. Сделайте скриншоты, на которых видны добавленные спутники, для помещения их в отчет о лабораторной работе вместе с соответствующими «новыми» записями TLE.

По указанию преподавателя смоделируйте в новом файле спутники группировки ГЛОНАСС, принадлежащие хотя бы одной орбитальной плоскости. Соответствующие записи и скриншоты также внесите в отчет о проделанной работе.

Лабораторная работа № 3

Расчет энергетики радиолинии в СРНС

3.1. Теоретические сведения

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) ГЛОНАСС и GPS являются пассивными (беззапросными). Навигационный спутник обладает передатчиком и направленной антенной, потребитель - приемником и, как правило, ненаправленной антенной. Таким образом, требуется оценить мощность сигнала навигационного спутника в точке приема и отношение сигнал-шум на входе навигационного приемника, от которого зависят многие характеристики СРНС, в том числе точность навигационных измерений.

Известно, что для нормальной работы навигационного приемника в СРНС ГЛОНАСС требуется обеспечить мощность на входе приемника не хуже -161 дБВт, тогда как мощность передатчиков навигационных спутников составляет $30...50$ Вт.

В настоящей лабораторной работе будет осуществляться расчет энергетики радиолинии спутник – навигационный приемник, то есть зависимость мощности полезного сигнала на входе приемника от мощности сигнала на выходе бортового передатчика навигационного спутника. При этом будет приниматься во внимание положение навигационного спутника и поглощение сигнала в ионосфере.

Для расчета мощности сигнала на входе приемника $P_{пр}$ при известной мощности передатчика $P_{пер}$ можно воспользоваться формулой

$$P_{пр} = P_{пер} G_{пер} G_{пр} F_{пол} \exp(-2\gamma R) \lambda^2 / (4\pi R)^2,$$

где $G_{пер}$ и $G_{пр}$ – соответственно коэффициенты усиления приемной и передающей антенн, $F_{пол}$ – потери, связанные с рассогласованием поляризации, γ – коэффициент ослабления в атмосфере, R – расстояние между спутником и навигационным приемником.

Коэффициент усиления передающей антенны имеет существенное значение при расчете энергетики спутниковой радиолинии, поскольку ее диаграмма направленности имеет вид конуса, направленного на Землю (рис. 3.1). При этом в центре конуса (то есть в направлении подспутниковой точки) усиление антенны спутника ГЛОНАСС составляет $G_{пер} = 10$ (10 дБ), а в направлении по касательной к поверхности Земли увеличивается до $G_{пер} = 15,9$ (12 дБ). Это предусмотрено для частичной компенсации ослабления сигнала, связанного с увеличением расстояния до навигационного приемника при его удалении от подспутниковой точки.

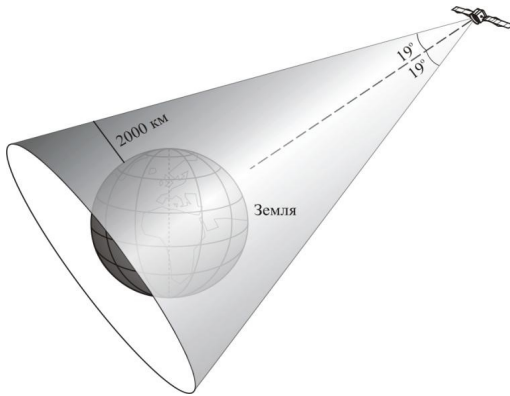


Рис. 3.1. Диаграмма направленности передающей антенны спутника

Спутник СРНС излучает электромагнитные волны с правой круговой поляризацией. При прохождении через ионосферу такая поляризация искажается и становится эллиптической, что вызывает появление дополнительных потерь в приемной антенне, характеризуемых коэффициентом $F_{\text{пол}}$. В большинстве случаев такие потери не превышают 1 дБ.

Дополнительные потери на распространение электромагнитной волны через ионосферу связаны с тем, что ионосфера является проводящей средой, имеющей относительную диэлектрическую проницаемость ϵ , отличную от единицы, и удельную проводимость σ , отличную от нуля. Коэффициент потерь в ионосфере γ можно рассчитать по упрощенной формуле

$$\gamma = 60\pi\sigma (\epsilon)^{-1/2}.$$

Точный учет влияния ионосферы затруднителен, поскольку ее состояние зависит от времени суток, солнечной активности, наличия или отсутствия спорадических образований (случайно возникающих сгустков плазмы) в ионосфере. Для электромагнитных волн диапазона 1200...1600 МГц, применяемых в СРНС, ионосфера представляет собой диспергирующую среду, то есть наряду с поглощением энергии электромагнитной волны она вызывает запаздывание сигнала, величина которого зависит от его частоты. Этот эффект приводит к дополнительным ошибкам в определении расстояния от навигационного спутника до потребителя. В настоящей лабораторной работе ставится задача расчета только энергетики трассы, поэтому дисперсионные свойства ионосферы учитываться не будут. Влияние ионосферы будет учитываться только как поглощение радиоволн с величиной затухания 0,5 дБ.

3.2. Задание для выполнения

На своем рабочем месте запустите файл `srns.mcd`. Это программа, позволяющая задавать траектории орбитального движения спутников, рассчитывать подспутниковую точку, наклонную дальность до спутника, то есть длину трассы, и оценивать энергетику трассы спутник – потребитель навигационной информации. Параметры орбитальной группировки навигационных спутников, установленные по умолчанию, соответствуют нескольким спутникам СРНС GPS.

Внимание: просим **не сохранять изменения**, вносимые вами в файл `srns.mcd` в ходе выполнения лабораторной работы.

В блоке «Параметры орбитальной группировки» программы найдите информацию о количестве орбитальных плоскостей и количестве спутников на каждой орбитальной плоскости (так как моделируется не вся спутниковая группировка NAVSTAR – GPS, а только ее часть), запишите эти сведения в отчет. Установите географические координаты места наблюдения в зависимости от номера вашей бригады согласно табл. 3.1.

Таблица 3.1

| № п/п | Город | Широта, градусов | Долгота, градусов |
|-------|-------------|------------------|-------------------|
| 1 | Баренцбург | 78,0 С.Ш. | 14,2 В.Д. |
| 2 | Мурманск | 69 С.Ш. | 33 В.Д. |
| 3 | Норильск | 69,4 С.Ш. | 88,2 В.Д. |
| 4 | Рязань | 54,5 С.Ш. | 39,5 В.Д. |
| 5 | Севастополь | 44,5 С.Ш. | 33,5 В.Д. |
| 6 | Пекин | 39,5 С.Ш. | 116,4 В.Д. |
| 7 | Дамаск | 33,5 С.Ш. | 36,3 В.Д. |
| 8 | Калькутта | 22,5 С.Ш. | 88,4 В.Д. |
| 9 | Пхукет | 7,9 С.Ш. | 98,4 В.Д. |
| 10 | Сингапур | 1,4 С.Ш. | 103,8 В.Д. |

Проследите траектории подспутниковых точек для спутников, принимаемых во внимание в расчетах.

Для нескольких моментов времени, отличающихся на 20 минут, определите и зарисуйте в отчет спутниковые созвездия. Установите координаты точки наблюдения, соответствующие еще двум городам из табл. 3.1 таким образом, чтобы значительно отличалась их географическая широта. Рассмотрите спутниковые созвездия, соответствующие нескольким моментам времени, для этих городов и сделайте вывод о том, как влияет географическая широта на условия работы СРНС.

Определите наклонные дальности в какой-либо фиксированный момент времени до отображаемых спутников для «своего» населенного пункта, запишите их в таблицу. Запишите также в таблицу соответствующие величины затухания радиосигналов на трассе, мощность сигнала на входе навигационного приемника и отношение сигнал-шум в приемнике. Сделайте вывод о том, сигналы каких спутников могут быть обработаны приемником, а какие – не могут благодаря значительному ослаблению на трассе.

По заданию преподавателя измените исходные данные о спутниковой группировке на СРНС ГЛОНАСС и повторите проделанную ра-

боту. Необходимая для выполнения этого задания информация содержится в табл. 2.1.

Сделайте выводы о проделанной работе и оформите отчет.

Лабораторная работа № 4

Слежение за низкоорбитальными спутниками

4.1. Теоретические сведения

В настоящих методических указаниях предложены лабораторные работы, посвященные среднеорбитальным спутниковым радионавигационным системам (СРНС), высота орбит в которых составляет 20000 км (GPS) или 19000 км (ГЛОНАСС). Такие спутники характеризуются достаточно большим временем обращения (около 12 часов, см. табл. 2.1), что дает наземному наблюдателю возможность работать с каждым спутником в течение длительного времени, измеряемого несколькими часами.

Однако следует отметить, что в настоящее время используются СРНС, имеющие низкоорбитальные спутники. Из отечественных низкоорбитальных СРНС можно назвать системы «Транзит» и «Цикада». У спутников «Транзит» высота орбит около 6000 км, у «Цикады» около 1000 км. Это означает, что спутник может находиться в зоне радиовидимости значительно меньшее время, которое иногда измеряется несколькими минутами. Скорость движения низкоорбитального спутника по отношению к наземному потребителю навигационных услуг велика, что требует особых приемов в работе с ними.

В настоящей лабораторной работе вам предстоит осуществить практическое слежение за низкоорбитальными спутниками и прием сигналов от них. Для упрощения задачи предлагается следить за радиолюбительскими спутниками, излучающими сигналы в диапазонах 145 МГц и 430 МГц.

Комплект аппаратуры, предназначенный для слежения за радиолюбительскими спутниками, находится в Центре космического мониторинга РГРТУ. В качестве антенны используются «волновые каналы» на 145 МГц и 430 МГц, расположенные на крыше Бизнес-инкубатора РГРТУ, смонтированные на опорно-поворотном устройстве G-5500 фирмы YAESU. Данное устройство является двухкоординатным, осуществляющим поворот антенны в азимутальной и угломестной плоскостях.

Блок управления опорно-поворотным устройством находится в помещении Бизнес-инкубатора. Он исполняет команды, поступающие от персонального компьютера, на котором выполняется одна из свободно распространяемых радиолюбительских программ – «спутниковых трекеров» (рис. 4.1). Эта программа на основании загружаемых в нее данных об орбитах спутников в формате TLE (см. материалы лабораторной работы № 1) вычисляет эфемериды спутников на текущий момент, отображает положение подспутниковых точек выбранных спутников и предупреждает о наличии того или иного спутника в зоне радиовидимости.

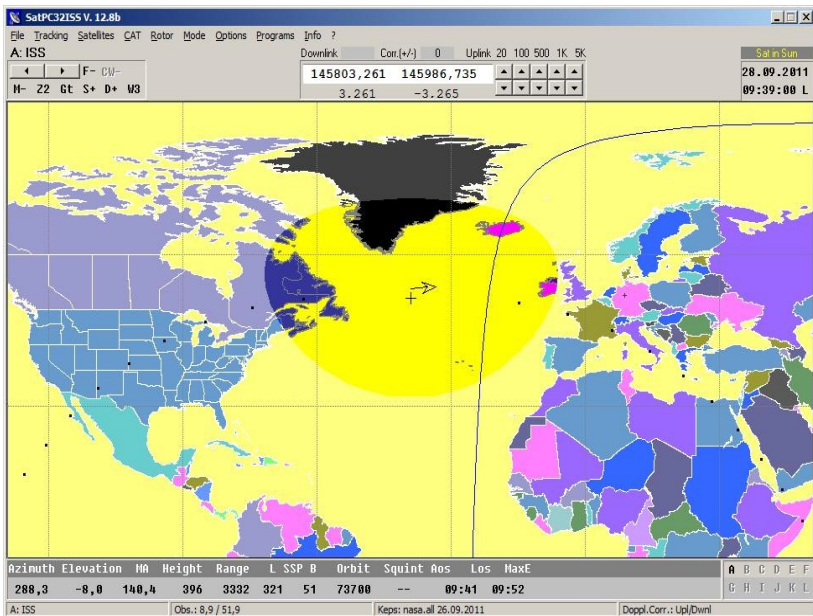


Рис. 4.1. Интерфейс программы типа «спутниковый трекер» SatPC32 в процессе слежения за спутником

В случае если оператор выберет один из спутников, находящихся в зоне радиовидимости, программа разворачивает антенну в направлении выбранного спутника и сопровождает его всё то время, пока он находится в этой зоне. У программ такого типа имеется также возможность вычислять частоты приема и передачи наземной радиостанции с учетом постоянно изменяющегося доплеровского сдвига частоты, а

также при наличии соответствующей коммутации с трансивером выставлять автоматически его частоты приема и передачи через CAT-интерфейс.

Следует отметить, что радиоловительские программы типа «спутниковый трекер» позволяют следить за любыми типами спутников, например за международной космической станцией, спутниками связи, метеорологическими или навигационными, в том числе GPS.

В качестве приемника спутниковых сигналов в центре космического мониторинга будем использовать трансивер YAESU FT-897 или ICOM IC-7000, имеющие соответствующие радиоловительские диапазоны 145 МГц и 430 МГц. В таком случае прием сигналов с видами модуляции CW, SSB, FM будет осуществляться непосредственно оператором, а прием цифровых сигналов (BPSK, AX.25 и др.) – с помощью отдельного компьютера, к линейному входу звуковой карты которого подводится этот демодулированный сигнал.

4.2. Задание для выполнения

Включите источники бесперебойного питания для аппаратуры космического радиомониторинга. Включите источники питания опорно-поворотного устройства G-5500 и трансиверов YAESU FT-897 и ICOM IC-7000. Подключите антенны к трансиверам. Здесь возможно использование только одного из трансиверов, ко входу которого обе антенны подключаются через антенный переключатель. Можно антенну диапазона 145 МГц подключить ко входу одного из трансиверов, а антенну диапазона 430 МГц – ко входу другого трансивера.

Включить компьютер, на котором установлена программа «спутниковый трекер», запустить эту программу. Если программа потребует указать координаты местонахождения центра радиомониторинга и высоту над уровнем моря, необходимо это сделать (см. лабораторную работу № 1 или табл. 3.1). Для проверки правильности введенных координат можно указать стрелочкой мыши на отметку местоположения, появившуюся на карте, и считать так называемый WW-локатор. Его значение должно быть KO94UO или KO94VO (последние две буквы могут отличаться, что не повлияет на правильность ориентировки антенн). Далее необходимо убедиться в правильности отображения времени в программе – местного или всемирного (MSK = UTC + 3 часа).

Желательно обновить данные TLE. Некоторые программы типа «спутниковый трекер» могут делать это автоматически, некоторые требуют вмешательства оператора – проконсультируйтесь у преподавателя. Необходимый для настоящей лабораторной работы файл с данными TLE имеет название amateur.txt.

Проверьте список спутников, за которыми трекер осуществляет слежение. В этом списке должны быть спутники из табл. 4.1. В противном случае скорректируйте список по данным табл. 4.1.

В случае появления в зоне радиовидимости одного из обозначенных в списке спутников программа выделит его название на экране. Щелкните кнопкой мыши по этому названию, после чего трекер отправит соответствующие данные для наведения антенн на выбранный спутник в блок управления опорно-поворотным устройством.

Таблица 4.1

| № п/п | Наимен. спутника | Кодовое обознач. | Частоты Downlink, МГц | Частоты Uplink, МГц |
|-------|------------------|------------------|--|---------------------------------|
| 1 | Оскар-07 | АО-07 | 145.975 – 145.925, CW, SSB | 432.125 - 432.175, CW, SSB |
| 2 | JAS-2 | FO-29 | 435.795 CW маяк 435.800 – 435.900 CW, SSB | 145.900 – 146.000, CW, SSB |
| 3 | XW-2C | CAS-3C | 145.795 - 145.815 145.790 (маяк) | 435.150 - 435.170 (транспондер) |
| 4 | МКС | ISS | 145.800, FM | 145800, FM |
| 5 | CUTE-1 | CO-55 | 436.837 (маяк) | - |
| 6 | FUNCUBE-1 | АО-73 | 145.950 – 145.970 CW, SSB 145.935 BPSK | 435.150 – 435.130 CW, SSB |
| 7 | CUBESAT XI-IV | CO-57 | 436.847 (маяк) | - |
| 8 | SAUDISAT 1C | SO-50 | 436.795 FM | 145.850 FM (67 Гц) |
| 9 | XW-2A | CAS-3A | 145.665 - 145.685 145.660 (маяк) | 435.030 - 435.050 (транспондер) |
| 10 | Фох-1D | АО-92 | 145.880, FM (маяк) | 435.350 FM |
| 11 | AMRAD | АО-27 | 436.795 (маяк) 436.795 FM | 145.850 FM |
| 12 | Фох-1A | АО-85 | 145.980 FM | 435.175 FM |

Настройте приемник трансивера на частоту Downlink, которая указана для выбранного спутника с учетом доплеровской добавки. Таковую добавку можно посмотреть в соответствующем окне трекера, если соответствующий режим настроен.

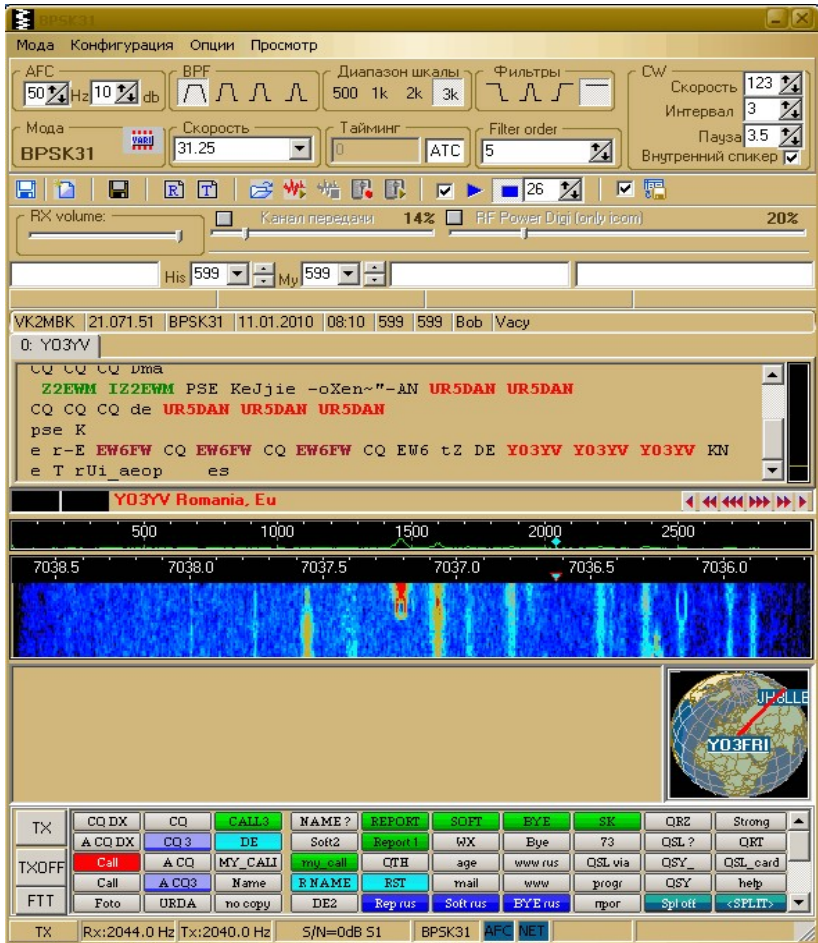


Рис. 4.2. Интерфейс программы для работы с цифровыми видами модуляции UR5EQF

В случае отсутствия необходимой информации можно приблизительно считать, что в диапазоне 145 МГц доплеровская добавка не превышает 2...3 кГц, а в диапазоне 430 МГц – 5...6 кГц. Разумеется, при приближении спутника такая добавка имеет положительный знак (и уменьшается со временем), а в случае его удаления – отрицательный знак (и увеличивается со временем).

Вращая ручку настройки частоты трансивера, настройтесь на сигнал спутника и корректируйте частоту приема в ходе слежения за спутником в соответствии с доплеровской добавкой.

В случае принятия сигналов с цифровыми видами модуляции воспользуйтесь соответствующим режимом программы (рис. 4.2), установленной на дополнительном компьютере. Данные о возможном виде модуляции приведены в табл. 4.1.

Запишите данные о принятых вами сигналах спутников (время наблюдения, частоты, сила сигнала, вид модуляции) в отчет.

Перед выключением аппаратуры отсоедините антенны от входов трансиверов. Выключите аппаратуру в порядке, обратном включению.

Сделайте выводы о проделанной работе.

Библиографический список

1. Перов А.И. Основы построения спутниковых радионавигационных систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2012. – 240 с.
2. TLE (статья из свободной энциклопедии – Википедии) <https://ru.wikipedia.org/wiki/TLE>
3. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радионавигационные системы: учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2011. – 272 с.

Содержание

| | |
|---|----|
| Лабораторная работа № 1. Моделирование орбитального движения искусственных спутников Земли в TLE-формате..... | 1 |
| Лабораторная работа № 2. Моделирование орбит СРНС ГЛОНАСС и GPS..... | 5 |
| Лабораторная работа № 3. Расчет энергетики радиолинии в СРНС..... | 7 |
| Лабораторная работа № 4. Слежение за низкоорбитальными спутниками..... | 11 |

