



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ПРИОРИТЕТНЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ
"ОБРАЗОВАНИЕ"



Проект «Инновационная образовательная среда в классическом университете»

Пилотный проект № 22 «Разработка и внедрение
инновационной образовательной программы «Прикладные математика и физика»»

Физический факультет

Университетский научно-образовательный центр «Моделирование и мониторинг геосфер»,
Кафедра физики атмосферы

Н. М. Гаврилов

**ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ
МЕТОДОМ НАЗЕМНОГО РАДИОПРИЕМА
НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

Учебно-методическое пособие

Санкт Петербург
2007 г.

- Рецензент: проф. кафедры физики атмосферы, д.ф.м.н. Швед Г. М.
- Печатается по решению методической комиссии физического факультета СПбГУ.
- Рекомендовано Ученым советом физического факультета СПбГУ.

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ МЕТОДОМ НАЗЕМНОГО РАДИОПРИЕМА НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ. – СПб., 2007

В учебно-методическом пособии рассмотрены основные физические принципы и практические методы определения общего содержания ионосферных электронов и водяного пара в столбе атмосферы вдоль траекторий прохождения радиосигналов от спутников навигационных систем GPS и ГЛОНАСС до наземного радиоприемника. Описан порядок выполнения практических лабораторных работ с использованием наземного GPS приемника. Пособие предназначено для студентов 4-7-го курсов, аспирантов, соискателей и других обучающихся по специальности физика атмосферы и океана.

Содержание

1. Введение	4
2. Основы спутниковых систем навигации	4
2.1. Навигационные системы GPS и ГЛОНАСС	5
2.2. Наземные GPS измерения одним приемником	6
2.3. Механизмы влияния атмосферы на распространение радиосигналов GPS	10
3. Лабораторная работа 1. Методы определения полного электронного содержания	12
3.1. Определение ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям псевдодальности	12
3.2. Определение ПЭС по кодовым измерениям псевдодальности на двух частотах	13
3.3. Определение ПЭС по кодовым и фазовым измерениям псевдодальности	13
3.4. Преобразование в «вертикальное» ПЭС	14
3.5. План выполнения лабораторной работы 1	14
4. Лабораторная работа 2. Определения содержания водяного пара в тропосфере	15
4.1. Алгоритм определения содержания водяного пара.	15
4.2. План выполнения лабораторной работы 2	16
5. Литература	17
Приложение 1. Наземный GPS/ГЛОНАСС приемник фирмы NovAtel ProPak-V3	18
A1.1. Основные характеристики приемника	18
A1.2. Подготовка приемника к работе	19
A1.3. Программное обеспечение приемника	19
Приложение 2. Необходимые команды и сообщения приемника	21
A2.1. Команды для настройки GPS приемника	21
A2.1.1. <i>CLOCKADJUST</i> Включение/выключение слежения за часами приемника	21
A2.1.2. <i>CSMOOTH</i> Задание интервала усреднения кодовых измерений GPS.	21
A2.1.3. <i>DYNAMICS</i> Задание диапазона скоростей перемещения приемника	22
A2.1.4. <i>ECUTOFF</i> Отсечка GPS спутников по углу места	22
A2.1.5. <i>FORCEGPSL2CODE</i> Включение P или C/A кода для частоты f2	22
A2.1.6. <i>FRESET</i> Восстановление фабричных установок	22
A2.1.7. <i>GLOCSMOOTH</i> Интервал усреднения кодовых измерений ГЛОНАСС	22
A2.1.8. <i>GLOECUTOFF</i> Отсечка ГЛОНАСС спутников по углу места	23
A2.1.9. <i>SAVECONFIG</i> сохранение установок в памяти приемника	23
A2.1.10. <i>UNLOGALL</i> отменить все сообщения в заданный порт	23
A2.2. Сообщения приемника	23
A2.2.1. Стандартный заголовок для ASCII сообщения	23
A2.2.2. <i>BESTPOS</i> Географические координаты приемника	24
A2.2.3. <i>BESTXYZ</i> Геоцентрические координаты приемника	25
A2.2.4. <i>RANGE</i> Псевдодальности спутников	25
A2.2.5. <i>RXCONFIG</i> Конфигурация приемника	26
A2.2.6. <i>SATVIS</i> Угловые координаты спутников	26
A2.2.7. <i>SATXYZ</i> Геоцентрические координаты спутников	27
Приложение 3. Климатические данные о тропосферной температуре	29
Приложение 4. Примеры расчета атмосферных характеристик	30

1. Введение.

Главная задача навигационных систем GPS и ГЛОНАСС – точное определение координат для навигации (см. ниже). Однако, эти системы также дают возможность дистанционного зондирования земной атмосферы для определения ее параметров. Это возможно, потому что скорость распространения радиосигналов от GPS спутников в атмосфере уменьшается, поскольку коэффициент преломления воздуха $n > 1$. Кроме того, траектории движения радиолучей искривляются из-за экспоненциального уменьшения плотности атмосферы и показателя преломления с высотой. Эти два фактора увеличивают время распространения радиосигналов между GPS спутником и приемником в атмосфере по сравнению с аналогичным временем в вакууме. В связи с этим, возникло новое направление исследований, иногда называемое «GPS метеорология», целью которого является извлечение полезной информации об атмосферных параметрах из указанного временного запаздывания GPS радиосигналов в атмосфере.

Можно выделить два основных направления GPS метеорологии: спутниковое радиопросвечивание атмосферы и наземные GPS наблюдения. Спутниковые наблюдения проводятся с помощью приемников, установленных на борту низкоорбитальных (высоты 200 – 1000 км) спутников. Эти приемники получают сигналы с геостационарных GPS спутников на касательных трассах, которые затем используются для определения искривления траектории и угла отклонения радиолуча в атмосфере. При некоторых предположениях (например, сферическая симметрия) изменения угла отклонения радиолуча с высотой может дать информацию о вертикальных профилях показателя преломления, плотности и температуры в средней атмосфере.

Наземные GPS измерения дают, в частности, возможность определения полного содержания электронной концентрации и водяного пара в вертикальном столбе атмосферы. Многие идеи в этой области исследований родились из работ геодезистов и геофизиков, которые потратили значительные усилия, чтобы исключить атмосферный «шум» при точном определении географических координат GPS приемников.

2 Основы спутниковых систем навигации.

В настоящее время функционируют две спутниковые навигационные системы: американская система GPS и российская система ГЛОНАСС.

2.1. Навигационные системы GPS и ГЛОНАСС.

Американская навигационная система, называемая «Global Positioning System» (сокращенно GPS) дает возможность непрерывного всепогодного точного определения координат, скорости движения приемника сигналов, а также точного времени. Система использует минимум 24 спутника NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging), обращающихся вокруг Земли в 6-ти орбитальных плоскостях (см. Рис. 2.1). Каждый спутник находится на высоте 20 200 км на круговой орбите с наклоном 55° и временем обращения 12 часов. Он передает радиосигналы на двух частотах: $f_1 = 1575,42$ МГц и $f_2 = 1227,6$ МГц, что соответствует длинам радиоволн 19,04 см и 24,43 см. Обычно эти частотные каналы обозначаются, как L_1 и L_2 , соответственно. Спутники расположены так, чтобы из каждого наземного пункта были видны не менее 6 спутников одновременно. GPS приемнику требуется принимать сигналы минимум от 4-х спутников одновременно для вычисления его широты, долготы, высоты относительно уровня мирового океана, а также времени. В 2006 году в американской системе GPS функционировало 29 спутников.

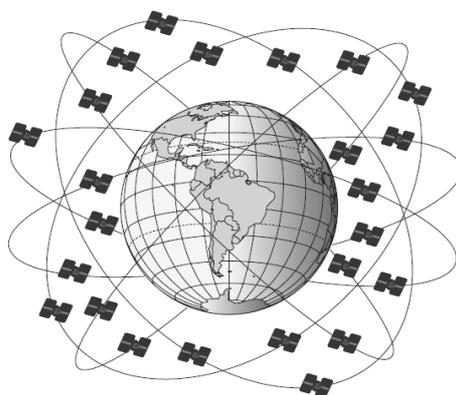


Рис. 2.1. Схема орбит спутников американской системы GPS.

Российская Глобальная Навигационная Спутниковая Система (ГЛОНАСС) создается так, чтобы каждый наземный приемник большую часть времени мог видеть от 6 до 12 передающих спутников. Аналогично GPS системе, для определения 3-х координат и синхронизации во времени приемник должен принимать сигналы минимум от 4-х спутников.

Спутники системы ГЛОНАСС находятся на 3-х круговых орбитах на высотах 19 140 км, как это показано на Рис. 2.2. Эта высота на 1050 км ниже, чем у спутников американской системы GPS. Спутники совершают 17 полных оборотов по орбитам за каждые 8 дней. Поскольку в каждой орбитальной плоскости находится 8 спутников, один из спутников находится в одной и той же точке небосвода каждый день. В отличие от фиксированных

радиочастот американской системы GPS, каждый спутник системы ГЛОНАСС передает радиосигналы на разных частотах. Например, для сигнала L_1 частоты могут быть $f_l = 1602 \text{ МГц} + (n \times 0,5625) \text{ МГц}$, где n – номер частотного канала ($n = 0, 1, 2, \dots$), который различен для разных спутников. Спутники и частотные каналы определяются по псевдослучайным кодовым номерам, принимаемым приемниками. В конечном виде система ГЛОНАСС будет иметь 24 спутника и только 12 частотных каналов. При этом спутники, расположенные в противоположных точках орбит будут работать на одинаковых частотах, поскольку такие спутники никогда не могут быть одновременно видны из одного пункта на земной поверхности.

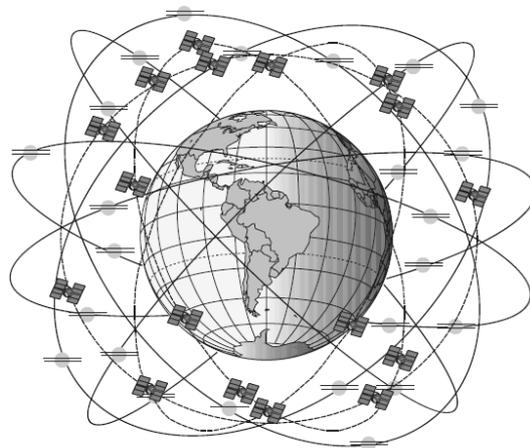


Рис. 2.2. Схема расположения орбит спутников навигационных систем GPS (сплошные линии) и ГЛОНАСС (пунктир).

2.2. Наземные GPS измерения одним приемником

Общий принцип измерений координат пункта приема радиосигналов GPS спутников исходит из соотношения [1]:

$$D' = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} + c\tau_R + \sigma_D, \quad (2.1)$$

где D' – так называемая, *псевдодальность* между приемником и спутником; x_s, y_s, z_s – координаты GPS спутника; x, y, z – координаты приемника; c – скорость света; τ_R – отклонение часов приемника от системного времени; σ_D – погрешность измерений. Действительное расстояние (*дальность*) от приемника до GPS спутника

$$D = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2}. \quad (2.2)$$

Псевдодальность (2.1) отличается от действительной дальности (2.2) наличием ошибок измерений. Соотношение (2.1) содержит четыре неизвестных: x, y, z и τ_R . Для их определения необходимо определить псевдодальности минимум до четырех различных GPS спутников.

Современные приемники обычно регистрируют более четырех спутников одновременно. Поэтому для уменьшения случайных ошибок при расчете координат используется метод взвешенных наименьших квадратов.

Для определения псевдодальности (2.1) измеряют либо время распространения кодированного сигнала, либо набег фазы несущей радиоволны на трассе GPS спутник – приемник. Поэтому различают кодовые и фазовые измерения псевдодальности.

Кодовые измерения псевдодальности.

$$D'_{P/C} = c\tau, \quad (2.3)$$

где τ - время задержки между моментом излучения и моментом регистрации кодированного радиосигнала. В системе GPS используют два вида кодов, обозначаемых C/A и P, соответственно. Для измерения времени задержки τ в приемнике из принятого со спутника сигнала выделяют один из указанных кодов и с помощью корреляционного анализа определяют его сдвиг относительно аналогичного кода, который генерирует сам приемник. При этом двухчастотный приемник может выдавать три кодовых измерения псевдодальности: по C/A-коду на частоте f_1 (она обозначается C1), по P-коду на частоте $F1$ (обозначается P1) и по P-коду на частоте f_2 (обозначается P2). Точность определения псевдодальности по кодовым измерениям составляет около 1% от длины кода. Более длинным является C/A код, который обеспечивает точность измерения D' до 3 м. При использовании более короткого P-кода в принципе достижима точность до 0.3 м.

Фазовые измерения псевдодальности.

$$D'_f = \lambda\Delta\varphi + \lambda N, \quad (2.4)$$

где $\lambda = c/f$ - длина радиоволны; $\Delta\varphi$ - измеряемая приемником разность фаз между несущей радиоволной принятой от спутника и сигналом той же частоты, сгенерированном в самом приемнике. Полное число циклов фазы в момент включения приемника (N в (2.4)) неизвестно. Это так называемая *фазовая неоднозначность измерений*. Для ее устранения существуют разные способы, например, комбинирование фазовых и кодовых измерений, использование частотных фильтров Калмана и др. Измеренные фазовые псевдодальности в длинах радиоволн волн (D'_f/λ) на частотах f_1 и f_2 обозначаются как L1 и L2, соответственно. Разность фаз $\Delta\varphi$ в (2.4) измеряется радиотехническими средствами с точностью до 0.01 периода радиоволны. Поэтому при фазовых измерениях псевдодальность (2.4) может быть определена с точностью до сотых долей длины несущей радиоволны, т. е. до 1 – 2 мм.

Измерения доплеровского сдвига частоты

$$\frac{\partial \Delta \varphi}{\partial t} = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial D'_f}{\partial t} \quad (2.5)$$

выполняются для расчета скорости перемещения объекта, на котором установлен приемник GPS. Измеренные доплеровские сдвиги частот f_1 и f_2 обозначаются D1 и D2. Составляющие скорости перемещения приемника определяются посредством решения уравнений, аналогичных (2.1). Погрешность определения скорости обычно составляет порядка 0.2 м/с. Если приемник не перемещается, то измеренные значения D1 и D2 не используются.

Погрешности измерений. На точность измерений псевдодальности (а следовательно и координат) влияет ряд факторов, перечисленных в табл. 2.1 [1-3].

Таблица 2.1. Составляющие погрешности навигационных измерений псевдодальности

Источник погрешности	Погрешность
Геометрическое расположение GPS спутников	PDOP
Неточность расчетов орбит спутников и времени	0.5 – 3 м
Случайные отклонения орбит и часов	0.5 – 3 м
Шумы приемника	1.5 – 3 м
Задержка радиосигнала в ионосфере	2 – 10 м
Задержка сигнала в тропосфере	1 – 2 м
Многолучевость распространения (из-за отражений вблизи приемника)	1 - 2 м
Меры по искусственному снижению точности	до 30 м
Прочие источники	1 м

Табл. 2.1 показывает, что наиболее важным источником ошибок является геометрия рабочего созвездия GPS спутников. Для характеристики взаимного расположения спутников и приемника вводится коэффициент ухудшения точности PDOP (Position Dilution of Precision), на который следует умножать все другие ошибки, перечисленные в табл. 2.1. Величина коэффициента PDOP обратно пропорциональна объему фигуры, образованной пересечением лучей «приемник – спутник» со сферой единичного радиуса, центр которой совмещен с приемником. Большое значение PDOP указывает на неудачное расположение навигационных спутников и соответствует большим ошибкам измерений. Благоприятными условиями измерений считается геометрия с $PDOP < 3$.

Вторым по значимости вкладом в погрешность измерений псевдодальности в табл. 2.1 является ионосферная задержка радиосигнала. Ее величина пропорциональна полному содержанию электронов на пути радиолуча.

В простых случаях (одночастотные кодовые приемники) для компенсации ионосферной и тропосферной задержек радиосигнала используются полуэмпирические математические модели соответствующих слоев атмосферы. Поправки рассчитываются с использованием специальных коэффициентов, передаваемых в навигационных сообщениях со спутников.

В двухчастотных фазовых приемниках возможно построение различных линейных комбинаций из псевдодальностей D'_{f_1} и D'_{f_2} , измеренных согласно (2.4) на двух частотах:

$$D' = m_1 D'_{f1} + m_2 D'_{f2}, \quad (2.6)$$

где m_1 и m_2 – весовые коэффициенты. Линейная комбинация с $m_1 = 1$ и $m_2 = -f_2/f_1$ используется для компенсации ионосферной задержки. В геофизике с ее помощью определяют полное электронное содержание в ионосфере (см. Лабораторную работу 1 ниже).

Комбинирование фазовых и кодовых измерений псевдодальности устраняет фазовую неоднозначность при одночастотных измерениях. Оно также используется в алгоритмах сглаживания данных путем усреднения отдельных измерений псевдодальности в течение некоторого промежутка времени. Интервал времени усреднения может меняться от нескольких минут (при определении координат в режиме реального времени) до нескольких часов (режим постобработки, применяемый в геодезии). Усреднение измерений по длительным интервалам времени позволяет эффективно уменьшить случайные погрешности, связанные с геометрией рабочего созвездия спутников, шумами приемника, случайными отклонениями орбит спутников и часов, многолучевостью.

Наблюдения несколькими наземными приемниками. Для уменьшения погрешностей определения координат, обсуждавшихся выше, наиболее эффективны одновременные измерения несколькими наземными GPS приемниками, расположенными на сравнительно небольшом расстоянии друг от друга.

Наиболее часто используется метод *дифференциальных измерений* двумя разнесенными GPS приемниками (см. [1, 2]). Один из этих приемников находится в пункте с точно известными координатами (*базовая станция*). Местоположение второго приемника подлежит измерению. Базовый приемник определяет свои координаты по спутникам GPS. Путем сравнения измеренных координат с истинными их значениями вычисляются поправочные коэффициенты, которые передаются второму приемнику для коррекции его координат. Второй приемник в этом случае должен иметь дополнительный канал связи для приема поправок, а также дополнительное программное обеспечение для автоматической корректировки своих навигационных измерений по принятым поправкам.

Для ряда задач широкое применение находят *относительные измерения*, в которых осуществляются высокоточные измерения расстояний между двумя приемниками [1, 2]. При проведении относительных измерений в реальном режиме времени требуется наличие канала связи между приемниками для передачи их координат. Для задач, не требующих высокой оперативности (геодезия, геодинамика) результаты измерения координат каждым приемником сети могут накапливаться, а их сравнение обеспечивается последующей обработкой. В этом случае нет необходимости иметь прямую связь между приемниками.

2.3. Механизмы влияния атмосферы на распространение радиосигналов GPS.

Радиосигналы от GPS спутников, регистрируемые приемниками, расположенными на земной поверхности, могут использоваться для получения информации об общем содержании ионосферных электронов и водяного пара (ОСВП) в столбе атмосферы над приемником. Эти измерения с достаточной точностью могут быть интерпретированы в приближении геометрической оптики. Геометрия наземных GPS наблюдений изображена на рис. 2.3 Траектория радиосигнала немного искривлена и скорость волны изменяется и составляет $v = c/n$, где c – скорость света в вакууме.

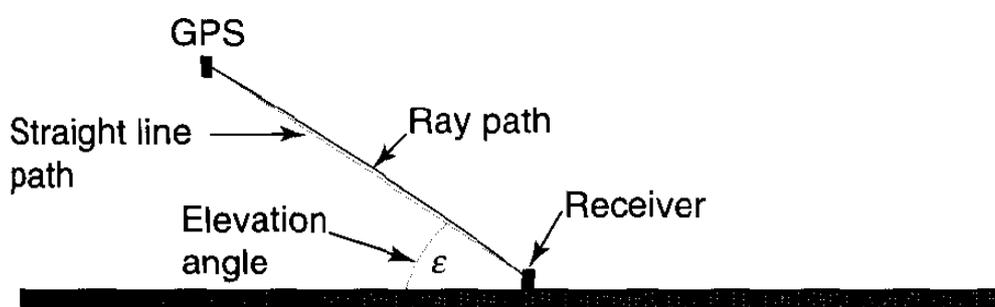


Рис. 2.3. Геометрия наземных GPS измерений. Скорость радиосигнала уменьшается из-за влияния показателя преломления в атмосфере и траектория радиолуча искривляется. Однако, при углах наклона $\varepsilon > 15^\circ$ угол отклонения луча мал и достаточную точность дает прямолинейная аппроксимация пути.

Из-за уменьшения скорости изменяется время прохождения радиосигнала от GPS спутника до приемника на величину δt . Если бы радиосигнал двигался с постоянной скоростью c , это увеличение времени было бы эквивалентно прохождению радиосигналом дополнительного пути $\Delta L = c\delta t$. Обычно, дополнительный путь составляет $\Delta L \sim 2,5$ м, когда GPS передатчик находится в зените, и, в первом приближении $\Delta L \sim 1/\sin\varepsilon$, где ε - угол места GPS спутника. С учетом искривления радиолуча в атмосфере

$$\Delta L = \int_s n(s)ds - d \quad (2.7)$$

где интегрирование выполняется вдоль действительного пути s , а d – расстояние по прямой линии между спутниковым передатчиком и наземным приемником.

В земной атмосфере коэффициент преломления очень мало отличается от единицы и для удобства его часто представляют в виде $n = 1 + 10^{-6}N$, где N – величина, называемая коэффициентом рефракции. Вблизи земной поверхности обычно $N \sim 330$. С использованием коэффициента рефракции (2.7) записывается в виде

$$\Delta L = 10^{-6} \int_s N(s) ds + (s - d), \quad (2.8)$$

где s – полная длина искривленного пути радиолуча. На практике при углах места GPS спутника $\varepsilon > 15^\circ$ отклонение траектории радиолуча от прямолинейной мало. Поэтому, величина $|s - d|$ порядка сантиметра или менее и последним слагаемым в правой части (2.8) можно пренебречь.

В общем случае, GPS спутник, с которого принимается радиосигнал, может находиться не в зените, а иметь угол места ε (см. рис. 2.3). Поэтому, следует ввести корректирующую функцию $M(\varepsilon) = \Delta L_z / \Delta L$, где ΔL_z и ΔL - дополнительные набег пути в зените и под углом ε , соответственно. В приближении плоской атмосферы можно считать, что

$$M(\varepsilon) = \Delta L_z / \Delta L \approx \sin \varepsilon, \quad (2.9)$$

хотя в литературе можно найти более сложные и точные формулы. Например, при учете сферичности для горизонтально однородного слоя повышенного значения N типа ионосферного

$$M(\varepsilon) = \cos \left[\arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \cos \varepsilon \right) \right], \quad (2.10)$$

где R_E – радиус Земли, h_{\max} – высота максимума слоя. При углах $\varepsilon > 70^\circ$ выражения (2.9) и (2.10) дают практически совпадающие результаты. При низких углах места ($\varepsilon < 30^\circ$) необходимо использовать (2.10).

В атмосфере коэффициент рефракции описывается выражением

$$N = \frac{c_1 p}{T} + \frac{c_2 p_w}{T} + \frac{c_3 p_w}{T^2} \pm \frac{c_4 10^6 N_e}{f^2}, \quad (2.11)$$

где $c_1 = 77,6 \text{ К гПа}^{-1}$, $c_2 = 64,8 \text{ К гПа}^{-1}$, $c_3 = 3,776 \text{ К}^2 \text{ гПа}^{-1}$, $c_4 = 40.308 \text{ м}^3/\text{с}^2$; p – парциальное давление сухого воздуха, p_w – парциальное давление водяного пара, N_e – электронная концентрация. Второе и третье слагаемые в правой части (2.11) существенны в тропосфере. На ионосферных высотах доминирует последнее слагаемое в правой части (2.11). При этом, коэффициенты рефракции для фазовой и групповой скоростей и траекторий радиоволн различаются знаками – и + перед последним слагаемым в (2.11), соответственно.

В соответствии с (2.11) из общего дополнительного пути радиолуча обычно выделяют ионосферную и тропосферную составляющие. Ионосферный дополнительный путь обусловлен влиянием последнего слагаемого в правой части (2.11) и его измерение позволяет определять общее содержание электронов на вдоль траектории радиолуча. Тропосферный дополнительный путь в основном обусловлен влажностью атмосферы (второе и третье слагаемые в (2.11)) и позволяет определять общее содержание водяного пара вдоль лучевой траектории.

3. Лабораторная работа 1. Методы определения полного электронного содержания

Существует несколько алгоритмов определения полного электронного содержания (ПЭС) в столбе атмосферы путем наземного приема радиосигналов GPS спутников.

3.1. Определение ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям псевдодальности.

Как описано в п. 2.2, GPS приемник определяет фазовые псевдодальности (2.4) на двух частотах f_1 и f_2 , выраженные в количестве длин радиоволн λ_1 и λ_2 и обозначаемых L_1 и L_2 , соответственно. Учитывая в (2.8) для фазовой траектории в ионосфере только последнее слагаемое выражения для коэффициента радиорефракции (2.11) со знаком минус, получаем для ионосферного набега пути выражение

$$\Delta L_{ph1,2} = -\frac{c_4}{f_{1,2}^2} I, \quad I = \int_s N_e ds, \quad (3.1)$$

где I – полное электронное содержание электронов вдоль фазового луча. Учитывая (3.1), (2.1) и (2.2), полные псевдодальности вдоль фазовых траекторий для частот f_1 и f_2 можно записать в виде

$$L_1 \cdot \lambda_1 = D - \frac{c_4}{f_1^2} I + \Delta L_0 + \sigma_{L1}, \quad L_2 \cdot \lambda_2 = D - \frac{c_4}{f_2^2} I + \Delta L_0 + \sigma_{L2}, \quad (3.2)$$

где D – истинное расстояние между приемником и спутником, ΔL_0 - эффективное удлинение пути за счет влияния тропо-стратосферы, рассогласования часов, фазовой неоднозначности измерений и т.п., $\sigma_{L1,2}$ - случайные ошибки измерений. Разрешая систему уравнений (3.2) относительно I , можно получить формулу для определения ПЭС по фазовым измерениям на двух частотах:

$$I = \frac{1}{c_4} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const_{1,2} + \sigma_L], \quad (3.3)$$

где L_1, L_2 – псевдодальности, измеренные фазовым методом, $const_{1,2}$ – неоднозначность фазовых измерений, σ_L – ошибка измерений фазы. Обычно считается, что в результате применения специальных алгоритмов $const_{1,2} = 0$. Измерения фазы в системе GPS выполняются с высокой точностью. Поэтому ошибка в определении ПЭС при 30-секундных интервалах усреднения не превышает 10^{14} м^{-2} (или 0.01 TECU) [1,2]. Для измерения ПЭС принята специальная единица TECU (Total Electron Content Unit), равная 10^{16} м^{-2} .

3.2. Определение ПЭС по кодовым измерениям псевдодальности на двух частотах.

GPS приемники производят измерения псевдодальностей P_1 и P_2 по Р-коду на двух частотах f_1 и f_2 . Эти псевдодальности соответствуют групповому пути радиоволны, когда в (2.11) необходимо использовать знак плюс перед последним слагаемым. Аналогично (3.2) получаем

$$P_1 = D + \frac{c_4}{f_1^2} I + \Delta L_0 + \sigma_{P1}, \quad P_2 = D + \frac{c_4}{f_2^2} I + \Delta L_0 + \sigma_{P2}, \quad (3.4)$$

Разрешая эти уравнения относительно I , получаем формулу для определения ПЭС по кодовым измерениям на двух частотах, аналогичную (3.3):

$$I = \frac{1}{c_4} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + \sigma_P], \quad (3.5)$$

где σ_P – ошибка измерения дальности по Р-коду. Ошибки этого метода существенно выше, чем по фазовым измерениям [1].

3.3. Определение ПЭС по кодовым и фазовым измерениям псевдодальности.

Если отсутствуют фазовые измерения псевдодальности на вспомогательной частоте f_2 , для определения ПЭС могут использоваться данные измерений псевдодальности P_1 по коду Р или С/А (см. (2.3)) и фазовые измерения на основной частоте f_1 . Разрешая первое уравнение (3.2) и (3.4) относительно I , получаем

$$I = \frac{f_1^2}{2c_4} (P_1 - L_1 \lambda_1 + const_1 + \sigma_{L_1} + \sigma_C), \quad (3.6)$$

где σ_C – ошибка измерений по коду P или C/A . Ошибки кодово-фазовых измерений больше, чем у фазовых и меньше, чем у чисто кодовых измерений ПЭС.

3.4. Преобразование в «вертикальное» ПЭС.

Приведенные выше формулы позволяют определить полное электронное содержание вдоль траектории радиолуча, наклоненного под углом места ε к горизонту, под которым виден GPS спутник (см. рис. 2.3). Для сравнения данных разных спутников и экспериментов необходимо преобразование этого «наклонного» ПЭС I в эквивалентное «вертикальное» значение I_V , соответствующее направлению в зенит, $\varepsilon = 90^\circ$. Это можно сделать по формуле

$$I_V = IM(\varepsilon), \quad (3.7)$$

где $M(\varepsilon)$ - корректирующая функция, задаваемая (2.9) для $\varepsilon > 30^\circ$ и (2.10) для $\varepsilon < 30^\circ$.

3.5. План выполнения лабораторной работы 1.

Для определения полного электронного содержания в столбе атмосферы над приемником необходимо выполнить следующую последовательность действий:

1. Подключить GPS приемник к антенне и компьютеру (см. приложение 1).
2. Установить связь компьютера с приемником (см. приложение 1).
3. Измерить значения фазовых псевдодальностей радиосигналов GPS спутников L_1 и L_2 на двух частотах.
4. Вычислить ПЭС по формуле (3.3) по фазовым измерениям на двух частотах.
5. Измерить псевдодальность C_1 по коду C/A на частоте f_1 .
6. Вычислить ПЭС по формуле (3.4) по кодовым и фазовым измерениям на основной частоте.
7. Измерить значения псевдодальностей радиосигналов GPS спутников P_1 и P_2 по P-коду на двух частотах.
8. Вычислить ПЭС по формуле (3.6) по кодовым измерениям на двух частотах.
9. По формулам (3.7), (2.10), (2.11) привести набег наклонного пути к вертикали.
10. Сравнить значения ПЭС, полученные в пунктах (4), (6), (8), (9) для 2 – 3 GPS и ГЛОНАСС спутников.

4. Лабораторная работа 2. Определения содержания водяного пара в тропосфере.

Целью настоящей лабораторной работы является определение общего содержания водяного пара в столбе атмосферы над приемником с помощью наземного приема сигналов GPS спутников (см. п. 2).

4.1. Алгоритм определения содержания водяного пара.

На высотах ниже 80 – 100 км в (2.11) можно пренебречь последним слагаемым правой части. Введем новую константу $c_2' = c_2 - (R/R_w)c_1$, где R и R_d – газовые константы для сухого воздуха и водяного пара, соответственно. Тогда (2.11) переписывается в виде

$$N = c_1 R \rho + \frac{c_2' P_w}{T} + \frac{c_3 P_w}{T^2}, \quad (4.1)$$

где ρ – плотность атмосферы. Исходя из (2.8) и (4.1), полную атмосферную задержку радиосигнала (дополнительный путь) можно представить в виде суммы «гидростатической задержки», связанной с первым слагаемым в правой части (4.1) и «влажной задержки», соответствующей второму и третьему слагаемым. Обычно гидростатическая задержка составляет порядка 90% от полного дополнительного пути ΔL .

После приведения дополнительного набега пути к зениту, пользуясь (2.9) или (2.10), гидростатическая составляющая дополнительного набега пути вычисляется по формуле

$$\Delta L_{zg} = 10^{-6} c_1 R \int_0^{\infty} \rho dz = 10^{-6} c_1 R p_0 / g, \quad (4.2)$$

где p_0 – приземное давление, которое может быть измерено, например, с помощью метеостанции, имеющейся в лаборатории кафедры физики атмосферы. Точность формулы (4.2) обычно составляет порядка нескольких миллиметров. После вычисления гидростатического набега пути по (4.2), он может быть исключен для вычисления набега пути, связанного с влажностью:

$$\Delta L_w = \Delta L - \Delta L_g = 10^{-6} \left[\int_0^{\infty} \frac{c_2' P_w}{T} dz + \int_0^{\infty} \frac{c_3 P_w}{T^2} dz \right]. \quad (4.3)$$

После некоторых преобразований, из (4.3) получается формула для оценки полного содержания водяного пара в столбе атмосферы, ОСВП, имеющая следующий вид:

$$\text{ОСВП} = \int_0^{\infty} \frac{p_w}{R_w T} dz = \frac{\Delta L_w}{\kappa}, \kappa = 10^{-6} \left(\frac{c_3}{T_m} + c_1' \right) R_w, \quad (4.4)$$

где T_m – средняя взвешенная температура, определяемая, как

$$T_m = \frac{\int_0^{\infty} (p_w / T) dz}{\int_0^{\infty} (p_w / T^2) dz}. \quad (4.5)$$

Поскольку определение взвешенной температуры (4.5) содержит p_w , множитель κ в (4.4) сам зависит от влажности. Однако, обычно с достаточной точностью T_m можно оценить из климатических данных и приземных измерений температуры. В тропосфере обычно температура линейно, а давление экспоненциально убывают с высотой:

$$T = T_0 - \gamma z; p_w = p_{w0} e^{-z/H_w}, \quad (4.6)$$

где T_0 и p_{w0} – приземные температура и давление водяного пара, γ - высотный градиент температуры (обычно близкий к 7 К/км), а H_w – высота однородной атмосферы для водяного пара. Подставляя (4.6) в (4.5) и интегрируя, получаем

$$T_m = T_0 \alpha e^{\alpha}; \alpha = \gamma R_w / g, \quad (4.7)$$

где g – гравитационное ускорение. Обычно оценки ОСВП по данным GPS спутников имеют точность $1 - 2 \text{ kg m}^{-2}$ при типичных значениях ОСВП $20 - 40 \text{ kg m}^{-2}$.

4.2. План выполнения лабораторной работы 2.

Для определения общего содержания водяного пара в столбе атмосферы над приемником необходимо выполнить следующую последовательность действий:

11. Подключить GPS приемник к антенне и компьютеру (см. приложение 1).
12. Установить связь компьютера с приемником (см. приложение 1).
13. Измерить значения фазовых путей радиосигналов GPS спутников L_1 и L_2 на двух частотах.
14. Вычислить и исключить ионосферный набег пути радиолучей по измерениям на двух частотах.
15. По формулам (2.9) – (2.11) привести набег наклонного пути к вертикали.
16. Измерить с помощью метеостанции приземные давление и температуру.
17. По формуле (4.2) рассчитать и исключить гидростатическую составляющую набега пути ΔL_g .
18. По среднеклиматическим данным о температуре на разных высотах вычислить средний вертикальный градиент температуры для месяца, в который проводятся измерения.
19. По формуле (4.7) вычислить среднюю взвешенную температуру T_m .
20. По формуле (4.4) вычислить k и общее содержание водяного пара ОСВП.

5. Литература.

1. Козин И. Д. Спутниковые радионавигационные системы. Алматы, 2006.
2. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П., GPS мониторинг верхней атмосферы Земли, Иркутск, 2006.
3. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Positioning system: Theory and Practice. Springer-Verlag Wien, New York, 1992.
4. Healy, S. B. GPS Meteorology, Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Ed. J. R. Holton, Academic Press, 2003.

Приложение 1. Наземный GPS/ГЛОНАСС приемник фирмы NovAtel ProPak-V3.

В лаборатории кафедры физики атмосферы для исследований по GPS метеорологии используется приемник ProPak-V3 канадской фирмы NovAtel.

A1.1. Основные характеристики приемника

Приемник в настольном корпусе, приспособленном для переноски. Внешний вид приемника изображен на рис. 4.1.

Приемник может работать с сигналами как навигационной системы GPS, так и системы ГЛОНАСС на двух частотах, соответствующих каналам L_1 и L_2 (см. раздел 2.). Приемник помещен в ударопрочный металлический корпус. 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.



Рис. 4.1. GPS Приемник NovAtel ProPak-V3

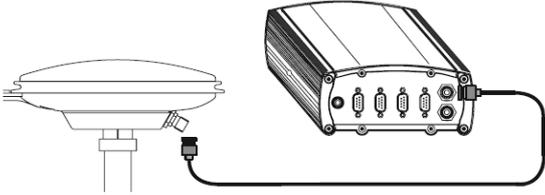
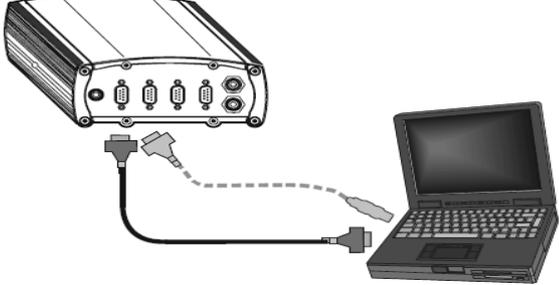
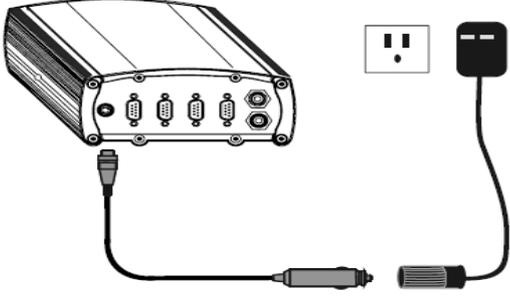
Таблица 1.

Основные технические характеристики GPS приемника ProPak-V3.

Точность измерения		Точность времени	20 нс
Фазового пути сигнала L_1	0.75мм	Точность определения скорости	0,03 м/с
Фазового пути сигнала L_2	2 мм	Размеры	186×160×71 мм
Частота отсчетов до	20 Гц	Вес	1,0 кг.
Время прогрева	30 -50 с.	Потребляемая мощность	2,2 Вт

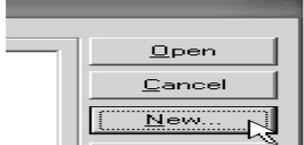
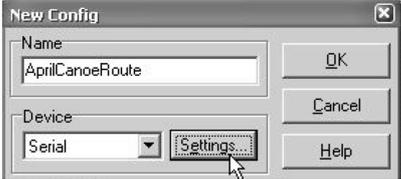
При выполнении лабораторной работы может потребоваться выполнить подключение к приемнику устройств, необходимых для работы. Кратко опишем порядок работы с приемником.

A1.2. Подготовка приемника к работе

<p>Подключение антенны: Установить антенну на устойчивом штативе в месте, обеспечивающем полный обзор небосвода. Подключить антенный коаксиальный кабель к разъему антенны и к гнезду «GPS» на задней стенке приемника.</p>	
<p>Подключение к компьютеру: Соединить COM1 порт приемника с COM или USB портом компьютера. При использовании USB порта на компьютере должны быть установлены драйверы, поставляемые с приемником.</p>	
<p>Подключение электропитания: Подключить красный разъем питающего провода к разъему приемника, помеченному красным цветом. Соединить разъем питающего кабеля с сетевым адаптером. Включить адаптер в сеть. Над портом питания приемника должна загореться красная лампочка.</p>	

A1.3. Программное обеспечение приемника

После подключения GPS приемника к антенне и сети можно переходить к установлению связи с GPS спутниками, находящимися в области прямой видимости антенны. Это выполняется с помощью компьютера и включает шаги, описанные ниже.

<p>1. Запустить программу CDU из папки, в которую установлено математическое обеспечение приемника.</p>	
<p>2. Выбрать кнопку «Open» из меню «Device».</p> <p>3. Выбрать кнопку «New» в диалоговом окне «Open»</p>	
<p>4. Придумать и ввести имя вашей новой конфигурации в поле «Name» диалогового окна «New Config», затем выбрать кнопку «Settings».</p>	

<p>5. В меню «Serial Device Settings» выбрать из списка номер порта компьютера, к которому подключен приемник.</p> <p>6. Выбрать скорость 57600 в поле «Baud Rate»</p> <p>7. Убрать выделение поля «Use hardware handshaking»</p> <p>8. Выбрать ОК для сохранения установок.</p> <p>9. Выбрать ОК для закрытия диалогового окна «New Config».</p>	
<p>10. Выбрать введенное в п. 4 имя конфигурации из списка «Available device configs» в диалоговом окне «Open».</p> <p>11. Выбрать кнопку «Open» для установления связи с приемником ProPak-V3.</p>	

После соединения программы CDU с приемником открывается несколько окон, включая консольное окно. После этого система готова к работе. Информация о приемнике и его координатах находится в окнах, в которые можно войти через меню «View». Например, если в меню «View» выбрать пункт «Position Window», то появится окно, показывающее координаты приемника. Для получения информации о наблюдаемых спутниках надо в том же меню выбрать «Tracking Status Window» (GPS или GLONASS). Более детальную информацию о программе CDU можно найти в «Help».



Рис. 4.2. Пример окна с информацией о спутниках.

Приложение 2. Необходимые команды и сообщения приемника

Для управления GPS приемником и для изменения его настроек из программы CDU можно подавать специальные команды. Кроме того, для получения значений различных параметров, необходимых для определения атмосферных характеристик, приемник способен выдавать различные сообщения, которые могут выводиться на экран компьютера, либо записываться в файлы с данными. Полный список команд и сообщений приводится в сопроводительной документации по GPS приемнику (на английском языке). Здесь описываются команды и сообщения, необходимые для выполнения лабораторных работ.

A2.1. Команды для настройки GPS приемника

Программа CDU (см. Приложение 1, п.А1.3) позволяет посылать команды приемнику с помощью консольного окна, открываемого из меню «View». Для отсылки команды надо:

- набрать команду в форматах ASCII, сокращенный ASCII, либо в двоичном формате.

Для работы с приемником наиболее удобен сокращенный ASCII формат. Для сбора данных лучше подходят ASCII, либо двоичный форматы.

- после ввода команды надо нажать «Enter», чтобы послать ее в приемник.
- различия между малыми и прописными буквами в командах нет.
- общий формат команд

ИмяКоманды [Порт] Параметр1 [Параметр2 ...] (A1.1)

Команда состоит из имени, номера порта (COM1, COM2, ...) и параметров. При выполнении лабораторных работ могут оказаться полезными следующие команды.

A2.1.1. CLOCKADJUST Включение/выключение слежения за часами приемника

Включает или выключает слежение за дрейфом часов приемника относительно системного времени GPS и введение соответствующих корректировок. Формат команды

clockadjust enable или clockadjust disable (A1.2)

Фабричная установка clockadjust enable.

A2.1.2. CSMOOTH Задание интервала усреднения кодовых измерений GPS

Команда задает интервал усреднения несущих волн при выполнении кодовых измерений по спутникам GPS системы. Формат

CSMOOTH f1time [f2time] (A1.3)

где $f1time$ и $f2time$ – интервалы усреднения для частот $f1$ и $f2$, соответственно. Фабричная установка `csmooth 100 100`

A2.1.3. DYNAMICS *Задание диапазона скоростей перемещения приемника*

Настраивает скорость слежения приемника за изменениями сигналов. Формат

DYNAMICS ДиапазонСкоростей (A1.4)

Параметр ДиапазонСкоростей может принимать значения AIR (скорости > 110 км/ч), LAND (скорости < 110 км/ч), FOOT (скорости < 11 км/ч). Фабричная установка:
`dynamics air`

A2.1.4. ECUTOFF *Отсечка GPS спутников по углу места*

Задаёт минимально допустимый угол места GPS спутников, сигналы которых отслеживаются и обрабатываются. Формат команды

ECUTOFF Угол (A1.5)

где параметр «Угол» - минимально допустимый угол места GPS спутников (см. рис.2.3). Фабричная установка `ecutoff 5.0`

A2.1.5. FORCEGPSL2CODE *Включение P или C/A кода для частоты f2*

Задание вида кода для кодовых вычислений псевдодальности на частоте $f2$. Формат

FORCEGPSL2CODE ТипКода (A1.6)

Параметр «ТипКода» может принимать значения AUTO – приемник сам выбирает лучший код, P – более точный код, C – менее точный код, DEFAULT – код по умолчанию. Фабричная установка `forcegpsl2code default`

A2.1.6. FRESET *Восстановление фабричных установок*

Убирает из памяти приемника все установки, выполненные пользователями. Формат

FRESET [параметр] (A1.7)

где «параметр» может принимать значения STANDARD, COMMAND, GPSALMANAC, GPSALMANAC, GLOALMANAC, GLOALMANAC, GPSEPHEM, GLOEPHEM, MODEL и др.

A2.1.7. GLOCSMOOTH *Интервал усреднения кодовых измерений ГЛОНАСС*

Команда задает интервал усреднения несущих волн при выполнении кодовых измерений по спутникам ГЛОНАСС системы. Формат

GLOCSMOOTH $f1time$ [$f2time$] (A1.8)

где f1time и f2time – интервалы усреднения для частот f1 и f2, соответственно. Фабричная установка csmooth 100 100

A2.1.8. GLOECUTOFF Отсечка ГЛОНАСС спутников по углу места

Задаёт минимально допустимый угол места ГЛОНАСС спутников, сигналы которых отслеживаются и обрабатываются. Формат команды

GLOECUTOFF Угол (A1.9)

где параметр «Угол» - минимально допустимый угол места ГЛОНАСС спутников (см. рис.2.3). Фабричная установка gloecutoff 5.0

A2.1.9. SAVECONFIG сохранение установок в памяти приемника

Формат команды:

SAVECONFIG (A1.10)

Записанная конфигурация может быть полностью или частично стерта командой FRESET (A1.7).

A2.1.10. UNLOGALL отменить все сообщения в заданный порт

Формат команды

UNLOGALL [порт] (A1.11)

Если задан параметр «порт», то отменяется вывод всех сообщений в этот порт. Если параметр «порт» не задан, отменяется вывод всех сообщений во все порты.

A2.2. Сообщения приемника

Все сообщения приемника выводятся по команде

log ИмяСообщения Параметры (A2.1)

Сообщения состоят из *заголовка сообщения* и *информативной части*. Здесь рассматриваются только сообщения, необходимые для выполнения лабораторных работ.

A2.2.1 Стандартный заголовок для ASCII сообщения

Обычно заголовок сообщения ключает следующие поля:

знак #, имя сообщения, компьютерный порт, номер сообщения в последовательности (обычно 0), процент времени простоя процессора, код качества времени GPS системы (см. Табл. A2.1 ниже), номер недели, время с начала GPS недели в секундах, статус приемника

(16-ричный код), зарезервированное служебное поле, номер версии программного обеспечения, конец заголовка – знак ;

Таблица A2.1. Коды качества времени GPS системы

Числовой код	ASCII код	Описание
20	UNKNOWN	Качество времени неизвестно
60	APPROXIMATE	Время установлено приблизительно
80	COARSEADJUSTING	Время приближается к курсовой точности
100	COARSE	Время курсовой точности
120	COARSESTEERING	Время установлено курсовым и отслеживается
130	FREEWHEELING	Положение утеряно, поправки не вычисляются
140	FINEADJUSTING	Установка высокой точности
160	FINE	Высокая точность времени
180	FINESTEERING	Высокая точность установлена и отслеживается
200	SATTIME	Время на спутнике

A2.2.2. BESTPOS Географические координаты приемника

Выдает наилучшую для данных условий оценку широты, долготы и высоты приемника, а также ряд индикаторов. Типичная команда

log bestpos once (A2.2)

Сначала выводится заголовок, начиная со знака # до ; затем 1) надежность решения, 2) тип решения, 3) широта в градусах, 4) долгота в градусах, 5) высота над уровнем моря в метрах, 6) разница между геоидом и эллипсоидом в метрах, 7) идентификационный номер геодезических данных, 8) дисперсия широты, 9) дисперсия долготы, 10) дисперсия высоты, 11) номер базовой станции, 12) запаздывание дифференциала в секундах, 13) запаздывание решения в секундах, 14) число использованных измерений, 15) число использованных псевдодалностей L1, 16) число псевдодалностей L1 выше предельного угла, 17) число псевдодалностей L2 выше предельного угла, 18 – 21) служебные поля, 22) 32-битный код, 23) перевод строки

Пример вывода в ASCII моде

```
#BESTPOSA,COM1,0,61.5,FINESTEERING,1435,209400.000,00000000,6145,2770;
SOL_COMPUTED,SINGLE,59.88085591533,29.82589890251,52.6185,15.9502,WGS84,1.4797,1.3427,3.2208,"",0.0
00,0.000,13,13,0,0,0,06,0,33*6dac54a8
```

A2.2.3. BESTXYZ Геоцентрические координаты приемника

Выдает наилучшую для данных условий оценку координат X , Y и Z приемника в геоцентрической системе координат, а также ряд индикаторов. Типичная команда

log bestxyz once (A2.3)

Сначала выводится заголовок, начиная со знака # до ; затем 1) надежность решения, 2) тип решения, 3) X -координата в метрах, 4) Y -координата в метрах, 5) Z -координата в метрах, 6) дисперсия X -координаты, 7) дисперсия Y -координаты, 8) дисперсия Z -координаты, 9) надежность решения для скорости, 10) тип решения для скорости, 11) X -компонента скорости в м/с, 12) Y -компонента скорости в м/с, 13) Z -компонента скорости в м/с, 14) дисперсия X -скорости, 15) дисперсия Y -скорости, 16) дисперсия Z -скорости, 17) номер базовой станции, 18) сдвиг во времени измерения скорости, 19) сдвиг во времени дифференциальных измерений в секундах, 20) сдвиг во времени решения, 21) число использованных измерений, 22) число использованных псевдодальностей L1, 23) число псевдодальностей L1 выше предельного угла, 24) число псевдодальностей L2 выше предельного угла, 25)-28) служебные поля, 29) 32-битный код, 30) перевод строки.

Пример вывода в ASCII моде

```
#BESTXYZA,COM1,0,61.5,FINESTEERING,1435,209400.000,00000000,d821,2770;  
SOL_COMPUTED,SINGLE,2783615.1932,1595862.8344,5493887.5001,1.6413,1.3106,3.1551,SOL_COMPUTED,DOPPLER_VE  
LOCITY,-0.0054,-0.0057,-0.0267,0.1962,0.1566,0.3771,"",0.150,0.000,0.000,13,13,0,0,0,06,0,33*ebec45fa
```

A2.2.4. RANGE Информация о псевдодальностях до спутников

RANGE дает информацию о псевдодальностях для всех видимых в данный момент спутниках. Типичная команда

log rangea once (A2.4)

Важно удостовериться, что часы приемника установлены. Это можно увидеть по наличию соответствующего бита в поле «статус приемника» в заголовке сообщения. Выводимые ошибки измерений (дисперсии) отражают только тепловой шум приемника.

Сначала выводится заголовок, начиная со знака # до ; затем число строк в сообщении; потом – информация для каждого спутника. Информационная строка **для каждого спутника содержит:**

1) номер спутника, номер ГЛОНАСС частоты, 2) кодовую псевдодальность в метрах (2.3), 3) ее дисперсию, 4) фазовую псевдодальность в длинах радио волны (2.4), 5) ее дисперсию,

б) доплеровскую частоту в герцах (2.5), отношение сигнал/шум, 7) интервал непрерывного слежения за фазой в секундах, 8) статус записи (16-ричный код).

При двухчастотных измерениях для каждого спутника выводятся две строки с одинаковым номером спутника и информацией о псевдодальностях на частотах $f1$ (первая строка) и $f2$ (вторая строка).

Пример вывода в ASCII моде:

```
#RANGEA,COM1,0,61.5,FINESTEERING,1435,209400.000,00000000,5103,2770;26,
24,0,24611970.785,0.128,-129336782.560896,0.011,1935.703,44.2,372.550,18109c04,
24,0,24611971.724,1.086,-100781901.633855,0.018,1508.340,33.4,236.820,11309c0b,
2,0,23312833.438,0.096,-122509764.839001,0.013,-2535.059,46.7,372.470,08109c24,
2,0,23312830.976,0.471,-95462141.986745,0.013,-1975.375,40.7,238.380,01309c2b,
4,0,25065849.949,0.137,-131721914.221047,0.014,-3478.121,43.6,372.450,08109c44,
4,0,25065850.643,0.901,-102640454.460443,0.019,-2710.227,35.0,238.360,01309c4b,
25,0,20482274.054,0.057,-107635075.652798,0.005,44.441,51.3,372.730,18109c64,
25,0,20482271.473,0.252,-83871479.376014,0.005,34.629,46.1,238.380,11309c6b,
23,0,22694127.417,0.083,-119258440.306050,0.008,-3239.391,47.9,372.510,18109c84,
23,0,22694123.783,0.534,-92928641.131913,0.008,-2524.203,39.6,238.260,11309c8b,
27,0,21235707.999,0.060,-111594398.046450,0.006,1472.012,50.8,372.470,08109d04,
27,0,21235706.669,0.273,-86956666.881407,0.006,1147.023,45.4,238.380,01309d0b,
10,0,22211156.141,0.077,-116720412.253069,0.009,2444.125,48.6,372.388,08109d24,
10,0,22211154.721,0.459,-90950966.913835,0.009,1904.508,40.9,236.740,01309d2b,
16,0,23632356.519,0.108,-124188862.830928,0.009,-2400.898,45.7,372.720,18109d44,
16,0,23632354.175,0.865,-96770535.710020,0.011,-1870.832,35.4,238.380,11309d4b,
8,0,22755442.033,0.084,-119580661.371382,0.008,3348.824,47.9,372.470,08109d64,
8,0,22755441.129,0.526,-93179728.115330,0.008,2609.469,39.7,238.280,01309d6b,
13,0,20730631.622,0.058,-108940202.498639,0.006,-1883.633,51.0,372.420,18109d84,
13,0,20730628.905,0.286,-84888459.504392,0.006,-1467.770,45.0,238.260,11309d8b,
44,12,21290718.398,0.176,-113970880.716212,0.009,3325.125,47.5,187.380,08119e04,
44,12,21290718.154,0.193,-88644025.687315,0.001,2586.207,41.4,181.912,10b19e0b,
43,8,19348049.711,0.148,-103426416.025308,0.008,-753.914,49.0,187.340,08119f04,
43,8,19348045.809,0.155,-80442756.437077,0.000,-586.383,43.3,181.436,00b19f0b,
60,10,22985519.608,0.300,-122957028.929487,0.016,-2045.465,42.8,187.370,18119f44,
60,10,22985522.985,0.449,-95633316.424437,0.002,-1590.922,34.1,183.480,00b19f4b*c54a0laf
```

A2.2.5. RXCONFIG Конфигурация приемника

Выводит список текущих установок приемника. Рекомендуемая команда

Log rxconfig once (A2.5)

A2.2.6. SATVIS Угловые координаты GPS спутников.

Выдает угловые координаты и скорости движения видимых в данный момент GPS спутников. Параметры вычисляются по текущим параметрам орбит спутников, основанных на текущем альманахе.

Типичная команда

log satvis once (A2.6)

Сначала выводится заголовок, начиная со знака # до ; затем число строк в сообщении; потом – информация для каждого спутника. Информационная строка для каждого спутника содержит:

1) номер спутника, 2) ГЛОНАСС частоту, 3) исправность спутника, 4) угол места ε в градусах (см. рис. 2.3), 5) азимут в градусах, 6) теоретическую доплеровскую частоту, 7) кажущуюся доплеровскую частоту с учетом коррекции дрейфа часов.

Пример сообщения в ASCII моде:

```
#SATVISA,COM1,0,61.5,FINESTEERING,1435,209400.000,00000000,0947,2770;TRUE,TRUE,46,
25,0,0,76.2,148.4,44.455,44.614,
43,8,0,71.3,227.7,-747.174,-747.015,
27,0,0,61.8,206.8,1472.275,1472.434,
13,0,0,60.0,107.3,-1885.256,-1885.097,
44,12,0,35.6,317.2,3266.438,3266.597,
10,0,0,35.4,303.0,2443.618,2443.777,
8,0,0,33.3,218.0,3349.496,3349.655,
23,0,0,29.0,105.4,-3240.599,-3240.440,
126,0,0,22.6,185.6,-0.020,0.140,
136,0,5,22.1,185.6,-0.018,0.141,
2,0,0,21.3,259.4,-2535.849,-2535.689,
16,0,0,21.1,37.3,-2403.558,-2403.399,
61,9,1,20.9,38.5,1550.411,1550.570,
60,10,0,16.5,344.9,-2016.837,-2016.678,
120,0,0,12.3,229.6,0.002,0.161,
24,0,0,12.2,340.3,1935.311,1935.470,
4,0,0,8.5,227.8,-3477.915,-3477.756,
7,0,0,4.4,346.0,-1720.344,-1720.185,
3,0,0,3.9,85.7,2907.452,2907.611,51,
11,0,3.5,49.5,-4241.554,-4241.395,
6,0,0,1.9,337.4,-2059.731,-2059.572,
29,0,0,-5.9,280.9,3538.736,3538.895,
21,0,0,-7.4,7.8,3210.541,3210.700,45,
13,0,-10.0,332.1,4396.543,4396.702,
28,0,0,-11.4,183.7,3424.132,3424.291,
19,0,0,-11.7,105.3,3162.222,3162.381,
20,0,0,-12.2,149.0,-3797.251,-3797.092,
26,0,0,-18.8,280.0,3853.331,3853.490,41,
13,0,-23.1,149.9,-4085.478,-4085.319,
31,0,0,-26.6,49.7,-3287.228,-3287.069,58,
15,0,-29.7,263.7,-3399.039,-3398.880,47,
11,0,-30.3,229.5,3627.827,3627.986,
17,0,0,-37.1,202.7,-352.396,-352.237,
11,0,0,-38.2,146.3,-332.320,-332.161,
1,0,0,-38.9,97.2,-2780.460,-2780.301,
56,10,1,-40.8,163.5,1608.499,1608.658,
30,0,0,-45.1,336.2,-2821.221,-2821.061,
38,14,0,-46.8,344.2,3152.218,3152.377,
18,0,0,-49.8,346.4,2406.043,2406.202,
5,0,0,-54.0,322.5,-2050.296,-2050.137,
40,19,0,-56.8,136.1,-2190.082,-2189.923,
12,0,0,-57.0,302.5,-1420.045,-1419.886,
9,0,0,-63.1,251.8,1620.718,1620.877,
32,0,255,-67.8,101.8,-847.775,-847.616,
14,0,0,-69.3,92.7,-1296.522,-1296.363,
22,0,0,-69.7,23.4,939.142,939.301*1c9284b9
```

A2.2.7. SATXYZ Геоцентрические координаты спутников

Выводит информацию о геоцентрических координатах GPS спутников, а также поправок хода часов, модельной ионосферной и тропосферной поправок к псевдодальностям.

Типичная команда:

log satxyz once

(A2.7)

Сначала выводится заголовок, начиная со знака # до ; затем число строк в сообщении; потом – информация для каждого спутника. Информационная строка для каждого спутника содержит:

1) номер спутника, 2) X-координату спутника в метрах, 3) Y-координату спутника в метрах, 4) Z-координату спутника в метрах 5) поправку к псевдодальности из-за разности хода часов в метрах, 6) ионосферная поправка к псевдодальности в метрах, 7) тропосферная поправка к псевдодальности в метрах, 8)-9) служебные поля.

Пример вывода

```
#SATXYZA.COM1,0,61,5,FINESTEERING,1435,209400,000,00000000,6f3c,2770;0,0,13,  
24,-7871540.4044,13880980.4967,21396412.2737,4201.628,1.717837123,11.319681408,0.000000000,0.000000000,  
2,20116937.1201,-13118558.0254,10805679.3357,36116.903,-4.139491367,6.517081431,0.000000000,0.000000000,  
4,26014722.7253,-6244220.4906,273463.7085,2156.545,2.171576625,15.828891984,0.000000000,0.000000000,  
25,13384275.1207,10636297.6392,20654539.2038,107741.533,-3.452790444,2.390469973,0.000000000,0.000000000,  
23,2031033.9442,23276394.1399,12340238.0324,54154.277,-5.343700050,4.837942768,0.000000000,0.000000000,  
27,19960184.7322,6224012.6224,17158022.2500,36489.022,-2.590915167,2.630417487,0.000000000,0.000000000,  
10,8583919.3138,-12607094.1019,21598559.0821,31327.245,-2.173761213,4.034228526,0.000000000,0.000000000,  
16,-13320913.2613,7809835.7737,21705332.6697,48447.736,-2.651870740,6.586189873,0.000000000,0.000000000,  
8,25266302.5775,1003964.9403,8723414.4964,-34271.085,-1.408653941,4.265893832,0.000000000,0.000000000,  
13,8038853.0673,16045761.8848,19482834.4378,56567.880,-3.704741092,2.672043226,0.000000000,0.000000000,  
44,4542118.7191,-10932493.5350,22581402.6886,-29879.326,-0.225473588,4.012805625,0.000000000,0.000000000,  
43,16174588.0961,3992173.9672,19162504.9202,-63836.634,-5.565771671,2.450070915,0.000000000,0.000000000,  
60,-7443023.3743,-10890309.2508,21850074.0271,-7253.126,5.157387442,8.376775804,0.000000000,0.000000000*46704758
```

Приложение 3. Климатические данные о тропосферной температуре

Для определения влажности атмосферы в лабораторной работе 2 требуется информация о градиентах температуры в атмосфере. Эти градиенты могут быть определены из экспериментальных профилей температуры. Для координат Санкт-Петербурга путем осреднения метеорологической информации из базы данных Центра атмосферных исследований США за 1980 – 2006 автором получены средние климатические профили тропосферной температуры (в зависимости от давления), которые представлены в Табл. А3.1.

Таблица А3.1. Средние профили температуры для Санкт-Петербурга

p, мб	Средняя температура, К																																									
	январь			февраль			март			апрель			май			июнь			июль			август			сентябрь			октябрь			ноябрь			декабрь								
	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К	z, км	T, К								
1000	0.08	266.3	0.10	266.2	0.11	270.6	0.12	277.0	0.12	283.5	0.10	288.4	0.10	290.8	0.10	288.8	0.11	283.7	0.10	277.2	0.10	271.2	0.10	267.9	0.08	267.9	0.08	267.9	0.08	267.9	0.08	267.9	0.08	267.9	0.08	267.9	0.08	267.9				
925	0.69	266.5	0.71	266.2	0.72	268.5	0.75	273.9	0.77	279.4	0.76	284.0	0.77	286.6	0.76	284.9	0.75	280.2	0.74	275.5	0.74	270.6	0.72	267.8	0.69	267.8	0.69	267.8	0.69	267.8	0.69	267.8	0.69	267.8	0.69	267.8	0.69	267.8	0.69	267.8		
850	1.35	264.4	1.37	264.1	1.39	265.5	1.42	269.6	1.46	274.4	1.46	278.9	1.47	281.5	1.46	280.1	1.44	276.1	1.42	272.5	1.39	268.0	1.35	265.6	1.35	265.6	1.35	265.6	1.35	265.6	1.35	265.6	1.35	265.6	1.35	265.6	1.35	265.6	1.35	265.6		
700	2.84	257.6	2.86	257.1	2.88	258.3	2.93	261.9	3.00	266.1	3.02	270.2	3.05	272.8	3.04	271.7	3.00	268.5	2.95	265.3	2.90	261.1	2.84	258.6	2.84	258.6	2.84	258.6	2.84	258.6	2.84	258.6	2.84	258.6	2.84	258.6	2.84	258.6	2.84	258.6		
600	3.98	250.5	4.00	250.0	4.03	251.1	4.10	254.9	4.18	259.1	4.23	263.4	4.27	266.0	4.25	264.9	4.19	261.5	4.13	258.3	4.06	254.1	4.00	251.6	4.00	251.6	4.00	251.6	4.00	251.6	4.00	251.6	4.00	251.6	4.00	251.6	4.00	251.6	4.00	251.6		
500	5.30	241.6	5.31	241.3	5.34	242.2	5.44	246.0	5.54	250.2	5.61	254.6	5.67	257.2	5.64	256.0	5.57	252.7	5.49	249.5	5.40	245.4	5.32	242.8	5.32	242.8	5.32	242.8	5.32	242.8	5.32	242.8	5.32	242.8	5.32	242.8	5.32	242.8	5.32	242.8		
400	6.84	230.7	6.86	230.5	6.90	231.2	7.01	234.6	7.14	238.5	7.24	242.9	7.31	245.5	7.28	244.4	7.18	241.3	7.08	238.3	6.96	234.3	6.87	232.0	6.87	232.0	6.87	232.0	6.87	232.0	6.87	232.0	6.87	232.0	6.87	232.0	6.87	232.0	6.87	232.0		
300	8.73	218.3	8.74	218.6	8.79	219.5	8.93	221.9	9.09	224.8	9.22	228.3	9.31	230.2	9.27	229.1	9.15	227.1	9.03	224.9	8.88	221.5	8.77	219.8	8.77	219.8	8.77	219.8	8.77	219.8	8.77	219.8	8.77	219.8	8.77	219.8	8.77	219.8	8.77	219.8		
250	9.88	213.7	9.90	214.4	9.95	215.9	10.1	217.9	10.3	220.1	10.4	222.7	10.5	223.7	10.5	222.4	10.3	221.3	10.2	219.8	10.0	216.7	9.93	215.4	9.93	215.4	9.93	215.4	9.93	215.4	9.93	215.4	9.93	215.4	9.93	215.4	9.93	215.4	9.93	215.4	9.93	215.4
200	11.3	212.2	11.3	213.6	11.4	216.0	11.5	218.6	11.7	220.5	11.9	222.5	12.0	222.9	11.9	221.6	11.8	220.0	11.6	218.1	11.5	215.3	11.3	214.3	11.3	214.3	11.3	214.3	11.3	214.3	11.3	214.3	11.3	214.3	11.3	214.3	11.3	214.3	11.3	214.3		
150	13.1	212.2	13.1	213.9	13.2	216.6	13.4	219.9	13.6	222.3	13.8	224.2	13.9	224.5	13.8	223.4	13.6	220.8	13.5	217.9	13.3	215.4	13.1	214.2	13.1	214.2	13.1	214.2	13.1	214.2	13.1	214.2	13.1	214.2	13.1	214.2	13.1	214.2	13.1	214.2		
100	15.6	209.3	15.6	211.7	15.7	214.6	16.0	218.4	16.2	220.9	16.4	222.7	16.5	223.3	16.4	222.8	16.3	219.9	16.1	216.4	15.8	212.9	15.7	211.4	15.7	211.4	15.7	211.4	15.7	211.4	15.7	211.4	15.7	211.4	15.7	211.4	15.7	211.4	15.7	211.4		
70	17.7	206.4	17.8	209.7	18.0	213.2	18.3	217.5	18.5	220.6	18.7	222.6	18.9	223.6	18.78	222.9	18.6	219.5	18.3	215.1	18.0	210.3	17.9	208.4	17.9	208.4	17.9	208.4	17.9	208.4	17.9	208.4	17.9	208.4	17.9	208.4	17.9	208.4	17.9	208.4		
50	19.8	204.2	19.9	208.4	20.1	212.4	20.4	217.4	20.7	221.1	20.9	223.6	21.1	224.5	21.0	223.3	20.7	219.2	20.4	213.7	20.1	207.6	19.9	205.6	19.9	205.6	19.9	205.6	19.9	205.6	19.9	205.6	19.9	205.6	19.9	205.6	19.9	205.6	19.9	205.6		
30	22.8	203.0	23.0	208.1	23.3	212.6	23.7	218.1	24.0	222.7	24.3	225.8	24.4	226.7	24.3	224.8	24.0	219.9	23.6	212.8	23.2	204.8	23.0	202.8	23.0	202.8	23.0	202.8	23.0	202.8	23.0	202.8	23.0	202.8	23.0	202.8	23.0	202.8	23.0	202.8		
20	25.2	204.8	25.5	210.4	25.8	214.9	26.3	220.5	26.7	226.0	27.0	230.2	27.2	231.1	27.0	228.5	26.6	222.1	26.1	213.6	25.6	204.0	25.4	202.9	25.4	202.9	25.4	202.9	25.4	202.9	25.4	202.9	25.4	202.9	25.4	202.9	25.4	202.9	25.4	202.9		
10	29.5	212.2	29.8	217.9	30.2	221.7	30.8	227.4	31.3	234.0	31.8	238.4	31.9	238.9	31.7	235.5	31.2	227.8	30.5	216.9	29.8	205.8	29.5	207.4	29.5	207.4	29.5	207.4	29.5	207.4	29.5	207.4	29.5	207.4	29.5	207.4	29.5	207.4	29.5	207.4		

Приложение 4. Примеры расчета атмосферных характеристик

В этом приложении рассмотрены примеры расчетов атмосферных характеристик по данным наземного GPS приемника методами, описанными выше.

В лабораторной работе 1 при расчетах полного электронного содержания (ПЭС) используем следующие значения для основных констант:

$$\begin{aligned} \text{скорость света } c &= 299792458 \text{ м/с} \\ \text{частота GPS } f_1 &= 1.57542 \times 10^9 \text{ Гц, длина радиоволны } \lambda_1 = 0.1902936728 \text{ м} \\ \text{частота GPS } f_2 &= 1.22760 \times 10^9 \text{ Гц, длина радиоволны } \lambda_2 = 0.2442102134 \text{ м} \end{aligned} \quad (\text{A4.1})$$

Рассмотрим пример сообщения SATVIS в п. A2.2.6. Позиция 4 в каждой строке после второй дает угол места ε спутника (см. рис. 2.3) с номером, обозначенном в позиции 1. Отбираем спутники, имеющие $\varepsilon > 60^\circ$. В указанном примере это GPS спутники с номерами 25, 27 и 13, а также ГЛОНАСС спутник 43 (эти спутники имеют номера больше 38). Спутники системы ГЛОНАСС работают на различных частотах, которые можно найти в Интернете. Спутники GPS имеют фиксированные частоты, приведенные выше. Поэтому для простоты проведем расчет только для отобранных GPS спутников.

Из примера сообщения SATVIS в п. A2.2.6 выписываем номера GPS спутников (позиция 1), значения их углов места ε (позиция 4) и азимутов (позиция 5) для $\varepsilon > 60^\circ$ и заносим их в табл. A4.1. Из примера сообщения RANGE в п. 2.2.4 для спутников с теми же номерами (позиция 1) выписываем и заносим в таблицу кодовые P_i (позиция 2) и фазовые L_i (позиция 3) псевдодальности для GPS частоты f_1 (первые строки сообщения для каждого номера спутника) и частоты f_2 (вторые строки сообщения). В сообщении RANGE значения фазовых псевдодальностей L_1 и L_2 даются со знаком минус, который игнорируем.

Таблица A4.1. Параметры спутников

Спутник	ε , град	Азимут	P_1 , м	L_1 , длины волн	P_2 , м	L_2 , длины волн
25	76.2	148.4	20482274.054	107635075.652798	20482271.473	83871479.376014
27	61.8	206.8	21235707.999	111594398.046450	21235706.669	86956666.881407
13	60.0	107.3	20730631.622	108940202.498639	20730628.905	84888459.504392

Пользуясь значениями кодовых P_i и фазовых L_i псевдодальностей спутников из табл. A4.1, по формулам (3.3), (3.5) и (3.6) рассчитываем фазовые, кодовые и кодово-фазовые значения наклонного ПЭС I , которые даны в таблице A4.2. Используя формулы (3.7) и (2.9), определяем эффективные вертикальные значения ПЭС I_V . Значения ПЭС в табл. A4.2 приведены в единицах $\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Таблица А4.2. Значения полного электронного содержания

Номер Спутника	Фазовые ПЭС		Кодово-фазовые ПЭС		Кодовые ПЭС	
	I , TECU	I_V , TECU	I , TECU	I_V , TECU	I , TECU	I_V , TECU
25	18.93	18.39	0.573	0.556	-24.57	-23.86
27	16.08	14.18	0.403	0.356	-12.66	-11.16
13	23.19	20.08	1.149	0.995	-25.86	-22.40

Наиболее точным методом определения ПЭС в настоящее время считается использование фазовых измерений псевдодальности [2]. Различия в значениях фазовых вертикальных значений ПЭС в табл. А4.2 для различных спутников могут быть связаны как с погрешностями измерений, так и с неоднородностями электронной концентрации в ионосфере при наблюдениях в разных азимутах (разные спутники имеют разные азимуты – см. табл. А4.1).

Кодово-фазовые ПЭС в табл. А4.2 существенно занижены относительно фазовых ПЭС. Наименьшую точность имеют кодовые ПЭС, которые часто оказываются отрицательными, что лишено физического смысла. Статистический анализ большого массива измерений ПЭС указанными методами [2] показал наличие систематических расхождений между фазовыми, кодово-фазовыми и кодовыми значениями ПЭС. Наименьшие дисперсии имеют фазовые измерения ПЭС.