

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное агентство по образованию

ГОУ ВПО

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

(РГГМУ)

Допущена к защите

Кафедра экспериментальной

Зав. кафедрой д. ф.-м. наук, проф.

физики атмосферы

А.Д. Кузнецов

**ВЫПУСКНАЯ
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА**

**Система дистанционного зондирования
водяного пара сетью наземных
навигационных приемников**

Выполнил Нгуен Тонг Там

гр. МБ-457

Руководитель канд. ф.-м. наук, доцент

В.В. Чукин

Содержание

	Стр.
Сокращения	4
Введение	6
1 Глобальные навигационные спутниковые системы – основные элементы	8
1.1 Назначение, общая характеристика и состав ГНСС	8
1.2 Космический сегмент ГНСС	10
1.2.1 Орбитальная группировка	10
1.2.2 Навигационный космический аппарат	11
1.2.3 Структура навигационных радиосигналов	14
1.3 Наземный сегмент управления	21
1.4 Принцип навигационных определений. Сегмент потребителей	24
1.5 Развитие ГНСС	28
2 Наземные сети дифференциальной коррекции навигационных информации	29
2.1 Дифференциальный режим определения	29
2.2 Широкозонные ДПС	31
2.3 Региональные ДПС	34
2.4 Локальные ДПС	35
3 Источники ошибок измерений	38
3.1 Инструментальные ошибки	39
3.1.1 Эффект многолучевости	39
3.1.2 Ошибки эфемеридного обеспечения	40
3.1.3 Ошибки частотно-временного обеспечения	40
3.2 Астрономические факторы	42
3.3 Влияние вращения Земли	43
4 Влияние атмосферы на распространение радиосигналов	45
4.1 Влияние ионосферы на распространение радиосигналов	45
4.2 Влияние тропосферы на распространение радиосигналов	48
5 Система дистанционного зондирования водяного пара	52
5.1 Теоретические основы	52

5.1.1	Зависимость показателя преломления от параметров атмосферы	53
5.1.2	Определение ионосферной задержки радиосигналов	56
5.1.3	Определение тропосферной задержки радиосигналов	57
5.1.4	Отображающие функции	57
5.1.5	Вертикальная гидростатическая задержка радиосигналов	59
5.1.6	Вертикальная задержка радиосигналов во влажном воздухе	60
5.2	Основные функции модели интегрального количества водяного пара в атмосфере	61
5.2.1	Определение координат спутников и приемников	61
5.2.2	Определение средней взвешенной температуры	66
5.2.3	Получение вертикальной задержки во влажном воздухе с помощью данных ГНСС	68
5.2.4	Получение интегрального количества водяного пара с помощью вертикальной влажной задержки радиосигналов	69
5.3	Оценка научной и практической значимости метода	70
5.4	Эксплуатация сети навигационных приемников - ГНСС - станций	77
	Заключение	81
	Список использованных источников	83

Сокращения

ГНСС	– Глобальная навигационная спутниковая система
СНС	– Спутниковая навигационная система
НАП	– Навигационная аппаратура потребителей
БЭВЧ	– Бортовой эталон времени и частоты
НКА	– Навигационная космическая аппаратура
АСЧ	– Атомный стандарт частоты
ПД	– Псевдодальность
ПС	– Псевдоскорость
ЭИ	– Эфемеридная информация
ШВ	– Шкала времени
СРНС	– Спутниковая радионавигационная система
ГЛОНАСС	– Глобальная навигационная спутниковая система (Россия)
GPS	– Глобальная система позиционирования (США)
БНП	– Бортовой навигационный передатчик
БХ	– Бортовой хронизатор
БУК	– Бортовой управляющий комплекс
СО	– Системы ориентации и стабилизации
СЭП	– Системы коррекции и электропитания
СТР	– Системы терморегулирования
ЭВМ	– Электронная вычислительные машина
НКУ	– Наземный комплекс управления
ЦУС	– Центр управления системой
ЦС	– Центральный синхронизатор
КСС	– Командная станция слежения
КС	– Контрольная станция
СКФ	– Система контроля фаз
КОС	– Квантово-оптическая станция
АКП	– Аппаратура контроля поля

СЕВ	– Служба единого времени
UTC	– Шкала универсального координированного времени
НИСЗ	– Навигационный искусственный спутник Земли
КВЦ	– Координационно-вычислительный центр
СЗСИ	– Станция закладки служебной информации
ГСК	– Геоцентрическая система координат
ИКАО	– Международная организация гражданской авиации
НГП	– Навигационно-геодезический приемник
ДР	– Дифференциальный режим
ДПС	– Дифференциальная подсистема
ШДПС	– Широкозонная дифференциальная подсистема
WAAS	– Глобальная американская система распространения дифференциальных поправок
EGNOS	– Европейская геостационарная служба навигационного покрытия
MSAS	– Многофункциональная система дополнения спутникового базирования
ПМ	– Пункты мониторинга
ЦГМ	– Центр глобального мониторинга
РДПС	– Региональная дифференциальная подсистема
ЛДПС	– Локальная дифференциальная подсистема
ШКС	– Широкозонная контрольная станция
ШГС	– Широкозонная главная станция
НСПД	– Наземная станция передачи данных
ПЗ-90.02	– Параметр Земли 1990г.
WGS-84	– Всемирная система координат 1984г.

Введение

Спутниковые навигационные системы (СНС) ГЛОНАСС и GPS со своими наземными и космическими дополнениями все активнее вторгаются в различные сферы человеческой деятельности.

Системы продемонстрировали высокие точностные характеристики определения координат, скорости и времени для воздушных, космических, морских и наземных подвижных средств. Они в состоянии обеспечивают существенное повышение безопасности движения транспортных средств, наиболее экономичное решение задач картографии и геодезии, землеустройства, освоения удаленных, слабо изученных территорий и акваторий морей и океанов, обеспечения регулярности функционирования буровых и добывающих платформ на шельфе и в открытом море, горных, строительных и сельскохозяйственных работ, быстрого поиска и спасения терпящих бедствие, точной синхронизации разнесенных в пространстве объектов [1].

Известно, что в состав атмосферных газов входят в основном азот, кислород, аргон, и водяной пар. Эти газы оказывают влияние на распространение радиосигналов в атмосфере. Задержки радиосигналов в тропосфере появляются в результате уменьшения фазовой скорости радиоволн за счет эффекта поляризации молекул азота, кислорода, углекислого газа, водяного пара [2]. Поэтому по физическим характеристикам радиосигналов, полученных со спутников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) можно судить о состоянии атмосферы, а в частности можно определять интегральное количество водяного пара и также можно восстановить вертикальный профиль водяного пара в атмосфере.

В данной работе представлена система зондирования водного пара сетью наземных навигационных приемников. Работа рассматривает в первую очередь элементарные понятия о навигационных спутниковых системах, о дифференциальной коррекции. А в большей степени работа направлена на изучение влияния атмосферных параметров на распространение радиоволн, теоретических основ модели тропосферной задержки радиосигналов. Работа также посвящена практическим применениям нового метода зондирования водяного пара в метеорологии.

Основной целью работы являются разработка программного средства для расчета тропосферной задержки в атмосфере и оценка возможности зондирования водяного пара сетью наземных навигационных приемников.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- 1) ознакомиться с глобальной навигационной спутниковой системой GPS и ГЛОНАСС, их принципом работы;
- 2) изучить физику распространения радиоволн в атмосфере;
- 3) изучить движение спутников на орбите, чтобы решить задачу высоко-точного определения положения спутников;
- 4) изучить структуру навигационных сообщений ГНСС для составления алгоритмов определения координат спутников и также приемников;
- 5) определить интегральное количество водяного пара в атмосфере с помощью навигационных приемников;
- 6) оценить научную и практическую значимости нового метода, сопоставляя с радиозондированием.

1 Глобальные навигационные спутниковые системы – основные элементы

1.1 Назначение, общая характеристика и состав ГНСС

Основное назначение ГНСС - глобальная оперативная навигация приземных подвижных объектов: наземных (сухопутных, морских, воздушных) и низкоорбитальных космических. Термин "глобальная оперативная навигация" означает, что подвижной объект, оснащенный навигационной аппаратурой потребителей (НАП), может в любом месте приземного пространства в любой момент времени определить (уточнить) параметры своего движения - три координаты и три составляющие вектора скорости.

В ГНСС применяются навигационные космические аппараты (НКА) на круговых геоцентрических орбитах с высотой около 20000 км над поверхностью Земли. Благодаря использованию в бортовых эталонов времени и частоты (БЭВЧ) НКА атомных стандартов частоты (АСЧ) в системе обеспечивается взаимная синхронизация навигационных радиосигналов, излучаемых орбитальной группировкой НКА. В НАП на подвижном объекте в сеансе навигации принимаются радиосигналы не менее чем от четырех радиовидимых НКА и используются для измерения не менее, чем четырех соответствующих псевдодальностей (ПД) и радиальных псевдоскоростей (ПС). Результаты измерений и эфемеридная информация (ЭИ), принятая от каждого НКА, позволяют определить (уточнить) три координаты и три составляющие вектора скорости подвижного объекта и определить смещение шкалы времени (ШВ) объекта относительно ШВ системы. В СРНС число потребителей не ограничивается, поскольку НАП не передает радиосигналы на НКА, а только принимает их от НКА (пассивная навигация).

Радионавигационное поле СРНС ГЛОНАСС наряду с основной функцией (глобальная оперативная навигация приземных подвижных объектов) позволяет проводить:

а) локальную высокоточную навигацию наземных подвижных объектов (сухопутных, морских, воздушных) на основе дифференциальных методов навигации с применением стационарных наземных корректирующих станций и НКА;

б) высокоточную взаимную геодезическую "привязку" удаленных наземных объектов;

в) взаимную синхронизацию стандартов частоты и времени на удаленных наземных объектах;

г) неоперативную автономную навигацию низко- и среднеорбитальных космических объектов;

д) определение ориентации объекта на основе радиоинтерферометрических измерений на объекте с помощью навигационных радиосигналов, принимаемых разнесенными антеннами.

ГНСС состоит из космического сегмента, сегмента управления и сегмента потребителей. На рисунке 1.1 изображены три сегмента ГНСС GPS

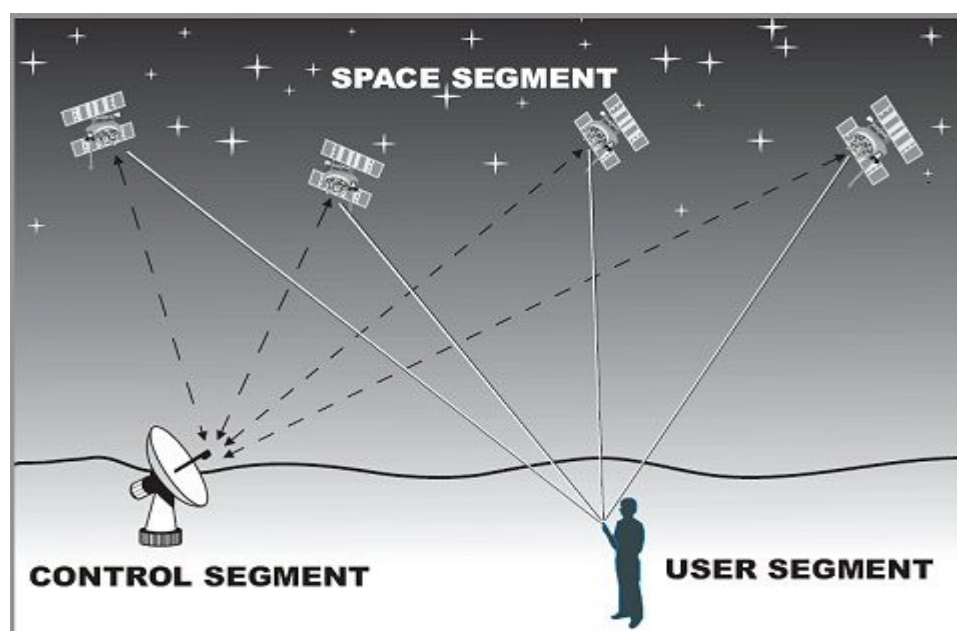


Рисунок 1.1 — Сегменты ГНСС GPS

1.2 Космический сегмент ГНСС [1]

1.2.1 Орбитальная группировка

Полная орбитальная группировка (ОГ) в ГЛОНАСС содержит 24 штатных НКА на круговых орбитах с наклоном $I = 64.8^\circ$ в трех орбитальных плоскостях по восемь НКА в каждой. Долготы восходящих узлов трех орбитальных плоскостей различаются номинально на 120° . Номинальный период обращения НКА равен $T = 11 \text{ ч } 15 \text{ мин } 44 \text{ с}$, и, соответственно, номинальная высота круговой орбиты составляет 19100 км над поверхностью Земли. В каждой орбитальной плоскости восемь НКА разнесены по аргументу широты номинально через 45° , и аргументы широты восьми НКА в трех орбитальных плоскостях сдвинуты на $\pm 15^\circ$. За время эксплуатации НКА на орбите (до пяти лет) реальные положения НКА в ОГ могут отличаться от номинальных не более чем на $\pm 5^\circ$.

Космический сегмент ГНСС GPS образован орбитальной группировкой, номинально состоящей из 31 основных НКА и 3-х резервных НКА. НКА находятся на 6 круговых орбитах высотой примерно 20000 км, наклоном 55° и равномерно разнесенных по долготе через 60° .

Орбитальная группировка НКА с несинхронными круговыми орбитами ($T = 11 \text{ ч } 15 \text{ мин } 44 \text{ с}$) в системе ГЛОНАСС более стабильна по сравнению с ОГ НКА с синхронными круговыми орбитами ($T = 11 \text{ ч } 58 \text{ мин } 00 \text{ с}$) в системе GPS. Данное обстоятельство можно объяснить следующим образом. Синхронная орбита НКА имеет двухвитковый след на поверхности Земли, и возмущения орбит отдельных НКА, обусловленные нецентральностью поля тяготения Земли, будут заметно отличаться. Несинхронная круговая орбита имеет многовитковый след на поверхности Земли, и возмущения орбит для всех НКА в ОГ будут практически одинаковы. Орбитальное построение ГЛОНАСС и GPS можно представить как на рисунке 1.2.

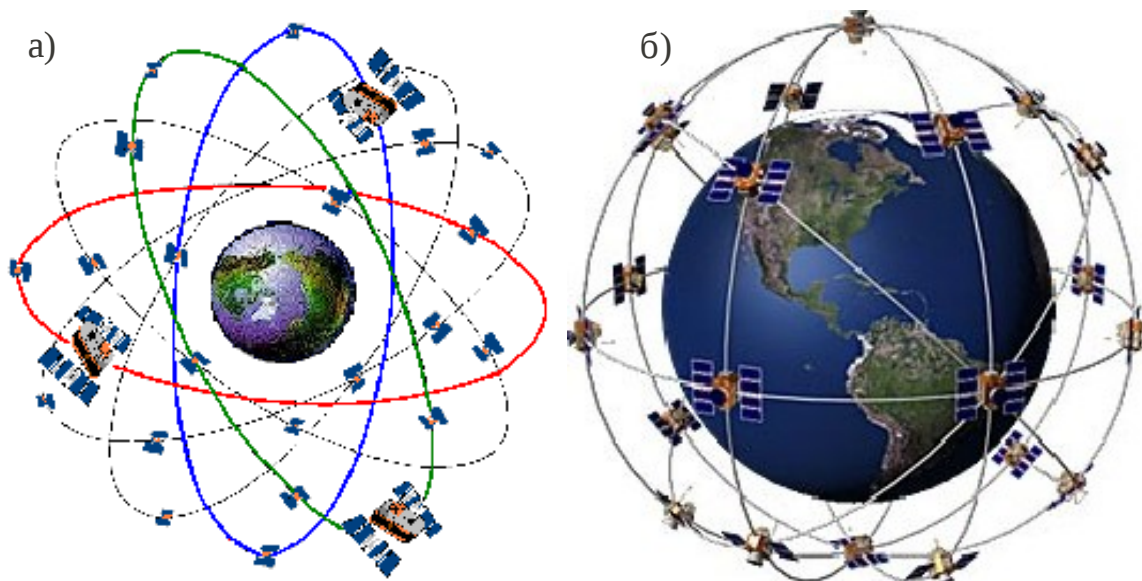


Рисунок 1.2 — Орбитальная группировка ГНСС

а) — система GPS;

б) — система ГЛОНАСС.

1.2.2 Навигационный космический аппарат

Общий вид НКА представлен на рисунке 1.3. Основу НКА ГЛОНАСС составляет цилиндрический термokonтейнер диаметром 1.35 м, в котором размещаются служебные системы и специальная аппаратура с выдвинутой (раскрытой) штангой магнитометра его длина составляет 7.84 м. На "нижнем" (в положении штатной ориентации) днище НКА смонтирована платформа с антенно-фидерными устройствами и панелью угловых отражателей; на "верхнем" - топливные баки и штанга магнитометра. На боковой поверхности гермоконтeйнера закреплены два привода системы одноосной ориентации солнечных батарей, два раскрывающихся на орбите радиатора системы терморегулирования, два блока двигателей и датчики ориентации. Питание всех подсистем производится от солнечных батарей, ширина которых в раскрытом виде составляет 7.23 м. Общая масса составляет 1415 (1487) кг. При этом масса конструкции равна всего 237 кг.

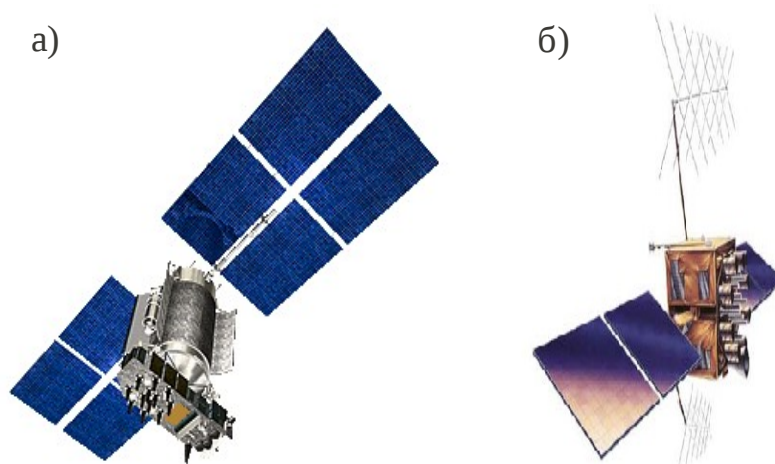


Рисунок 1.3 — Космическая аппаратура ГНСС

а) — КА «Глонасс-М»;

б) — КА GPS «Block IIR-M».

В число систем НКА входят: бортовые навигационный передатчик (БНП), хронизатор (БХ), управляющий комплекс (БУК), средства заправки и обеспечения параметров среды в термokonтейнере; системы ориентации и стабилизации (СО), коррекции, электропитания (СЭП), терморегулирования (СТР); элементы конструкции и кабельная сеть.

В состав бортового оборудования НКА GPS входят следующие подсистемы: синтезатор частот, блоки формирования и передатчики навигационных сигналов, средства синхронизации и временного обеспечения или бортовые "часы", бортовое вычислительное устройство в составе основной и двух резервных ЭВМ, подсистемы ориентации в процессе наведения и на орбите, телеметрии, приема команд и ретрансляции сигналов наземного комплекса управления, терморегулирования и электропитания. Антенная система в линии передачи данных использует конические и спирально-конические антенны. Для передачи навигационных сигналов используются фазированные антенные решетки из спиральных излучающих элементов.

На НКА GPS имеются также двигатели для коррекции орбиты и двигатели системы ориентации. Ориентация в пространстве осуществляется с

помощью системы специальных датчиков. Подсистема телеметрии включает радиолинии передачи данных о состоянии бортовой аппаратуры в сегмент управления. По этим же линиям с земли поступают поправки к эфемеридам и показаниям бортовых "часов". Для точного определения орбит НКА используется запросный метод и на НКА аппаратура ретрансляции запросных сигналов с земли. По соответствующим измерениям задержки этих сигналов осуществляется точное определение параметров орбит и параметров движения НКА. Некоторые системные характеристики ГНСС приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Системные характеристики ГНСС [3]

Параметр, способ	ГЛОНАСС	GPS
Число НИСЗ (резерв)	24(3)	24(3)
Число орбитальных плоскостей	3 (через 120°)	6 (через 60°)
Число НИСЗ в орбитальной плоскости	8 (через 45°)	4 (через 90°)
Тип орбит	круговая	круговая
Высота орбит, км	19100	20145
Наклонение орбит, град	64.8±0.3	55 (63)
Драконический период обращения НИСЗ	11ч 15 мин 44 с±5 с	11ч 57 мин 58.3 с
Способ разделения сигналов НИСЗ	частотный	кодовый
Несущие частоты навигационных радиосигналов, МГц: L1, L2	1602.5627-1615.5 1246.4375-1256.5	1575.42-1227.60
Период повторения PRN кода (дальномерного кода или его сегмента)	1 мс	1 мс (С/А-код) 7 суток (Р-код)
Тактовая частота PRN, МГц	0.511	1.023 (С/А-код) 10.23 (Р.У-код)
Скорость передачи цифровой	50	50

информации (соответственно СИ- и D- код), бит/с.		
Длительность суперкадра, мин	2.5	12.5
Число кадров в суперкадре	5	25
Число строк в кадре	15	5
Система отсчетов времени	UTC(SU)	UTC(US)
Система отсчета пространственных координат	ПЗ-90	WGS-84
Тип эфемерид	Геоцентрические координаты и их производные (скорости и ускорения)	Модифицированные кеплеровы элементы

1.2.3 Структура навигационных радиосигналов

Навигационные радиосигналы ГЛОНАСС

В системе ГЛОНАСС каждый штатный НКА в ОГ постоянно излучает шумоподобные непрерывные навигационные радиосигналы в двух диапазонах частот 1600 МГц (L1) и 1250 МГц (L2). В НАП навигационные измерения в двух диапазонах частот позволяют исключить ионосферные погрешности измерений.

Каждый НКА имеет цезиевый АСЧ, используемый для формирования бортовой шкалы времени (БШВ) и навигационных радиосигналов 1600 МГц и 1250 МГц.

Шумоподобные навигационные радиосигналы в ОГ НКА различаются несущими частотами. Поскольку для взаимноантиподных НКА в орбитальных плоскостях можно применять одинаковые несущие частоты, то для 24 штатных НКА минимально необходимое число несущих частот в каждом диапазоне частот равно 12. Данное утверждение достаточно очевидно, если иметь в виду наземных потребителей (сухопутных, морских, воздушных), поскольку в зоне радиовидимости наземного потребителя не могут одновременно находиться взаимноантиподные НКА. Космический

потребитель может одновременно "видеть" взаимно-антиподные НКА. Однако имеются два благоприятных обстоятельства:

а) из двух взаимноантиподных НКА хотя бы один будет находиться ниже местного горизонта по отношению к космическому потребителю. Практически невозможно применить на космическом объекте одну широконаправленную антенну, способную принимать навигационные радиосигналы от всех "видимых" НКА выше и ниже местного горизонта. Поэтому в НАП на космическом объекте применяют: либо одну широконаправленную антенну для приема навигационных радиосигналов от НКА, находящихся выше местного горизонта, либо несколько антенн и несколько приемников для приема навигационных радиосигналов от НКА, находящихся выше и ниже местного горизонта. В обоих вариантах НАП на космическом объекте будет осуществлять эффективную пространственную селекцию навигационных радиосигналов от взаимноантиподных НКА.

б) в НАП в сеансе навигации осуществляется поиск несущей частоты каждого принимаемого навигационного радиосигнала в пределах узкой полосы (около 1 кГц) около прогнозируемого значения с учетом доплеровского сдвига несущей частоты. Доплеровский сдвиг может иметь максимальные значения ± 5 кГц в НАП на наземных объектах и ± 40 кГц в НАП на низкоорбитальных космических объектах. Следовательно, в НАП на космическом объекте осуществляется эффективная доплеровская селекция навигационных радиосигналов от радиовидимых НКА.

Таким образом, навигационные радиосигналы взаимноантиподных НКА с одинаковыми несущими частотами будут надежно разделены в НАП на космическом объекте за счет пространственной и доплеровской селекции.

Широкополосный навигационный радиосигнал 1600 МГц образуется посредством манипуляции фазы несущего колебания на 180° периодической двоичной последовательностью ПСГО с тактовой частотой $F_2 = 5.11$ МГц.

Путем инвертирования ПСП2 передаются двоичные символы ЦИ длительностью 20 мс.

Навигационный L2 радиосигнал 1250 МГц, излучаемый НКА первой модификации, однокомпонентный широкополосный шумоподобный радиосигнал, образуемый посредством манипуляции фазы несущего колебания на 180° периодической двоичной ПСП2 ($F_2 = 5.11$ МГц) без инвертирования, т.е. без передачи ЦИ. Навигационный L2 радиосигнал 1250 МГц, излучаемый НКА второй модификации, содержит два одинаковых по мощности шумоподобных радиосигнала 1250 МГц в квадратуре:

- 1) узкополосный навигационный радиосигнал 1250 МГц с ПСП1 ($F_1 = 0.511$ МГц, $T_1 = 1$ мс);
- 2) широкополосный навигационный радиосигнал 1250 МГц с ПСП2 ($F_2 = 5.11$ МГц) без ЦИ.

Навигационное сообщение ГЛОНАСС

Информация навигационного сообщения ГЛОНАСС формируется в виде непрерывно следующих строк длительностью 2 с. В первой части каждой строки в течение 1.7 с передается информация навигационного сообщения. Во второй части каждой строки в течение 0.3 с передаётся двоичный код метки времени [3]. Кадр навигационного сообщения НИСЗ ГЛОНАСС представлен в таблице 1.2. Допустимый временной интервал использования – ± 15 минут.

Таблица 1.2 — Кадр навигационного сообщения ГЛОНАСС

Слово	Диапазон измерений	Размерность	Комментарии
t_k	0, ..., 23 0, ..., 59 0, ..., 30	ч мин с	время излучения сигнала в пределах текущего дня
t_b	15, ... , 1425	мин	эфемеридное время
$Y_n(t_b)$	± 30		коррекция частоты
$X_n(t_b)$	$\pm 2^{-9}$	с	коррекция часов НИСЗ

$x(t_b)$, $y(t_b)$, $Z(t_b)$	$+ 2.7 \cdot 10^4$	км	координаты НИСЗ в ПЗ-90
$V_x(t_b)$, $V_y(t_b)$, $V_z(t_b)$	± 4.3	км/с	вектор скорости НИСЗ
$a_x(t_b)$, $a_y(t_b)$, $a_z(t_b)$	$\pm 6.2 \cdot 10^{-9}$	км/с	ускорения НИСЗ, вызванные Солнцем и Луной
E_n	$0, \dots, 31$	день	возраст эфемеридной информации
B_n	$0, 1$		индикатор «здоровья» НИСЗ

Навигационные радиосигналы GPS

Передачики НКА GPS излучают два непрерывных сигнала на частотах L1 и L2. Несущая частота L1 состоит из двух компонентов, которые находятся по фазе в квадратуре друг к другу (сдвинуты на $\pi/2$) для удобства их разделения. Первая - модулируются двумя двоичными последовательностями (дальномерный псевдослучайный P-код и информационная последовательность линии передачи данных), складываемыми по модулю 2. Вторая - также модулируется двумя двоичными последовательностями (дальномерный псевдослучайный C/A-код и информационная последовательность), складываемыми по модулю 2. Обе информационные последовательности содержат информацию об эфемеридах НКА, системном времени, поведении "часов" НКА, статусе сообщения и др.

Несущая частота L2 имеет один компонент и модулируется двумя двоичными последовательностями (как правило, дальномерный псевдослучайный P-код или C/A-код и информационная последовательность линии передачи данных), складываемыми по модулю 2. Здесь также предусмотрен режим использования только P/QO-кода, когда

информационная последовательность вообще не передается. Во всех случаях скорость передачи данных информационных последовательностей 50 бит/с. Используется фазовая манипуляция несущих частот (bi-phase shift key, BPSK).

Основным навигационным дальномерным псевдослучайным кодом согласно является точный P-код. При включении режима A/S (Antispoofing) вместо этого кода будет использоваться закрытый код P(Y), введенный впервые для НКА Block-II.

В распоряжении мирового сообщества находится открытый псевдослучайный код C/A (Clear (Coarse)/Acquisition), иногда переводимый как "легкий (грубый) захват", который сначала использовался для первого вхождения в режим слежения с последующим переходом к использованию P - кода. С целью преднамеренного снижения точности определения координат до уровня 100 м (2 СРО) для C/A-кода введен специальный режим селективного доступа (Selective Availability, S/A, СД), который определяется ICD-GPS-203.

Все НКА используют одни и те же частоты, но каждый свои коды, поскольку свойства рассмотренных кодов таковы, что они позволяют надежно разделять сигналы различных НКА между собой, т.е. здесь используется кодовый принцип разделения сигналов.

P-код представляет собой двоичную псевдослучайную последовательность (ПСП) длиной в 7 суток, передаваемую со скоростью 10.23 Мбит/с (тактовая частота 10.23 МГц). Закрытый P(Y)-код, длительность которого по данным [8] составляет 267 суток, формируется в соответствии со специальными закрытыми документами (ICD-GPS-203/ 224/ 225).

C/A-код (код Голда) представляет собой ПСП длиной в 1 мкс с тактовой частотой 1.023 МГц.

Начиная с НКА Block-II, аномальные (нестандартные) коды C/A и P(Y) получили наименование NSC и NSY. Эти коды предназначены для защиты пользователя от отказов оборудования.

Таким образом, сигналы GPS занимают в L-диапазоне две полосы шириной по 20.46 МГц, в центре которых находятся частоты L1 и L2. Эти частоты когерентно порождены на НКА одним генератором и на земле частота этого генератора должна иметь величину 10.23 МГц (тактовая частота P-кода). Учитывая появление релятивистского эффекта, величина частоты задающего генератора на орбите должна быть смещена на $-4.5674 \cdot 10^{-3}$ Гц и равна 10.22999999543 МГц. Номинальные значения частот будут 1575.42 МГц и 1227.60 МГц для диапазонов L1 и L2 соответственно.

При этом корреляционные потери мощности сигнала составят: вследствие несовершенства модуляции 0.6 дБ; вследствие несовершенства предварительной фильтрации в полосе 20.46 МГц – 0.4 дБ.

Фазовые шумы несущей позволяют при односторонней полосе контура фазовой автоподстройки в 10 Гц реализовать точность слежения за фазой порядка 0.1 радиан (СКО).

Паразитные сигналы в полосе 20.46 МГц должны быть по крайней мере на 40 дБ ниже уровня немодулированных несущих в обоих диапазонах.

Эффективная неопределенность групповой задержки сигнала в НКА (между генератором частоты и фазовым центром передающей антенны) не превышает 3.0 нс (2 СКО). Групповая дифференциальная задержка между сигналами L1 и L2 кода P(Y) может иметь смещение, не превышающее 15 нс, и случайную составляющую, уровень которой не превышает 3.0 нс (2 СКО).

Все передаваемые одним НКА сигналы порождены одним стандартом частоты и когерентно связаны между собой. Это относится и к несущей частоте, и к кодам, причем для цифровых сигналов нормы задает P-код. В информационной последовательности различие в переходах между состояниями не превышает 10 нс (2 СКО).

Излучаемые передатчиками НКА сигналы имеют правостороннюю круговую поляризацию. В диапазоне курсовых углов $\pm 14.3^\circ$ эллиптичность сигнала L1 должна быть не хуже 1.2 дБ для НКА Block-II/ПА и не хуже 1.8 дБ для Block-IIR. Эллиптичность сигнала L2 должна быть не хуже 3.2 дБ для НКА Block-II/ПА и не хуже 2.2 дБ для Block-IIR в том же диапазоне углов.

Навигационное сообщение СРНС GPS

В отличие от СРНС ГЛОНАСС эфемеридная информация навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ) GPS даётся в виде модифицированных кеплеровых элементов. Допустимый временной интервал использования – 4 часа. Кадр навигационного сообщения содержит [4]:

- $A_0, A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, B_2, B_3$ – параметры ионосферы;
- a_0, a_1, t, w – параметры для вычисления времени в UTC;
- информацию о стабильности генератора частоты;
- порядковый номер НИСЗ;
- дату до 0.0 с;
- a_0, a_1, a_2 – параметры для определения поправки перехода от бортовой шкалы к системной;
- номер выпуска эфемеридных данных;
- C_{rs} – коррекцию радиус-вектора НИСЗ (м);
- Δn – изменение среднего движения (рад);
- M_0 – среднюю аномалию (рад);
- C_{us} – коррекцию аргумента широты (рад);
- e – эксцентриситет орбиты;
- C_{us} – коррекцию аргумента широты (рад);
- $a^{1/2}$ – корень из большой полуоси орбиты;
- t_{oe} – опорное время (с);
- C_{ic} – коррекцию угла наклона орбиты (рад);

- Ω_0 – долготу восходящего узла в 0^h UTC в воскресенье каждой текущей недели;
- C_{is} - коррекцию угла наклона орбиты (рад);
- i_0 – наклон орбиты к плоскости экватора (рад);
- C_{rc} – коррекцию радиус-вектора НИСЗ (м);
- ω - расстояние перицентра от узла (рад);
- $\dot{\Omega}$ – прецессию восходящего узла (рад/с);
- \dot{i} – скорость изменения угла наклона орбиты к плоскости экватора (рад/с);
- код по каналу L2;
- номер GPS недели;
- L2P – флаг данных;
- Sv точность (м);
- Sv «здоровье»;
- TGD (с);
- IODC – выпуск данных бортового генератора;
- передачу временного сообщения (секунды GPS недели).

1.3 Наземный сегмент управления

Г Л О Н А С С

Наземный комплекс управления (НКУ) орбитальной группировкой НКА ГЛОНАСС выполняет четыре группы задач:

- а) эфемеридное и частотно-временное обеспечение НКА;
- б) мониторинг радионавигационного поля;
- в) радиотелеметрический мониторинг НКА;
- г) командное и программное радиоуправление функционированием НКА.

НКУ содержит следующие взаимосвязанные стационарные элементы: центр управления системой (ЦУС); центральный синхронизатор (ЦС); командную станцию слежения (КСС); контрольные станции (КС); систему контроля фаз (СКФ); квантово-оптические станции (КОС); аппаратуру контроля поля (АКП).

Указанные элементы размещены на территории России вблизи следующих географических пунктов (городов): Санкт-Петербург (КСС-9); Краснознаменск Московской области (ЦУС); Щелково Московской области (КС, СКФ, ЦС, АКП); Воркута (КСС-18); Енисейск (КСС-4); Улан-Удэ (КСС - 13); Якутск (КСС-17); Комсомольск-на-Амуре (КОС, КСС-20, АКП); Петропавловск-Камчатский (КСС-б).

НКУ выполняет следующие функции:

- проведение траекторных измерений для определения, прогнозирования и непрерывного уточнения параметров орбит всех спутников;

- временные измерения для определения расхождения бортовых шкал времени всех НКА с системной шкалой времени системы, синхронизация БШВ каждого НКА с временной шкалой ЦС и службы единого времени (СЕВ) путем фазирования и коррекции БШВ;

- формирование массива служебной информации (навигационных сообщений), содержащего спрогнозированные эфемериды, альманах и поправки к БШВ каждого НКА и другие данные, необходимые для формирования навигационных кадров;

- передача (закладка) массива служебной информации в память бортовой ЭВМ каждого НКА и контроль за его прохождением;

- контроль по телеметрическим каналам за работой бортовых систем НКА и диагностика их состояния;

- контроль информации в навигационных сообщениях НКА, прием сигнала вызова НКУ;
- управление полетом спутников и работой их бортовых систем путем выдачи команд управления и передачи на борт прохождения этих данных;
- контроль характеристик навигационного поля;
- определения сдвига фазы дальномерного навигационного сигнала НКА по отношению к фазе сигнала ЦС;
- планирование работы всех технических средств НКУ, автоматизированная обработка и передача данных между элементами НКУ.

GPS

Сегмент управления GPS состоит из сети наземных станций слежения, расположенных по всему миру. Сеть включает главную (ведущую) станцию (ГС), контрольные станции (КС) или станции слежения (СС) и земные станции ввода данных на НКА (три). Главная станция контроля и управления находится на авиабазе Фалкон (Шривер) ВВС США в районе г. Колорадо Спрингс, штат Колорадо. По некоторым данным контрольные станции первоначально были расположены на Гавайях, на авиабазе Элмендорф (Аляска), на о. Гуам и на авиабазе Ванден-берг в Калифорнии. В настоящее время КС размещены на атолле Диего-Гарсиа (архипелаг Чагос в Индийском океане), на о. Вознесения (в Атлантическом океане), на Гавайях и атолле Кваджалейн (в Тихом океане); одна КС совмещена с ГС [11]. Как видно, КС расположены сравнительно равномерно по Земному шару вблизи экватора, что создает благоприятные условия для наблюдений НКА. Эти станции принимают сигналы спутников GPS и осуществляют специальные прецизионные измерения дальности до НКА.

Главная станция осуществляет сбор измерений от всех КС. Затем все измерения обрабатываются. По ним осуществляются точные расчеты

параметров орбит, ионосферной модели и корректирующих поправок для бортовых часов, которые с главной станции через земные станции связи (атолл Диего-Гарсиа, о. Вознесения, атолл Кваджалейн) совместно с данными обработки метеорологической информации, позволяющей уточнить параметры модели тропосферы, передаются на борт каждого НКА. Производится также мониторинг состояния НКА и управление их работой. Основу ГС составляет центр управления с вычислительным комплексом (координационно-вычислительный центр, КВЦ) и средства передачи данных на земную станцию связи с НКА (станция закладки служебной информации, СЗСИ). Канал "Земля - НКА" использует частоту 2227.5 МГц; канал "НКА - Земля" использует частоту 1783.74 МГц.

Сегмент управления устанавливает шкалу времени GPS, которая привязана к шкале времени UTC (шкала Универсального координированного времени), поддерживаемой Военно-морской обсерваторией США. Начало отсчета времени установлено в полночь с 05.01.1980 на 06.01.1980. Самой крупной единицей времени GPS является одна неделя, которая, как определено, состоит из 604800 с. Время GPS может отличаться от времени UTC, поскольку первое является непрерывным, а второе может корректироваться на целое число секунд. Между ними имеется также некоторое постоянно растущее расхождение. Поэтому ГС контролирует шкалу времени GPS с тем, чтобы она не уходила от UTC больше, чем на 1 мкс.

1.4 Принцип навигационных определений. Сегмент потребителей

П р и н ц и п н а в и г а ц и о н н ы х о п р е д е л е н и й

Координаты потребителя в системе определяются посредством их расчета по псевдодальностям (ПД) до НКА. Псевдодальности

рассчитываются по временным задержкам сигнала по трассе "i-й НКА - потребитель" и известной скорости распространения радиоволн:

$$D_i = cT_i \quad (1.1)$$

где D_i – псевдодальность, м;
 c – скорость света, м/с;
 T_i – время, с.

Времени измеряются в результате сопоставления принятых псевдослучайных кодов и генерируемых в приемнике копий этих кодов с учетом априори известных моментов излучений сигналов НКА. При этом могут использоваться также соответствующие измерения разностей фаз несущих частот.

Для определения координат проводится компенсация эффекта вращения Земли, тропосферных и ионосферных ошибок. Влияние ионосферы и тропосферы будем рассматривать в следующей главе. Тропосферная поправка может, в частности, рассчитываться посредством соотношения:

$$\Delta D_{Tr,i} = 14.8 \cos E_i \quad (1.2)$$

где $\Delta D_{Tr,i}$ – тропосферная поправка, м;
 E_i – угол возвышения i-го НКА, градус.

Применение такой поправки позволяет примерно на порядок уменьшить остаточную ошибку.

В двухчастотной аппаратуре компенсация ошибок ПД, обусловленных особенностями распространения сигналов в ионосфере, проводится посредством учета того факта, что ошибки определения ПД в этом случае обратно пропорциональны квадрату несущей частоты:

$$\Delta D = \frac{k}{f^2} \quad (1.3)$$

где ΔD – ошибка определения ПД за счет ионосферы, м;
 k – некий коэффициент пропорциональности, не зависящий от частоты;
 f – частота, Гц.

Для получения наилучшей оценки ПД используются измерения на двух частотах:

$$D = \frac{(D_1 - \gamma D_2)}{(1 - \gamma)} \gamma = \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \quad (1.4)$$

где D – псевдодальность, м;
 D_1, D_2 – псевдодальности, определенные по сигналам на частотах L1 и L2 соответственно, м;
 γ – некий коэффициент;
 f_1, f_2 – частоты соответственно сигналов диапазонов L1 и L2, Гц.

Необходимо при этом отметить, что после такой операции примерно втрое возрастает уровень случайных ошибок, обусловленных, например, шумами и помехами.

Определенные таким образом псевдодальности D , могут быть записаны в виде:

$$D_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} + cT' + \delta D_i \quad (1.5)$$

где D_i – псевдодальность i -го НКА, м;
 X, Y, Z – прямоугольные координаты определяющегося объекта, на котором размещена НАП в геоцентрической системе координат, м;
 X_i, Y_i, Z_i – такие же координаты i -го НКА (определяются в ГСК из навигационного сообщения, м);
 c – скорость света, м/с;

- T' – расхождение шкал времени НКА и потребителя, с;
 δD_i – погрешности определения псевдодальностей, м;
 i – номер НКА $i=1, \dots, N$. N – число НКА.

Для решения задачи определения места и коррекции временной шкалы образуется система уравнений, неизвестными которой являются три координаты X, Y, Z и ошибка шкалы времени потребителя T' , проявляющаяся при априорном определении момента излучения сигнала НКА:

$$D_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} + cT' \quad (1.5)$$

Учитывая, что неизвестных оказывается 4, необходимо иметь не менее 4-х определений ПД относительно 4-х НКА. Обычно в поле видимости потребителя оказывается от 5 до 8 НКА. В первых образцах аппаратуры потребителя решалась задача выбора наилучшего по некоторому критерию созвездия из 4-х НКА.

Сегмент потребителей

Сегмент потребителей включает приемники (аппаратуру потребителей) ГЛОНАСС и сообщество самих пользователей. НАП принимает сигналы ГЛОНАСС (практически все современные образцы НАП принимают также и сигналы системы GPS), обрабатывает их, измеряет и определяет радионавигационные параметры (псевдодальность и приращение псевдодальности или псевдоскорость), вычисляет геоцентрические координаты X, Y, Z и на их основе - геодезические координаты и высоту над опорным эллипсоидом в системе координат ПЗ-90 [18] (возможна также работа в системах WGS-84, СК-42, Гаусса-Крюгера и др.), поправку к местной шкале времени относительно системного времени ГЛОНАСС (GPS) и составляющие вектора скорости, а также скорость ухода (нестабильность частоты) местной ШВ. НАП производится для навигации ПО (самолетов, вертолетов, морских и речных судов, автотранспорта), для определения координат при геодезических и землеустроительных работах, для

синхронизации систем связи, энергосистем и т. д. Рисунок 1.4 показывает внешний вид НАП:



Рисунок 1.4 — Аппаратуры потребителей

а) TOPCON GB-1000

б) Бытовой НАП

1.4 Развитие ГНСС

В современное время существует несколько проектов по развитию ГНСС. В таблице приведены некоторые проекты ГНСС.

Таблица 1.3 — ГНСС и проекты по развитию ГНСС в настоящее время

Название	Страна	Этап	За пределами страны
GPS	США	Эксплуатация	да
ГЛОНАСС	Россия	Повторное развёртывание спутниковой группировки	да
Бейдоу	Китай	Разработка	нет
Galileo	Европейская система	Создание спутниковой группировки	да
IRNSS	Индия		нет

2 Наземные сети дифференциальной коррекции навигационных информации

2.1 Дифференциальный режим определения

В основе метода дифференциальной навигации лежит относительное постоянство значительной части погрешностей СРНС во времени и в пространстве. Необходимость использования дифференциального режима СРНС определяется стремлением удовлетворить наиболее жестким требованиям навигационного обеспечения таких задач, как посадка воздушных судов по категориям ИКАО, мореплавание в проливных зонах и узкостях, геодезическая привязка и т.п.

Метод дифференциальной коррекции предполагает наличия как минимум двух навигационно-геодезических приёмников (НГП) в двух точках пространства на удалении до 200 км. При реализации метода дифференциальной коррекции координаты потребителя и опорного НГП получают абсолютным методом. По измеренным псевдодальностям по коду до НИСЗ для одного и того же момента излучения радионавигационного сигнала потребитель определяет задержку получения радионавигационного сигнала относительно опорного НГП. Зная время распространения электромагнитного сигнала от НИСЗ между двумя приёмниками с ошибкой не более 10^{-7} с, потребитель определяет приращение координат между собственным и опорным НГП с ошибкой не более 1 м. В основе метода дифференциальной коррекции лежит относительное постоянство значительной части ошибок передаваемого сигнала от НИСЗ «Ураган» или «Navstar» во времени и пространстве за ионосферу, тропосферу и эфемеридную информацию, в случае близкого расположения двух и более НГП относительно друг друга. Так как сигналы от НИСЗ «Ураган» или

«Navstar», которые удалены от потребителя на расстояние более 19000 км, достигают этих НГП по очень близким траекториям.

Существует ряд признаков классификации разновидностей дифференциального режима (ДР) [1]. Такими признаками являются:

- тип основных измерений - фаза кода или фаза несущей частоты сигнала;

- тип коррекции - коррекция ПД и ПС или навигационных параметров, вычисляемых на их основе;

- место коррекции - у потребителя или в каком-нибудь центре;

- средства передачи корректирующей информации.

Метод дифференциальной коррекции подразделяется на [3]:

Д и ф ф е р е н ц и а л ь н ы й р е ж и м с к о р р е к ц и е й
к о о р д и н а т :

Его принцип основан на вычислении ошибки полученных мгновенных координат опорного НГП в общеземной системе координат относительно точных координат опорного навигационно-геодезического приёмника в общеземной системе координат. С учётом ошибки определения мгновенного местоположения опорного НГП вносится коррекция либо в координаты потребителя, либо в измеренные НГП потребителя псевдодальности [10].

Д и ф ф е р е н ц и а л ь н ы й р е ж и м с и с п о л ь з о в а н и е м
о т н о с и т е л ь н ы х к о о р д и н а т :

Используется в случае затруднения в точной геодезической привязке опорного НГП. В качестве точных координат используются мгновенные координаты, осреднённые за определённый период времени [10].

Д и ф ф е р е н ц и а л ь н ы й р е ж и м с и с п о л ь з о в а н и е м
п с е в д о с п у т н и к а :

В местах, где невозможно наблюдение потребителем более 3-х работоспособных НИСЗ синхронно с опорным НГП, устанавливают устройство, имитирующее сигнал НИСЗ. Данное устройство называют

псевдоспутником. Дифференциальный режим определения местоположения по НИСЗ и псевдоспутнику назван дифференциальным режимом с использованием псевдоспутника.

Относительные фазовые определения:

Данный режим наиболее сложен в математической реализации. Точность и дальность действия в плане для неподвижного потребителя, при реализации метода относительных фазовых определений, составляет 3 мм и ошибка в 1 мм на каждый километр. Метод основан на оценке фазовой задержки радионавигационного сигнала во времени от одного и того же НИСЗ относительно нескольких НПП с учётом их пространственного положения.

Для реализации режима в качестве исходных данных используют, помимо измеренных псевдодальностей по кодовой последовательности до НИСЗ, измеренную дробную часть поступающей фазы радионавигационного сигнала с ошибкой не более 3 мм. Измеренные дробные части поступающей фазы позволяют определять время распространения электромагнитного сигнала между двумя приёмниками с ошибкой не более 10^{-9} с, что на два порядка точнее по сравнению с другими режимами метода дифференциальной коррекции.

Реализация дифференциального режима и внешнего по отношению к потребителю и НКА СРНС контроля целостности осуществляется посредством создания дифференциальных подсистем (ДПС) СРНС.

Условно они подразделяются на широкозонные (ШДПС), региональные (РДПС) и локальные (ЛДПС).

2.2 Широкозонные ДПС

Основой ШДПС (WAAS, EGNOS, MSAS) является сеть широкозонных контрольных станций (ШКС), информация от которых передается на

широкозонные главные станции (ШГС) для совместной обработки с целью выработки общих поправок и сигналов целостности. Радиус рабочей зоны ШДПС порядка 5000-6000 км. Выработанные на ШГС сигналы целостности и корректирующие поправки передаются через наземные станции передачи данных (НСПД) на геостационарный КА (ПСА) типа Инмарсат, Артемис или MSAT для последующей ретрансляции потребителям. Эти ПСА используются также в качестве дополнительных навигационных точек для дополнительных дальномерных измерений. Основными при этом являются методы анализа разностей между измеренными и прогнозируемыми значениями ПД, а также методы, использующие избыточность измерений.

На данный момент существует несколько ШДПС, такие как:

1) WAAS, широкозонная система геостационарного дополнения GPS, по замыслу заказчика Федеральной авиационной администрации (ФАА) США, предназначена для обеспечения уровня целостности, доступности и точности, соответствующего требованиям, предъявляемым к основным системам для всех фаз полета, вплоть до захода на посадку по 1-й категории в первую очередь на Северо-Американском континенте и, частично, в Северной Атлантике.

2) EGNOS создается по заказу и под наблюдением так называемой Европейской Тройственной Группы (European Tripartite Group, ETG), объединяющей представителей Европейского космического агентства, Евроконтроля и Европейского Сообщества.

3) MSAS должна использоваться в качестве основы космического сегмента разрабатываемый в Японии многофункциональный транспортный КА (МТКА) MSAT. Первый МТКА (MSAT-1) планировалось вывести на геостационарную орбиту японской ракетой H-2 уже в 1999 г. и разместить его над экватором в точке 140° восточной долготы. Однако в [23] сообщается о разрушении 15.11.1999 при запуске ракетой H-2 первого MSAT. Стоимость

MSAT составляла 97 млн. долл. Это был второй неудачный пуск ракеты Н-2 (массой 263 т). Предшествующий неудачный пуск спутника-ретранслятора стоимостью 375 млн. долл. произошел в феврале 1998 г. Эти неудачи являются серьезным препятствием в развертывании ШДПС.

4) Российская система дифференциальной коррекции и мониторинга

Российская система дифференциальной коррекции и мониторинга решает задачу оценки качества функционирования космических навигационных систем (КНС) ГЛОНАСС (РФ) и GPS (США). Термин "мониторинг целостности" означает наблюдение за характеристиками системы и информирование потребителя о случаях аномального функционирования.

Система осуществляет два типа мониторинга:

О п е р а т и в н ы й м о н и т о р и н г

Задачами оперативного мониторинга является:

- оценивание в реальном времени погрешностей измерения псевдодальностей по навигационным космическим аппаратам (НКА) ГЛОНАСС и GPS;

- информирование потребителей о величинах этих погрешностей.

Оценка совокупного влияния погрешностей, вносимых наземным и космическим сегментами систем ГЛОНАСС и GPS., т.е. учёт влияния лишь погрешностей эфемерид и частотно-временных параметров.

А п о с т е р и о р н ы й м о н и т о р и н г

Назначением апостериорного мониторинга является оценка различных характеристик, влияющих на качество навигационных определений при помощи КНС.

Задачами АМ является фиксирование ситуаций, когда НКА функционирует аномально, а также оценка следующих параметров:

- вертикальной задержки навигационных сигналов вследствие влияния ионосферы в диапазоне L1;

- вертикальной задержки навигационных сигналов вследствие влияния тропосферы;
- погрешностей бортовых эфемерид НКА ГЛОНАСС и GPS;
- погрешностей бортовых ЧВП НКА ГЛОНАСС и GPS;
- различия шкал системного времени ГЛОНАСС и GPS;
- количества наблюдаемых НКА ГЛОНАСС и GPS;
- точности определения горизонтальных и вертикальных составляющих координат;
- точности определения горизонтальных и вертикальных составляющих скорости.

Аномальным считается такое функционирование НКА, когда суммарное влияние погрешностей эфемерид и ЧВП превышает допустимый предел.

Система мониторинга целостности навигационных полей КНС состоит из следующих компонентов:

- пункты мониторинга (ПМ);
- центр глобального мониторинга (ЦГМ);
- линии связи между ПМ и ЦГМ.

Распространение результатов оперативного мониторинга производится посредством технологий интернет.

2.3 Региональные ДПС

Региональные ДПС предназначены для навигационного обеспечения отдельных регионов континента, моря, океана. Диаметр рабочей зоны может составлять от 400-500 до 2000 и более км. РДПС могут иметь в своем составе одну или несколько ККС, а также соответствующие средства передачи корректирующей информации и сигналов целостности. Эта информация вырабатывается на главной станции или ККС.

РДПС Starfix

Эти подсистемы имеют дальность свыше 2000 км. Сеть таких ДПС образована 60 наземными ККС и четырьмя КА Инмарсат (INMARSAT) и охватывает многие районы всех континентов за исключением части Африки и Азии (Россия), а также акватории прилегающих морей и океанов.

РДПС SkyFix

Региональная дифференциальная система SkyFix фирмы Racal Survey Limited также охватывает все основные районы мира, в которых ведутся наиболее активные процессы добычи, использования, наблюдения и исследования природных ресурсов.

РДПС Eurofix

Отмечается ряд преимуществ системы Eurofix перед другими вариантами создания РДПС:

- реализация на основе уже существующей структуры;
- охват большой площади при сравнительно невысоких затратах;
- обеспечение улучшенной работоспособности и доступности канала передачи данных в городских и горных районах;
- обеспечение резервирования при отказе работы систем Лоран-С/Чайка или ГЛОНАСС/GPS.

Другие проекты РДПС

Средневосточные региональные ДПС, охватывающие зоны Персидского залива, Красного и Средиземного морей, Суэцкого канала и Гибралтара, по которым проходят важнейшие пути транспортировки нефти из Среднего и Ближнего Востока в Европу.

2.4 Локальные ДПС

Локальные ДПС имеют максимальные дальности действия от ККС или передатчика ЛПД до 50-200 км. ЛДПС обычно включают одну ККС

(имеются варианты с несколькими ККС), аппаратуру управления и контроля (в том числе, контроля целостности) и средства передачи данных.

К настоящему времени определились три основных класса ЛДПС:

1) морские ЛДПС для обеспечения мореплавания в проливных зонах, узкостях и акваториях портов и гаваней в соответствии с требованиями ИМО. Морские ЛДПС, использующие в качестве средств линий передачи данных (ЛПД) всенаправленные средневолновые радиомаяки (РМ) с дальностью до 200 км, размещены, в частности, в США (практически по всему побережью), по периметру о. Исландия, по побережью Италии и в других странах Европы. 12 радиомаяков размещено вдоль побережья Австралии. Отмечается также их размещение в Китае, Индии, Южной Африке, Великобритании, Канаде и в ряде других мест. Отметим, что к середине 1998 г. насчитывалось 187 таких радиомаяков в 28 странах мира;

2) авиационные ЛДПС для обеспечения захода на посадку и посадки ВС по категориям ИКАО. К настоящему времени разработано несколько типов авиационных ЛДПС посадки (спутниковых систем посадки). Эти системы отличаются несколькими достоинствами:

а) сравнительно небольшой состав оборудования позволяет снизить издержки при улучшенных операциях в сложных метеоусловиях;

б) позволяют в условиях 1-й и потенциально более сложных категорий обеспечить возможность работы для начальных участков всех ВГШ со стороны захода на посадку, располагающихся в радиусе 55 км, что делает эту систему экономически более эффективной, чем другие средства, которые предназначаются для одной ВПП;

в) позволяют оборудовать местные авиалинии;

г) отличаются гибкостью, позволяющей реализовать траектории захода с переменной геометрией, минимизирующие время полета и обеспечивающие борьбу с помехами;

д) в системах реализуются современные принципы проектирования, обеспечивающие контроль состояния аппаратуры и ускорение ремонтных работ.

3) ЛДПС для геодезических, землемерных и других специальных работ. Важный, распространенный и весьма перспективный класс ЛДПС составляют системы геодезического обеспечения с дальностью не более 50 км и сантиметровой-дециметровой точностью. Как правило, их использование допускает серьезную обработку измерений после того, как эти измерения проведены. Кроме того, они почти в обязательном порядке реализуют алгоритмы слежения за фазой несущей частоты сигнала. В то же время требования непрерывности, доступности и целостности для таких систем могут быть существенно ослаблены.

3 Источники ошибок измерений

В зависимости от причин, порождающих погрешности, их можно разделить на три группы:

К первой группе относят методические погрешности. Они обусловлены неточностью исходных математических моделей, описывающих сигналы и измеряемые процессы, и несовершенством метода измерений и алгоритмов, являющихся основой построения РНС. Например, в ряде случаев при разработке алгоритмов обработки принимаемых радионавигационных сигналов не учитываются динамика подвижного объекта в процессе измерения, изменение условий распространения радиоволн и т.д.

Во вторую группу включают инструментальные погрешности, вызванные несовершенством радионавигационной аппаратуры, и, в частности, тем, что принятые алгоритмы не могут быть точно реализованы. Причинами инструментальных погрешностей являются:

- схемные и конструктивные недостатки устройств;
- недостаточная чувствительность индикаторов;
- погрешности регулировок и калибровок, а также градуировок шкал приборов;
- зависимость показаний от непостоянства напряжений источников питания и т.д.

Третью группу составляют погрешности, вызванные условиями, в которых проводятся измерения. Источниками этих погрешностей являются: внешние помехи, условия распространения радиоволн, атмосферные условия и т.д. Более подробно о влияниях атмосферных условий будем рассматривать в следующей главе.

3.1 Инструментальные ошибки

3.1.1 Эффект многолучевости

Многолучевость - явление, в процессе которого электромагнитный сигнал НИСЗ достигает антенны НГП через несколько различных путей отражения от близлежащих предметов, сооружений, подстилающей поверхности, транспортных средств и других объектов вместе с непосредственным электромагнитным сигналом НИСЗ (истинным) или без него. Влияние многолучёвости периодически повторяется, в случае если система «антенна-окружающая среда» является постоянной. Эффект многолучёвости повторяется каждые звездные сутки для статического ГЛОНАСС/GPS НГП, если окружающая среда неизменна [3]. Уровень отражённого сигнала может быть соизмеримым с прямым сигналом, что может привести к существенному искажению полезного сигнала. При эффекте многолучевости, в момент отсутствия истинного электромагнитного сигнала НИСЗ наблюдается ошибочное удлинение псевдодальности НИСЗ-потребитель, что вносит дополнительную ошибку в определение координат потребителя. Рисунок 3.1 показывает механизм эффекта многолучевости:

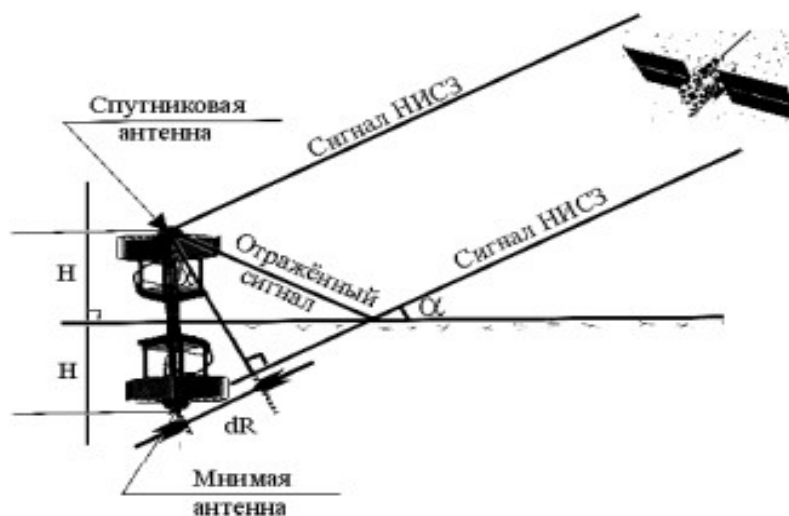


Рисунок 3.1 — Иллюстрация эффекта многолучевости

При отражении электромагнитного сигнала НИСЗ от какой - либо поверхности происходит сдвиг фаз, равный 180° , то есть меняется поляризация электромагнитного сигнала.

Величина влияния эффекта многолучёвости на определение псевдодальности напрямую зависит от алгоритмов обработки электромагнитного сигнала НИСЗ, «защитых» в НГП, и применяемых антенн с возможностью значительного уменьшения влияния многолучёвости на измерения псевдодальности.

Ошибку за многолучевость в первом приближении следует отнести к немоделируемым эффектам и случайным ошибкам при обработке ГЛОНАСС/GPS измерений. Экспериментальные исследования показали, что в зависимости от применяемой аппаратуры потребителя, наблюдается большой разброс значений дальномерной ошибки из - за эффекта многолучёвости. Она составляет [5] от нескольких сантиметров (при использовании специальных антенн и аппаратных алгоритмов подавления многолучёвости) до десятков метров при употреблении аппаратуры, не использующей алгоритмы подавления данного эффекта, и антенн, не оборудованных средствами отсеечения переотраженного сигнала в геометрически сложных условиях. Для отсеечения навигационного сигнала, полученного от подстилающей поверхности или близлежащих предметов будем использовать два НГП с антеннами, расположенными на некотором априорно известном расстоянии друг от друга. Последовательно перебирая все возможные комбинации построения навигационного решения по видимым НИСЗ для двух НГП, из общего решения исключаем НИСЗ, которые дают решения с наибольшей дисперсией (отягощённые не только эффектом многолучёвости, но и другими неучтёнными возмущающими факторами).

3.1.2 Ошибки эфемеридного обеспечения

Эфемеридные ошибки навигационно-временных определений вызваны неточностью определения параметров орбит НИСЗ на подсистеме контроля и управления и непрогнозируемыми смещениями НИСЗ относительно экстраполированной орбиты. По пессимистическим оценкам [6] эфемеридные ошибки СРНС ГЛОНАСС составляют 9.2 м, а СРНС GPS — 20 м.

Ошибку за неточное знание эфемерид НИСЗ возможно оценить только при использовании относительных методов определения координат потребителя [6].

3.1.3 Ошибки частотно-временного обеспечения

Ошибки частотно-временного обеспечения НИСЗ возникают вследствие несовершенства синхронизации бортовых шкал времени НИСЗ, несовершенства бортовых эталонов шкал времени, а также несовершенства эталонов частоты потребителя. Ошибки частотно-временного обеспечения могут приводить к серьёзным ошибкам в определении псевдодальности, так, например [5], ошибка бортовой шкалы времени в 1 мс приводит к эквивалентной ошибке определения псевдодальности в 300 км. Основной вклад в ошибку частотно-временного обеспечения вносят ошибки опорных рубидиево-цезиевых генераторов НИСЗ, ошибка опорного кварцевого генератора аппаратуры потребителя, а также задержки в аппаратуре НИСЗ и потребителя.

Средняя квадратическая ошибка сдвига бортовых шкал времени [5] составляет 9 нс через 2 ч и 25.4 нс цезиевого стандарта через сутки, 108 нс для рубидиевого стандарта в сутки. Средняя квадратическая ошибка опорного кварцевого генератора аппаратуры потребителя не хуже 1 мс в момент приёма кадра навигационного сообщения. Опорный кварцевый генератор приёмника потребителя осуществляет постоянную корректировку по шкалам времени НИСЗ.

Высокие точностные характеристики бортовых шкал времени НИСЗ, а также корректировки опорного генератора приёмника потребителя достигаются за счёт тщательного учёта релятивистских и гравитационных эффектов, обусловленных тремя причинами: НИСЗ ГЛОНАСС/GPS имеют высокую скорость; существует незначительная разность гравитационных потенциалов между НИСЗ и потребителем; вращение Земли соизмеримо с движением НИСЗ по небесной сфере.

3.2 Астрономические факторы

Движения спутника (или любого другого небесного тела) испытывают возмущения орбиты. Для спутников Земли, к ним относятся гравитационные и негравитационные возмущения [7].

Г р а в и т а ц и о н н ы е в о з м у щ е н и я :

- несферичность Земли: Земля имеет шарообразную форму но полярные и экваториальные радиусы отличаются на 20 км. Это вызывает неоднородность гравитационного поля Земли;

- эффект от океана и Земли — приливы и прямые, и косвенные погрузка;

- третий эффект - гравитационное притяжение Солнца, Луны и планет Солнечной системы.

Н е г р а в и т а ц и о н н ы е в о з м у щ е н и я :

- сопротивление атмосферным воздействиям (особенно для низколетящих спутников);

- давление солнечного излучения, как прямого, так и косвенным (косвенные силы описывается альбедо, что это отношение отражается на солнечный свет поглощается с помощью спутника);

- другие факторы, как солнечный ветер, релятивистские эффекты или магнитным полем помехи.

В связи с этим возмущение орбит неизвестно с неограниченной точностью. Орбитальных возмущений очень трудно моделировать, они меняются с изменением места и времени и, что хуже всего, они включают непредсказуемые элементы.

3.3 Влияние вращения Земли

Земля испытывает суточное вращение вокруг своей оси с периодом в одни звездные сутки, непосредственно наблюдаемым проявлением чего является суточное вращение небесной сферы. Вращение Земли происходит с запада на восток. При наблюдении с Полярной звезды или северного полюса эклиптики, вращение Земли происходит против часовой стрелки. Вращение Земли оказывает влияние на распространение радиосигналов со спутников ГНСС. Поэтому его необходимо учесть при определении угловой скорости. Для этого учитывают эффект Саньяка, вызываемый вращением Земли, при синхронизации временных сигналов. Как показано на рисунке 3.2 причиной возникновения эффекта Саньяка является вращения Земли и наклона ее оси вращения.

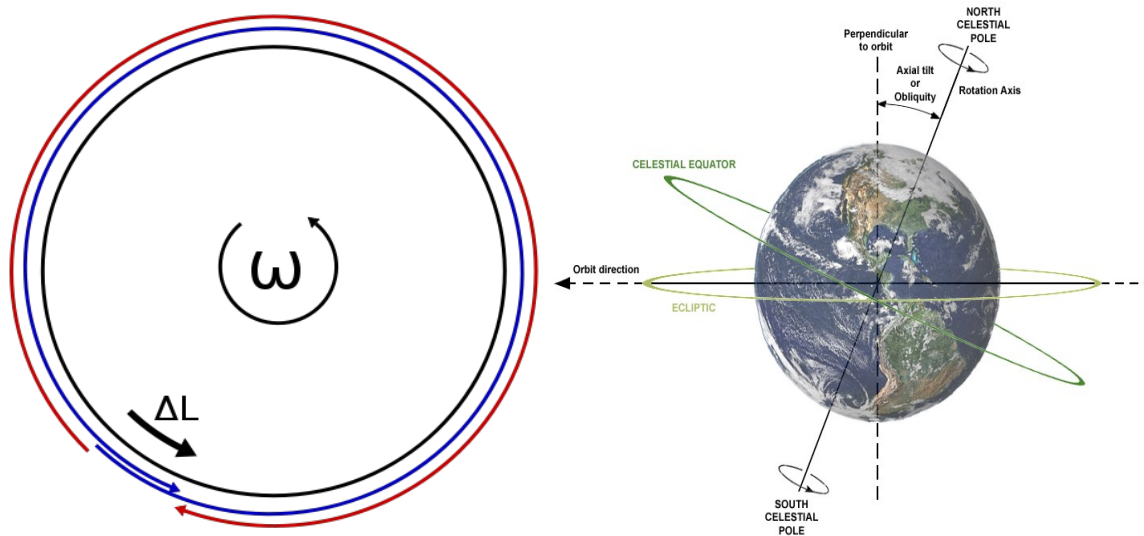


Рисунок 3.2 — Иллюстрация эффекта Саньяка

Рассмотрим следующее выражение [7]:

$$\Omega_{err} = \Omega - \Omega_{ie} \cdot t_{err} \quad (1.5)$$

где Ω_{err} – ошибка измерения угловой скорости;
 Ω – угол от точки весеннего равноденствия до вектора восходящего узла;
 Ω_{ie} – угловая скорость Земли;
 t_{err} – ошибка измерения времени.

Здесь ошибка измерения времен t_{err} изменяется со временем. GPS время начинается в субботу в полночь по Гринвичу. Очевидно, что ошибка измерения времени t_{err} и GPS время разные. Самым простым способом для измерения ошибку измерения времени и GPS времени является линейный сдвиг времени базы, как: $t_{err} = t + \Delta t$, следовательно получим:

$$\Omega_{err} = \Omega - \Omega_{ie} \cdot (t + \Delta t) = \Omega - \Omega_{ie} \cdot \Delta t - \Omega_{ie} \cdot t = \Omega_e - \Omega_{ie} \quad (1.6)$$

где $\Omega_e = \Omega - \Omega_{ie} \cdot \Delta t$

эта информация содержится в данных GPS эфемерид.

4 Влияние атмосферы на распространение радиосигналов

4.1 Влияние ионосферы на распространение радиосигналов

Ионосфера [3] - ионизированная часть верхней атмосферы, расположена выше 50 км. Верхней границей ионосферы является внешняя часть магнитосферы Земли. Ионосфера представляет собой природное образование разреженной слабо ионизированной плазмы, находящейся в магнитном поле Земли. Причина повышенной ионизации воздуха в ионосфере - разложение молекул атмосферного газа под действием ультрафиолетовой, рентгеновской и солнечной радиации, а также космического излучения.

Концентрация ионов и электронов в ионосфере распределена по высоте неравномерно: имеются области, или слои, где она достигает максимума. Таких слоев в ионосфере несколько; они не имеют резко выраженных границ, их положение и интенсивность регулярно изменяются в течение дня, сезона и 11-летнего солнечного цикла. Согласно рисунку 4.1, верхний слой F соответствует главному максимуму ионизации ионосферы. Ночью он поднимается до высот 300 - 400 км, а днём (преимущественно летом) раздваивается на слои F_1 и F_2 с максимумами на высотах 160 - 200 км и 220 - 320 км. На высотах 90 - 150 км находится область E, а ниже 90 км - область D. Слоистость ионосферы обусловлена резким изменением по высоте условий её образования [8].

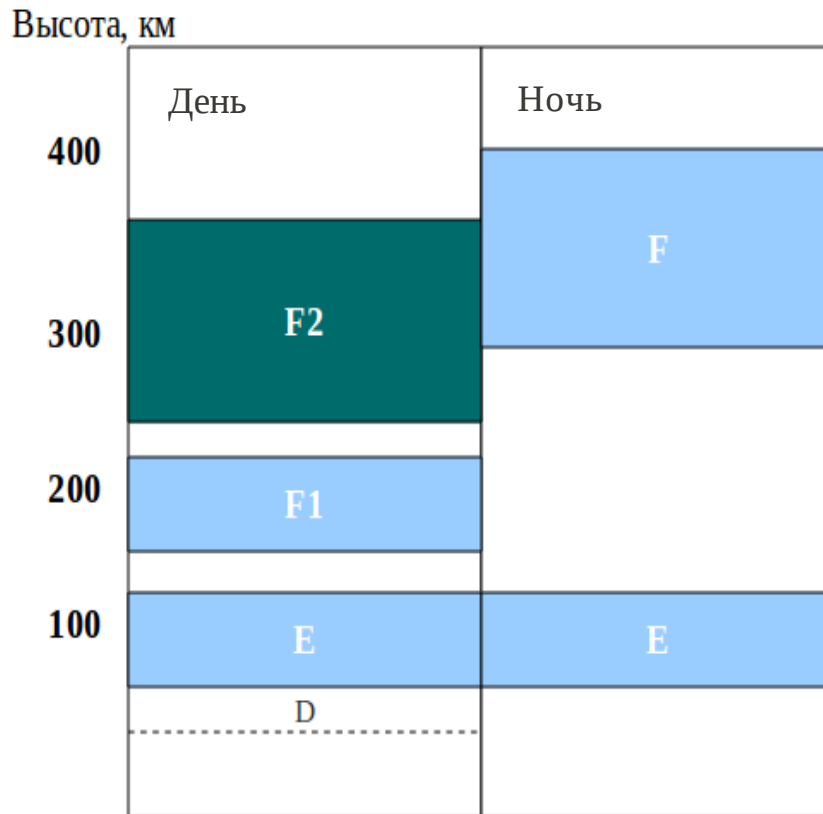


Рисунок 4.1 — Ионосферные слои

Ионосфера непрерывно изменяется. Различают регулярные изменения и возмущённые состояния. Поскольку основным источником ионизации является коротковолновое излучение Солнца, многие регулярные изменения ионосферы обязаны изменению либо высоты Солнца над горизонтом (суточные, сезонные, широтные изменения), либо уровня солнечной активности (11-летние и 27-дневные вариации).

При переходе ото дня к ночи в области D концентрация электронов резко уменьшается и соответственно уменьшается поглощение радиоволн. В момент солнечных вспышек на освещенной Солнцем земной поверхности сильно возрастает интенсивность рентгеновского излучения, увеличивающая ионизацию области D, что приводит к увеличению поглощения радиоволн, а иногда даже к полному прекращению радиосвязи, — так называемое внезапное ионосферное возмущение (эффект Делинджера).

Продолжительность таких возмущений обычно 0.3—1.5 часа. Область ионосферы на высотах 100—200 км, включающая слои E и F1, отличается наиболее регулярными изменениями. Это обусловлено тем, что именно здесь поглощается основная часть коротковолнового ионизирующего излучения Солнца. Ночью из-за отсутствия источников ионизации в области 125 - 60 км величина электронной концентрации сильно уменьшается, однако в области E на высотах 100 - 120 км обычно сохраняется довольно высокая электронная концентрация порядка $(3 - 30) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. О природе источника ночной ионизации в области E мнения расходятся.

Движения потоков заряженных частиц в ионосфере приводят к возникновению турбулентных неоднородностей электронной концентрации. Причины их возникновения — флуктуация ионизирующего излучения и непрерывное вторжение в атмосферу метеоров, образующих ионизированные следы. Движение ионизованных масс и турбулентность ионосферы влияют на распространение радиоволн.

Ионосферная рефракция — один из главных источников ошибок при абсолютных ГЛОНАСС/GPS определениях.

Ионосфера оказывает негативное воздействие на электромагнитный сигнал ГЛОНАСС/GPS и соответственно на измерение псевдодальности при прохождении электромагнитного сигнала НИСЗ сквозь ионосферу [9]. Происходит: групповая задержка кодовой последовательности и опережение фазы несущей, которые изменяются с прохождением различных областей и слоёв ионосферы; вращение плоскости поляризации электромагнитного сигнала; колебание амплитуды и фазы электромагнитного сигнала; изменение траектории распространения электромагнитного сигнала за счёт преломления и отражения различными слоями и областями ионосферы; поглощение электромагнитного сигнала.

Ионосферная рефракция вносит ошибку в измерение псевдодальности порядка 4.5 м [5]. Поэтому для достижения приемлемой точности измерения

псевдодальности по коду и фазе несущей необходим учёт и исключение влияния ионосферы особенно при абсолютных определениях посредством СРНС ГЛОНАСС/GPS. Измерение псевдодальности на двух частотах может устранить влияние ионосферной рефракции на измерение псевдодальности с учётом разности времени достижения приёмника двух сигналов на L1 и L2 от НИСЗ. В то же время в последние десятилетия были развиты различные методы моделирования ионосферы для исключения из измерений псевдодальности ионосферной рефракции. Лучшие модели могут устранять ионосферную рефракцию в пределах 50 - 75 %.

Другими словами, посредством комбинации измерений на L1 и L2 [9] мы можем устранить влияние ионосферной рефракции на измерение псевдодальности по коду и фазе несущей.

4.2 Влияние тропосферы на распространение радиосигналов

Тропосфера - нижняя, преобладающая по массе часть земной атмосферы, в которой температура понижается с высотой [10]. Тропосфера простирается в среднем до высот 8 - 10 км в полярных широтах, 10 - 12 км в умеренных, 16 - 18 км в тропических. Над тропосферой располагается стратосфера, от которой тропосфера отделена сравнительно тонким переходным слоем — тропопаузой. В тропосфере сосредоточено более 4/5 всей массы атмосферного воздуха. Вертикальное распределение температуры в тропосфере зависит от особенностей поглощения солнечного и земного излучений и от конвективной передачи тепла. Основной поглотитель излучения в атмосфере — водяной пар, содержание которого с высотой быстро убывает, в связи с чем должна убывать и температура воздуха.

Почти вся масса водяного пара атмосферы сосредоточена в тропосфере. В тропосфере содержится также и основная масса атмосферных аэрозолей (пыли, дыма и др.), поступающих с земной поверхности. В нижней

части тропосферы (в пограничном слое, или слое трения) хорошо выражен суточный ход температуры и влажности воздуха, скорость ветра с высотой быстро возрастает, направление его приближается к направлению изобар. В нижнем слое тропосферы в несколько десятков метров непосредственно над земной поверхностью влажность повышена; над сушей вертикальные градиенты температуры в дневные часы очень велики, а ночью, наоборот, нередко приземные инверсии температуры.

Тропосферная рефракция - один из главных источников ошибок при ГЛОНАСС/GPS измерениях. Фазовая скорость волнового фронта в тропосфере, показатель преломления которой больше единицы, меньше скорости света в вакууме, вследствие чего "электромагнитная" длина излучаемого электромагнитного сигнала НИСЗ становится больше "геометрической". Тропосферная рефракция вносит ошибку в измерение псевдодальности порядка 2.0 - 2.5 м в направлении зенита и увеличивается приблизительно с косекансом угла места и может достигать значения 20 - 28 м при угле возвышения НИСЗ над горизонтом в 5° . Поэтому для достижения приемлемой точности измерения псевдодальности по коду и фазе несущей необходим учёт и исключение влияния тропосферы при всех видах измерений посредством СРНС ГЛОНАСС/GPS.

При прохождении электромагнитного сигнала НИСЗ сквозь тропосферу оказываются следующие негативные воздействия на электромагнитный сигнал ГЛОНАСС/GPS и соответственно на измерение псевдодальности [11]:

- происходит избыточная задержка кодовой последовательности и фазы несущей;
- наблюдается вращение плоскости поляризации электромагнитного сигнала;
- имеет место поглощение электромагнитного сигнала.

Тропосфера - недиспергирующая среда, то есть показатель преломления и скорость распространения электромагнитного сигнала в тропосфере не зависит от частоты электромагнитного сигнала, вследствие чего тропосферная рефракция не зависит от несущей частоты, не исключается посредством комбинации измерений на частотах L1, L2 и одинаково воздействует на измерение псевдодальности и по коду, и на фазе несущей.

Сухая атмосфера вносит приблизительно 90 % полной тропосферной рефракции и может быть смоделирована с точностью до 0.05 м с использованием поверхностного давления и температуры. Различные модели сухой атмосферы основаны на законах идеальных газов; эти модели применяют сферические слои в качестве разложения тропосферы для сухого слоя. Влажный компонент намного более сложно поддается моделированию, так как водяной пар не может быть точно предсказан и смоделирован. Даже при нормальных условиях состояния тропосферы имеются ограниченные источники водяного пара, часто в форме жидкой воды. Поэтому эти водные источники пара, наряду с турбулентностью в более низкой атмосфере, причиняют вариации на концентрации водяного пара, который не может быть коррелирован через какое-то время или пространство. Эти вариации не могут быть точно предсказаны от поверхностных измерений с Земли. К счастью, "влажный" вклад приблизительно равен 10 % от полной тропосферной рефракции. Несмотря на изменчивость водяного пара, существует способ его моделирования путём создания экспоненциального вертикального профиля. Высота влажного слоя приблизительно 12 км. Влажная задержка приблизительно составляет 5 - 30 см. Посредством моделирования средняя квадратическая ошибка определения псевдодальности сводится к 2 - 5 см. Объединенные модели для сухих и влажных слоев вместе предсказывают задержку, вызванную тропосферой.

В мире за последние 30 лет созданы различные модели тропосферной рефракции [3] такие, как: Хопфильда (1971 г.), Yionoulis (1970 г.), модифицированная модель Хопфильда (1974 г.), Саастамоинена (1987 г.), Дэвиса (1985 г.), Ланьи (1985 г.) и многие другие.

5 Система дистанционного зондирования водяного пара

В предыдущих главах были рассмотрены вопросы, касающиеся элементарных понятий о системах ГНСС, дифференциальной коррекции и также об источниках ошибок измерений. Тропосферная задержка радиосигналов представляет собой самый большой интерес метеорологов потому, что она даст новую возможность получения информации о влагосодержании атмосферы. В данной главе рассматриваются теоретические основы и использование радиосигналов, полученных со спутников ГНСС, в задаче дистанционного зондирования водяного пара, а также возможность реализации нового метода измерения водяного пара с помощью сети ГНСС-приемников для целей ассимиляции данных в системы гидродинамических прогнозов.

5.1 Теоретические основы

Радиосигналы при распространении в атмосфере испытывают препятствия, в результате чего задерживаются и доходят до Земли (до приемника) чуть позднее. Нетрудно можно сказать [12], что путь радиосигналов определяется по формуле:

$$S = \int c dt = \int \frac{c}{v} ds = \int_s n(s) ds \quad (5.1)$$

где S – электромагнитная дальность (псевдодальность), м;
 ds – элементарная электромагнитная дальность, м;
 c – скорость света в вакууме, м/с;
 v – групповая скорость распространения радиоволн в среде, м/с;
 n – показатель преломления.

Эта электромагнитная дальность или псевдодальность по сравнению с геометрической дальностью всегда больше. Из геометрии видно, что геометрическую дальность можно определить по следующей формуле:

$$L = \int_l dl = \sqrt{(X_{sat} - X_{rec})^2 + (Y_{sat} - Y_{rec})^2 + (Z_{sat} - Z_{rec})^2} \quad (5.2)$$

где L – геометрическая дальность, м;
 dl – элементарная геометрическая дальность, м;
 $X_{sat}, Y_{sat}, Z_{sat}$ – координаты спутника, м;
 $X_{rec}, Y_{rec}, Z_{rec}$ – координаты приемника, м.

Из формул (5.1) и (5.2) вычисляют суммарную задержку следующим образом [12]:

$$\Delta L = S - L = \int (n(s) - 1) ds + \int_s ds - \int_l dl \quad (5.3)$$

где ΔL – суммарная задержка, м.

Суммарная задержка радиосигналов в атмосфере состоит из: ионосферной, тропосферной, сдвига шкал времени, систематической ошибки и случайной ошибки [13]. Она выражается следующей формулой:

$$\Delta L = S - L = \Delta L^{tro} + \Delta L^{ion} + \Delta \tau \cdot c + \delta + \xi \quad (5.4)$$

где ΔL – суммарная задержка, м;
 ΔL^{tro} – тропосферная задержка, м;
 ΔL^{ion} – ионосферная задержка, м;
 $\Delta \tau \cdot c$ – сдвиг шкал времени, м;
 δ – систематическая ошибка, м;
 ξ – случайная ошибка, м.

Причина запаздывания радиосигналов заключается в том, что атмосфера состоит из слоев с разными физическими характеристиками поэтому происходит все время рефракция радиоволн. Из формулы (5.1) видно, что электромагнитная дальность зависит от коэффициента преломления.

5.1.1 Зависимость показателя преломления от параметров атмосферы

Коэффициент преломления близок к единице поэтому для удобства введем понятие N-единиц:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (5.5)$$

где N – показатель преломления, N-единицы;
 n – показатель преломления.

Для атмосферы верно следующее выражение:

$$N = N_d + N_v \quad (5.6)$$

где N – показатель преломления в N-единицах;
 N_d – показатель преломления в N-единицах для сухого воздуха;
 N_v – показатель преломления в N-единицах для водяного пара.

Показатель преломления в N-единицах для сухого воздуха может быть рассчитан по формуле:

$$N_d = k_1 \cdot \frac{P_d}{T} \cdot Z_d^{-1} \quad (5.7)$$

где k_1 – некий коэффициент, равен $7.76 \cdot 10^{-1}$ К/Па;
 P_d – давление сухого воздуха, Па;
 T – температура сухого воздуха, К;
 Z_d^{-1} – фактор сжимаемости сухого воздуха.

Показатель преломления в N-единицах для водяного пара может быть рассчитан по формуле:

$$N_v = \left[k_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \right] \cdot Z_v^{-1} \quad (5.8)$$

где k_2 – некий коэффициент, равен $7.04 \cdot 10^{-1}$ К/Па;
 k_3 – некий коэффициент, равен $3.77 \cdot 610^{-1}$ К²/Па ;
 e – парциальное давление водяного пара, Па;

- T – температура воздуха, К;
 Z_d^{-1} – фактор сжимаемости водяного пара.

Факторы сжимаемости сухого воздуха и водяного пара могут быть рассчитаны по следующим эмпирическим формулам:

$$Z_d^{-1} = 1 + P_d \cdot [57.90 \cdot 10^{-8} - 9.4581 \cdot 10^{-4} \cdot T^{-1} + 0.25844 \cdot T^{-2}] \quad (5.9)$$

$$Z_v^{-1} = 1 + e \cdot [1 + 3.7 \cdot 10^{-4} \cdot e] \cdot [-2.37321 \cdot 10^{-3} + 2.23366 T^{-1} - 710.92 T^{-2} + 7.75141 \cdot 10^4 T^{-3}] \quad (5.10)$$

Известно, что для любого газа выполняется равенство:

$$P_i = Z_i \cdot \rho_i \cdot R_i \cdot T_i \quad (5.11)$$

- где P_i – давление i -го газа, Па;
 Z_i – фактор сжимаемости i -го газа;
 ρ_i – плотность i -го газа, кг/м³;
 R_i – газовая постоянная i -го газа, Дж/кг·К;
 T_i – температура i -го газа, К.

Если считать сухой воздух и водяной пар идеальным газом, то можно определить коэффициент преломления в N-единицах следующим образом:

$$N_d = k_1 \cdot \frac{P_d}{T} \quad (5.12)$$

$$N_v = k_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (5.13)$$

Плотность влажного воздуха определяется по формуле:

$$\rho_m = \rho_d + \rho_v \quad (5.14)$$

где	ρ_m	–	плотность влажного воздуха, кг/м ³ ;
	ρ_d	–	плотность сухого воздуха, кг/м ³ ;
	ρ_v	–	плотность водяного пара, кг/м ³ .

В предположении того, что показатель преломления состоит из гидростатической и влажной частей, используются следующие преобразования:

Из формул (5.7) и (5.8) мы имеем:

$$N = k_1 \cdot R_d \cdot \rho_d + k_2 \cdot R_v \cdot \rho_v + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \cdot Z_v^{-1} \quad (5.15)$$

Преобразовав формулу (5.15), получаем следующую:

$$N = k_1 \cdot R_d \cdot \rho_m - k_1 \cdot R_d \cdot \rho_v + k_2 \cdot R_v \cdot \rho_v + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \cdot Z_v^{-1} \quad (5.16)$$

Следовательно:
$$N = k_1 \cdot R_d \cdot \rho_m + \left(k_2 - k_1 \cdot \frac{R_d}{R_v} \right) \cdot R_v \cdot \rho_v + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \cdot Z_v^{-1}$$

Если полагаем, что $k_2' = \left(k_2 - k_1 \cdot \frac{R_d}{R_v} \right)$, то мы получим выражение:

$$N = k_1 \cdot R_d \cdot \rho_m + \left(k_2' \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \right) \cdot Z_v^{-1} .$$

Это значит, что показатель преломления состоит из гидростатической и влажной частей. Ниже приведены эмпирические формулы для их расчета:

гидростатическая часть:
$$N_h = k_1 \cdot R_d \cdot \rho_m \quad (5.17)$$

влажная часть:
$$N_w = \left(k_2' \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \right) \cdot Z_v^{-1} \quad (5.18)$$

5.1.2 Определение ионосферной задержки радиосигналов

Ионосферная задержка определяется по двум способам:

С помощью измерений на двух частотах:

$$\Delta L_{ion} = \frac{f_2^2 (L_2 - L_1)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (5.19)$$

где ΔL^{ion} – ионосферная задержка, м;

f_1, f_2 – частоты, Гц;

L_1, L_2 – псевдодальности, измеренные на частотах f_1, f_2 , м.

С помощью интегрального содержания электронов:

$$\Delta L_{ion} = \frac{-40.4 \cdot TEC}{f_1^2 \left[1 - \left(\frac{R \cdot \cos \beta}{R + z_{max}} \right)^2 \right]^{0.5}} \quad (5.20)$$

где ΔL_{ion} – ионосферная задержка, м;

- TEC – интегральное содержание электронов, м⁻²;
 f_1 – частота, Гц;
 R – средний радиус Земли, равный 6371221 м;
 β – угол места, градус;
 Z_{max} – высота максимума слоя ионосферы, равная 432500 м.

5.1.3 Определение тропосферной задержки радиосигналов

Тропосферная определяется по формуле:

$$\Delta L^{tro} = M_h(\beta) \cdot \Delta L_h^z + M_w(\beta) \cdot \Delta L_w^z \quad (5.21)$$

- где
- ΔL^{tro} – тропосферная задержка, м;
 - $M_h(\beta)$ – гидростатическая отображающая функция;
 - ΔL_h^z – вертикальная гидростатическая задержка, м;
 - $M_w(\beta)$ – влажная отображающая функция;
 - ΔL_w^z – вертикальная задержка во влажном воздухе, м;
 - β – угол места, градус.

5.1.4 Отображающие функции

Гидростатическая отображающая функция

По определению, данная функция показывает насколько больше задержка радиосигнала при распространении под данным углом места по сравнению с вертикальным распространением радиосигнала атмосфере, где давление воздуха убывает по гидростатическому закону:

$$M_h(\beta) = \frac{\int_0^L \rho dl}{\int_0^\infty \rho dz} \quad (5.22)$$

где $M_h(\beta)$ – гидростатическая отображающая функция;
 Для аппроксимации данной функции может быть использована формула Ифадиса [12]:

$$M_h(\beta) = \frac{1}{\sin \beta + \frac{a}{\sin \beta + \frac{b}{\sin \beta + c}}} \quad (5.23)$$

где $M_h(\beta)$ – гидростатическая отображающая функция;
 a, b, c – эмпирические коэффициенты, равны:
 $a = 1.237 \cdot 10^{-3} + 1.316 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 1.378 \cdot 10^{-6} \cdot (T_0 - 288.15) + 8.057 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{e_0}$
 $b = 3.333 \cdot 10^{-3} + 1.946 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 1.040 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 1.747 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{e_0}$
 $c = 0.078$
 T_0 – приземная температура воздуха, К;
 e_0 – приземное значение парциального давления водяного пара, Па;
 P_0 – приземное значение атмосферного давления, Па.

Влажная отображающая функция

По определению, данная функция показывает насколько больше задержка радиосигнала при распространении под данным углом места по сравнению с вертикальным распространением радиосигнала во влажном воздухе:

$$M_w(\beta) = \frac{\int_0^L \rho_w dl}{\int_0^\infty \rho_w dz} \quad (5.24)$$

где $M_w(\beta)$ – влажная отображающая функция;

Для аппроксимации данной функции может быть использована формула Ифадиса [12]:

$$M_w(\beta) = \frac{1}{\sin \beta + \frac{a'}{\sin \beta + \frac{b'}{\sin \beta + c'}}} \quad (5.25)$$

где $M_w(\beta)$ – влажная отображающая функция;

a', b', c' – эмпирические коэффициенты, равны:

$$a' = 5.236 \cdot 10^{-3} + 2.471 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 1.724 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 1.328 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{e_0}$$

$$b' = 1.705 \cdot 10^{-3} + 7.384 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 3.767 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 2.147 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{e_0}$$

$$c' = 0.05917$$

T_0 – приземная температура воздуха, К;

e_0 – приземное значение парциального давления водяного пара, Па;

P_0 – приземное значение атмосферного давления, Па.

5.1.5 Вертикальная гидростатическая задержка радиосигналов

Вертикальная гидростатическая задержка радиосигналов показывает, на сколько радиосигналы задерживаются в вертикальном столбе сухого атмосферного воздуха, и вычисляется по формуле:

$$\Delta L_h^z = 10^{-6} \cdot \int_{z_0}^{\infty} N_h(z) dz = 10^{-6} \cdot k_1 \cdot R_d \cdot \int_{z_0}^{\infty} \rho_m(z) dz \quad (5.26)$$

С высотой атмосферное давление меняется по закону:

$$\frac{dP}{dz} = -\rho_m(z) \cdot g(z) \quad (5.27)$$

Если взять интеграл (5.27) по всей высоте атмосферы, то получим выражение:

$$\int_{P_0}^0 dP = - \int_{z_0}^{\infty} \rho_m(z) g(z) dz = -P_0 \quad (5.28)$$

Из формул (5.26), (5.27) и (5.28) перепишем формулу для вертикальной гидростатической задержки радиосигналов следующим образом:

$$\Delta L_h^z = 10^{-6} \cdot k_1 \cdot \frac{R_d}{g_m} \cdot P_0 \quad (5.29)$$

где $M_w(\beta)$ – влажная отображающая функция;
 R_d – газовая постоянная сухого воздуха, равна 287.054 Дж/кг·К
 g_m – ускорение свободного падения.

Ускорение свободного падения в свою очередь зависит от широты и высоты. Оно вычисляется следующим образом:

$$g_m = g_m^0 \cdot f(\phi, z) \quad (5.30)$$

где g_m – ускорение свободного падения, м/с²;
 g_m^0 – ускорение свободного падения у Земли, м/с²;
 $f(\phi, z)$ – эмпирическая функция.

$$f(\phi, z) = 1 - 266 \cdot 10^{-5} \cdot \cos^2 \phi - 28 \cdot 10^{-8} \cdot z \quad (5.31)$$

где ϕ – широта, градус;
 z – высота, м.

Подставляя известные коэффициенты в формулу (5.29), получим формулу (5.32), которая используется в модели тропосферной задержки:

$$\Delta L_h^z = 0.0022779 \cdot \frac{P_0}{f(\phi, z)} \quad (5.32)$$

5.1.6 Вертикальная задержка радиосигналов во влажном воздухе

Соответственным образом для вертикальной задержки радиосигналов во влажном воздухе можем написать:

$$\Delta L_w^z = 10^{-6} \cdot \int_{z_0}^{\infty} N_w(z) dz \quad (5.33)$$

Пренебрегая сжимаемостью влажного воздуха, можем переписать уравнение (5.18) в следующем виде:

$$N_w = k_2' \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (5.34)$$

Из выражений (5.27) и (5.28) можно получить следующее:

$$\Delta L_w^z = 10^{-6} \cdot \int_{z_0}^{\infty} \left[k_2' \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \right] dz \quad (5.35)$$

Или такое выражение:

$$\Delta L_w^z = 10^{-6} \cdot \left(k_2' + \frac{k_3}{T_m} \right) \cdot \int_{z_0}^{\infty} \frac{e}{T} dz \quad (5.36)$$

где T_m – средняя «взвешенная» температура, К.

5.2 Основные функции модели интегрального количества водяного пара в атмосфере

5.2.1 Определение координат спутников и приемников

В небесной механике для описания движения небесного тела используют параметры орбиты. На рисунке 5.1 показывают часто используемые параметры орбиты спутников:

- большая полуось орбиты – a ;
- эксцентриситет орбиты – e ;
- долгота восходящего узла – Ω ;
- аргумент перицентра – ω ;
- наклон орбиты – i ;
- средняя аномалия в эпоху – M или истинная аномалия – u .

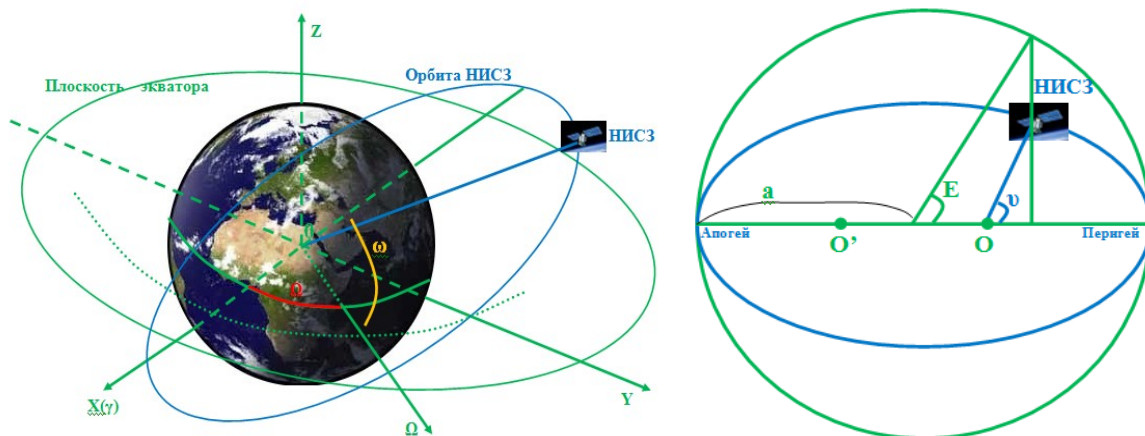


Рисунок 5.1 — Основные параметры орбиты НИСЗ

Для определения параметров движения какого-либо тела необходимо использовать системы координаты. В настоящее время более широко использую следующие системы: для GPS — WGS - 84, для ГЛОНАСС — ПЗ - 90.02. Переход от одной системы в другую осуществляется с помощью матрицы перехода:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS-84} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 2.5 \\ 0.0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -0.39 & 0 \\ 0.39 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ПЗ-90.02} \quad (5.37)$$

где

$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS-84}$ — координаты в системе WGS - 84

$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ПЗ-90.02}$ — координаты в системе ПЗ - 90.02

Рассмотрим таблицу 5.1, в которой приведены константы и параметров выше перечисленных систем, и рисунок 5.2, где иллюстрируются системы отсчета для ГНСС.

Таблица 5.1 — Геодезические константы и параметры общеземного эллипсоида ПЗ-90 и WGS-84

Параметры		ПЗ-90	WGS-84
Угловая	скорость вращения	$7.292115 \cdot 10^{-5}$	$7.2921151467 \cdot 10^{-5}$

Земли, рад/с		
Геоцентрическая константа гравитационного поля Земли с учетом атмосферы, $\text{м}^3/\text{с}^2$	$398600.44 \cdot 10^9$	$398600.5 \cdot 10^9$
Скорость света, м/с	299792458	299792458
Большая полуось эллипсоида, м	6378136.0	6378137.0
Коэффициент сжатия эллипсоида	1/298.257839303	1/298.257223563

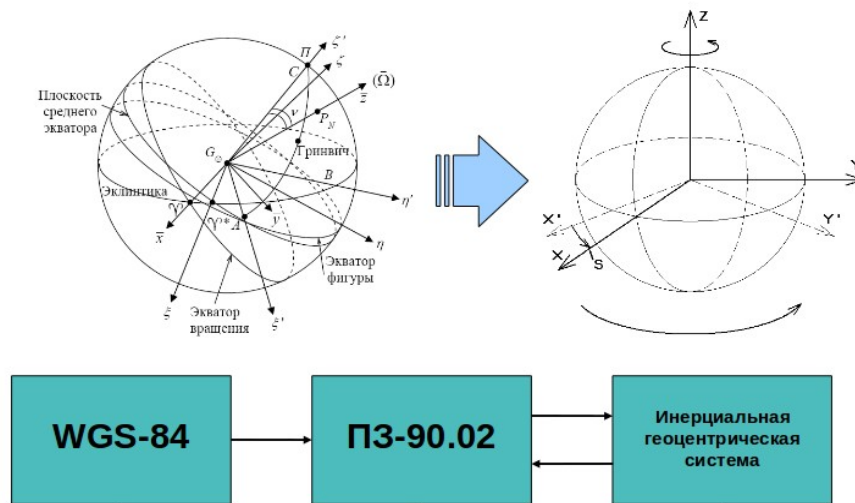


Рисунок 5.2 — Иллюстрация систем координат

В пункте 1.1.3 рассмотрели навигационное сообщение от спутников GPS/ГЛОНАСС. По данным навигационного сообщения можно определить местоположения спутников и приемников. Данные передаются в формате RINEX[13]. Нами были написаны Java-приложения, которые позволяют определять координаты спутников и GPS и ГЛОНАСС. Пример данных в формате RINEX представлен на рисунке 5.3.

```

-----|----1|0----|----2|0----|----3|0----|----4|0----|----5|0----|----6|0----|----7|0----|----8|
      2.10          GLONASS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE
ASRINEXG V1.1.0 VM AIUB          19-FEB-98 10:42 PGM / RUN BY / DATE
STATION ZIMMERWALD          CORR TO SYSTEM TIME COMMENT
      1998      2      16      0.379979610443D-06          END OF HEADER
-----|----1|0----|----2|0----|----3|0----|----4|0----|----5|0----|----6|0----|----7|0----|----8|
3 98  2 15  0 15  0.0 0.163525342941D-03 0.363797880709D-11 0.108000000000D+05
0.106275903320D+05-0.348924636841D+00 0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
-0.944422070313D+04 0.288163375854D+01 0.931322574615D-09 0.210000000000D+02
0.212257280273D+05 0.144599342346D+01-0.186264514923D-08 0.300000000000D+01
-----|----1|0----|----2|0----|----3|0----|----4|0----|----5|0----|----6|0----|----7|0----|----8|
4 98  2 15  0 15  0.0 0.179599039257D-03 0.636646291241D-11 0.122400000000D+05
0.562136621094D+04-0.289074897766D+00-0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
-0.236819248047D+05 0.102263259888D+01 0.931322574615D-09 0.120000000000D+02
0.762532910156D+04 0.339257907867D+01 0.000000000000D+00 0.300000000000D+01
-----|----1|0----|----2|0----|----3|0----|----4|0----|----5|0----|----6|0----|----7|0----|----8|
11 98  2 15  0 15  0.0-0.559808686376D-04-0.272848410532D-11 0.108600000000D+05
-0.350348437500D+04-0.255325126648D+01 0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
0.106803754883D+05-0.182923507690D+01 0.000000000000D+00 0.400000000000D+01
0.228762856445D+05 0.447064399719D+00-0.186264514923D-08 0.300000000000D+01
-----|----1|0----|----2|0----|----3|0----|----4|0----|----5|0----|----6|0----|----7|0----|----8|
12 98  2 15  0 15  0.0 0.199414789677D-04-0.181898940355D-11 0.108900000000D+05
0.131731816406D+05-0.143945598602D+01 0.372529029846D-08 0.000000000000D+00
0.171148715820D+05-0.118937969208D+01 0.931322574615D-09 0.220000000000D+02
0.135737919922D+05 0.288976097107D+01-0.931322574615D-09 0.300000000000D+01
-----|----1|0----|----2|0----|----3|0----|----4|0----|----5|0----|----6|0----|----7|0----|----8|

```

Рисунок 5.3 — Пример файла формата RINEX

Алгоритм определения положения спутников GPS

Для системы GPS алгоритм базируется на решении уравнения Кеплера с использованием параметров орбиты. Алгоритм состоит из следующих вычислений [3]:

- определение поправки для перехода от бортовой шкалы измерения времени к системной шкале;
- получение времени излучения метки времени по системной шкале;
- вычисление средней аномалии НИСЗ на момент излучения метки времени (средняя аномалия эпохи);
- решение уравнения Кеплера итерациями для расчёта эксцентрической аномалии НИСЗ;
- вычисление члена за релятивистский эффект в уравнение поправки перехода от бортовой шкалы измерения времени к системной шкале;
- произведение расчета истинной аномалии НИСЗ на момент излучения временной метки по системной шкале;
- вычисление предварительный аргумент широты. Процесс продолжаем до тех пор, пока не достигается нужная точность;
- вычисление исправленный аргумент широты за счёт;

- вычисление радиуса-вектора НИСЗ GPS на момент излучения метки времени по системной шкале;
- вычисление наклона возмущённой плоскости орбиты к плоскости экватора;
- вычисление координат НИСЗ в плоскости орбиты;
- вычисление долготы восходящего узла орбиты НИСЗ;
- вычисление матрицы орбита – геодезия;
- вычисляем прямоугольные координаты НИСЗ GPS без учёта времени распространения сигнала до потребителя;
- вычисляем прямоугольные координаты НИСЗ GPS с учётом времени распространения сигнала от НИСЗ до потребителя.

Определение положения спутников ГЛОНАСС

Для определения местоположения спутников системы ГЛОНАСС используют численные методы решения дифференциальных уравнений [14]. Уравнения движения (5.38)-(5.39) интегрируются в прямоугольной абсолютной (инерциальной) геоцентрической системе координат $OX_0Y_0Z_0$, связанной с текущим экватором и точкой весеннего равноденствия, методом Рунге-Кутты четвертого порядка:

$$\frac{dX_0}{dt} = V_{X_0}; \quad \frac{dY_0}{dt} = V_{Y_0}; \quad \frac{dZ_0}{dt} = V_{Z_0} \quad (5.38)$$

$$\frac{dX_0}{dt} = -\bar{\mu} \cdot \bar{X}_0 + \frac{3}{2} \cdot C_{20} \bar{\mu} \cdot \bar{X}_0 \cdot \rho^2 \cdot (1 - 5 \cdot \bar{Z}_0) + j_{X_0s} + j_{X_0m} \quad (5.39)$$

$$\frac{dY_0}{dt} = -\bar{\mu} \cdot \bar{Y}_0 + \frac{3}{2} \cdot C_{20} \bar{\mu} \cdot \bar{Y}_0 \cdot \rho^2 \cdot (1 - 5 \cdot \bar{Z}_0) + j_{Y_0s} + j_{Y_0m} \quad (5.40)$$

$$\frac{dZ_0}{dt} = -\bar{\mu} \cdot \bar{Z}_0 + \frac{3}{2} \cdot C_{20} \bar{\mu} \cdot \bar{Z}_0 \cdot \rho^2 \cdot (1 - 5 \cdot \bar{Z}_0) + j_{Z_0s} + j_{Z_0m} \quad (5.41)$$

где $\bar{\mu} = \frac{\mu}{r^2}$ – средняя константа гравитационного поля Земли;

$\rho = \frac{a_e}{r_0}$ – безразмерная величина;

- $r_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}$ – радиус-вектор, м;
 $\bar{X}_0 = \frac{X_0}{r}$ – безразмерная величина;
 $\bar{Y}_0 = \frac{Y_0}{r}$ – безразмерная величина;
 $\bar{Z}_0 = \frac{Z_0}{r}$ – безразмерная величина;
 $j_{X_0s}, j_{Y_0s}, j_{Z_0s}$ – ускорения от солнечных гравитационных возмущений;
 $j_{X_0m}, j_{Y_0m}, j_{Z_0m}$ – ускорения от лунных гравитационных возмущений;
 r – экваториальный радиус Земли, равный 6378.136 км;
 μ – константа гравитационного поля Земли, равная 398600.4418 км³/с²;
 a_e – большая полуось орбиты Земли
 C_{20} – коэффициент при второй зональной гармонике разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям, равный минус 1082.62575·10⁻⁶ $C_{20} = \sqrt{5} \cdot \bar{C}_{20}$;
 \bar{C}_{20} – нормализованное значение гармонического коэффициента при второй зональной гармонике, равное 484.16495·10⁻⁶).

5.2.2 Определение средней взвешенной температуры

Из описания вертикальной влажной задержки радиосигналов (5.34) видно, что необходимо определить среднюю взвешенную температуру по формуле:

$$T_m = \int_{z_0}^{\infty} \frac{e}{T} dz \cdot \left[\int_{z_0}^{\infty} \frac{e}{T^2} dz \right]^{-1} \quad (5.42)$$

где e – парциальное давление водяного пара на высоте z , Па;

T – температура воздуха на высоте z , К.

Нетрудно понять, что средняя «взвешенная» температура имеет региональный характер, то есть она для разных районов будет различна.

Средняя взвешенная температура получается экспериментальным путем, а именно, с помощью данных радиозондирования и выражается следующим образом:

$$T_m = a_t + b_t \cdot T_0 \quad (5.43)$$

где a_t, b_t – эмпирические коэффициенты a_t, K ;

T_0 – приземная температура воздуха, К .

На рисунке 5.4 иллюстрируется метод получения средней «взвешенной» температуры.

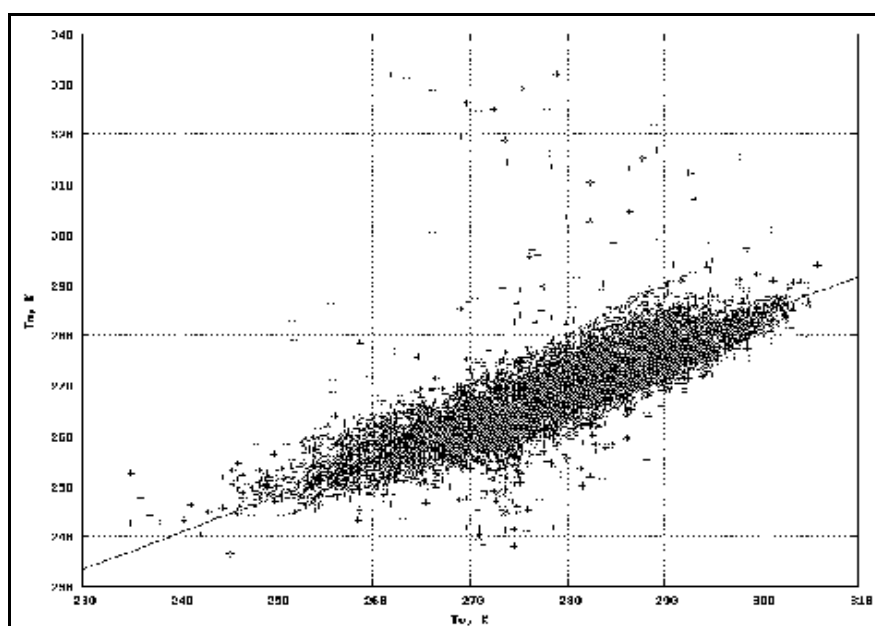


Рисунок 5.4 — К определению средней «взвешенной» температуры

Таблица — Эмпирические коэффициенты a_t, b_t в различных районах [15]

Пункт	a_t, K	b_t
Санкт-Петербург	65.48 ± 0.83	0.73 ± 0.01
Бологое	63.28 ± 1.01	0.74 ± 0.01
Великие Луки	76.23 ± 0.91	0.70 ± 0.01
Казань	67.35 ± 0.80	0.72 ± 0.01

Смоленск	67.39±0.89	0.73±0.01
Тура	107.23±0.95	0.58±0.01
Ванавара	100.74±1.07	0.60±0.01
Вилюйск	95.65±0.80	0.62±0.01
Оленек	109.16±0.90	0.57±0.01

5.2.3 Получение вертикальной задержки во влажном воздухе с помощью данных ГНСС

Вертикальная влажная задержка радиосигналов определяется влагосодержанием водяного пара в атмосфере поэтому точность его определения зависит от точности определения влажной части задержки радиосигналов. Из формул (5.4) и (5.25) получим следующую формулу:

$$M_h(\beta) \cdot \Delta L_h^z + M_w(\beta) \cdot \Delta L_w^z = \Delta L - (\Delta L^{ion} + \Delta \tau \cdot c + \delta + \xi) \quad (5.44)$$

Первый способ определения влажной части задержки

Если имеем псевдодальность, измеренную по кодовому методу, и известны координаты спутников и приемников, то можно получить влажную часть задержки по формуле:

$$\Delta L_w^z = \frac{L_1^{KO} - L - M_h(\beta) \cdot \Delta L_h^z - (\Delta L_{ion} + \Delta \tau \cdot c + \delta + \xi)}{M_w(\beta)} \quad (5.45)$$

где ΔL_w^z – вертикальная влажная задержка радиосигналов, м;
 L_1^{KO} – псевдодальность, измеренная по кодовому методу, м;
 L – геометрическая дальность, м.

Второй способ определения влажной части задержки

Из формулы (5.45) видно, что нам необходимо знать ионосферную задержку, систематическую и случайную ошибку. Из всех перечисленных,

определение только ионосферной задержки не предоставляет нам большой трудности, а расчет остальных представляет трудоемкую задачу.

Теперь если мы используем два последовательных измерения по кодовому методу и на двух частотах, то можем определить влажную задержку по другому способу:

$$\Delta L_w^z = \frac{0.5 \cdot (L_k^{KO} - L_{k-1}^{KO}) + 0.5 \cdot (L_k^{\Phi A} - L_{k-1}^{\Phi A}) - (L_k - L_{k-1}) - \Delta L_h^z \cdot [M_h(\beta_k) - M_h(\beta_{k-1})] + \sqrt{2} \cdot \xi}{M_h(\beta_k) - M_h(\beta_{k-1})}$$

где L_k^{KO} – псевдодальность, измеренная по кодовому методу, м;
 $L_k^{\Phi A}$ – псевдодальность по фазе, м;
 k – индекс, показывающий номер измерения.

По данному подходу нам не нужна ионосферная задержка и можно забыть о систематической ошибке и также о сдвиге шкал времени, но при этом случайная ошибка увеличивается в $\sqrt{2}$ раз.

5.2.4 Получение значений интегрального количества водяного пара с помощью вертикальной влажной задержки радиосигналов

Под интегральным количеством водяного пара во вертикальной столбе понимают массу водяного пара, отнесенную к единице площади. Интегральное количество водяного пара измеряется в кг/м² или в мм и определяется по формуле:

$$PWV = \int_{z_0}^{\infty} \rho_v dz \quad (5.47)$$

где PWV – интегральное количество водяного пара, мм;
 ρ_v – плотность водяного пара, кг/м³;

В формулу для определения вертикальной влажной задержки радиосигналов (5.34) входит слагаемое $\int_{z_0}^{\infty} \frac{e}{T} dz$, которое зависит от количества водяного пара следующим образом:

$$\int_{z_0}^{\infty} \frac{e}{T} dz = R_v \cdot \int_{z_0}^{\infty} \rho_v dz \quad (5.48)$$

где R_v - газовая постоянная влажного воздуха, равная 461.526 Дж/кг·К

Из формул (5.34) и (5.47) можно написать следующую формулу:

$$\Delta L_w^z = 10^{-6} \cdot \left(k_2' + \frac{k_3}{T} \right) \cdot R_v \cdot \int_{z_0}^{\infty} \rho_v dz = Q \cdot PWV \quad (5.49)$$

где $Q = 10^{-6} \cdot \left(k_2' + \frac{k_3}{T} \right) \cdot R_v$

Отсюда получаем выражение для интегрального количества водяного пара в вертикальной столбе воздуха:

$$PWV = \frac{\Delta L_w^z}{Q} \quad (5.50)$$

5.3 Оценка научной и практической значимости метода

Для оценки научной и практической значимости нового метода зондирования водяного пара были взяты метеорологические данные на станции Светлое из [16], данные о тропосферной задержке, полученной на той же станции, взяты из [17]. Эти данные получают в формате RINEX за каждые 10 мин и соответствуют периоду с 02.05.2010 по 08.05.10.

Рассмотрим некоторые результаты в использовании нового метода зондирования водяного пара. И так рисунок 5.5 - а построен на основе задержек радиосигналов при разных углах места навигационного спутника. Видно, что задержка больше когда спутник летит ближе к горизонту. Такая же картина получилась с помощью тропосферной модели. В качестве примера рисунок 5.5 - б показывает модельную зависимость задержки

радиосигнала в тропосфере от высоты навигационного спутника над горизонтом при стандартных значениях метеорологических величин.

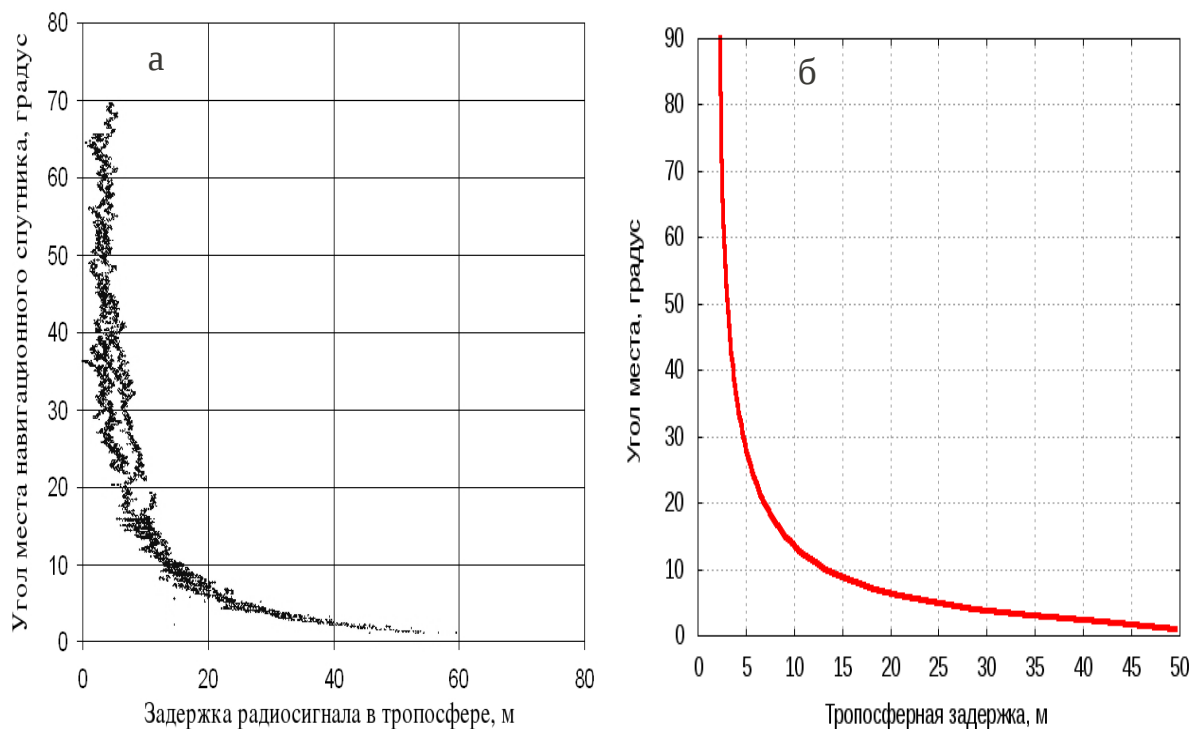


Рисунок 5.5 – Зависимость задержки радиосигнала в тропосфере от высоты навигационного спутника над горизонтом
а) на регистрации данных со спутников;
б) с помощью модели.

В главе 4 мы говорили о том, что влажная задержка составляет всего лишь 10% от тропосферной, а определение гидростатической задержки радиосигналов играет большую роль в точности влажной задержки.

Рисунок 5.6 показывает вклад каждой из составляющих общей тропосферной задержки. Видно, что преимущественно имеет гидростатическая задержка, которая главным образом зависит от давления.

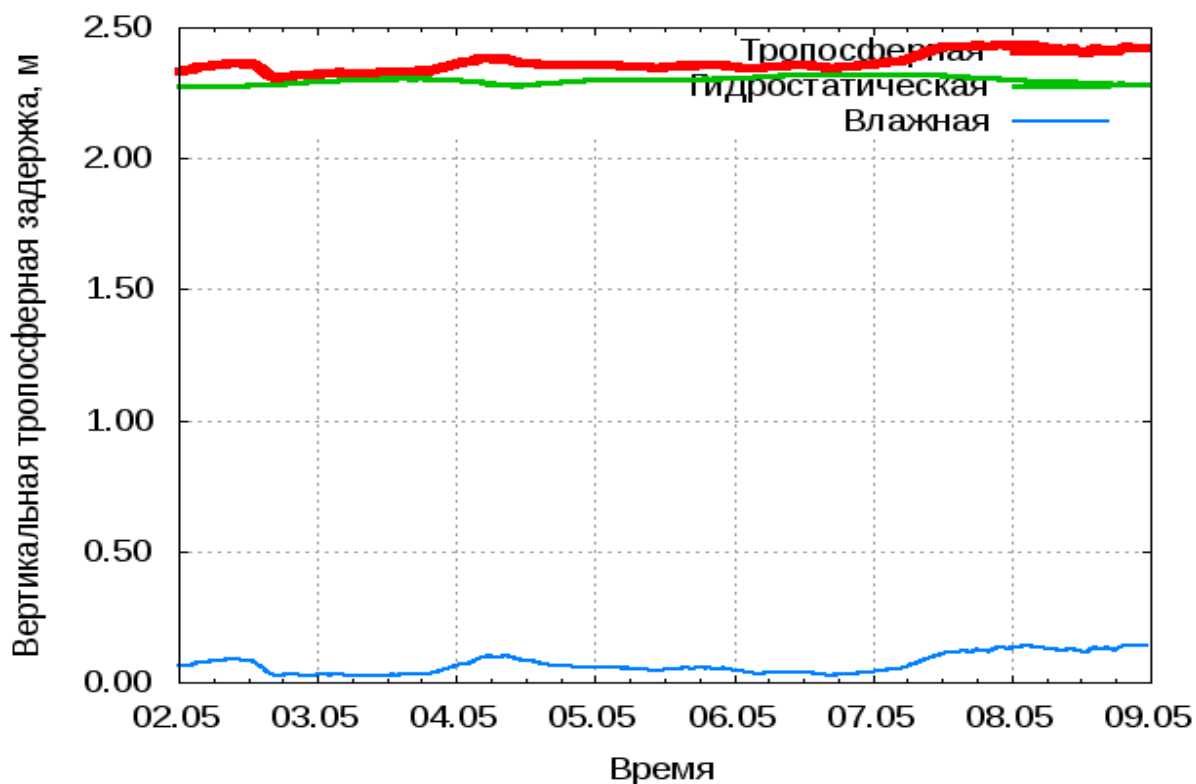


Рисунок 5.6 – Изменение задержек радиосигналов на станции «Светлое» за период с 02.05 по 08.05.2010

На рисунке 5.7 представлены ходы изменения общей тропосферной и гидростатической задержек на станции «Светлое» за период с 02.05 по 08.05.2010. Согласно данному графику можно увидеть, что за взятый период наблюдаются три максимума разности между тропосферной и гидростатической задержками.

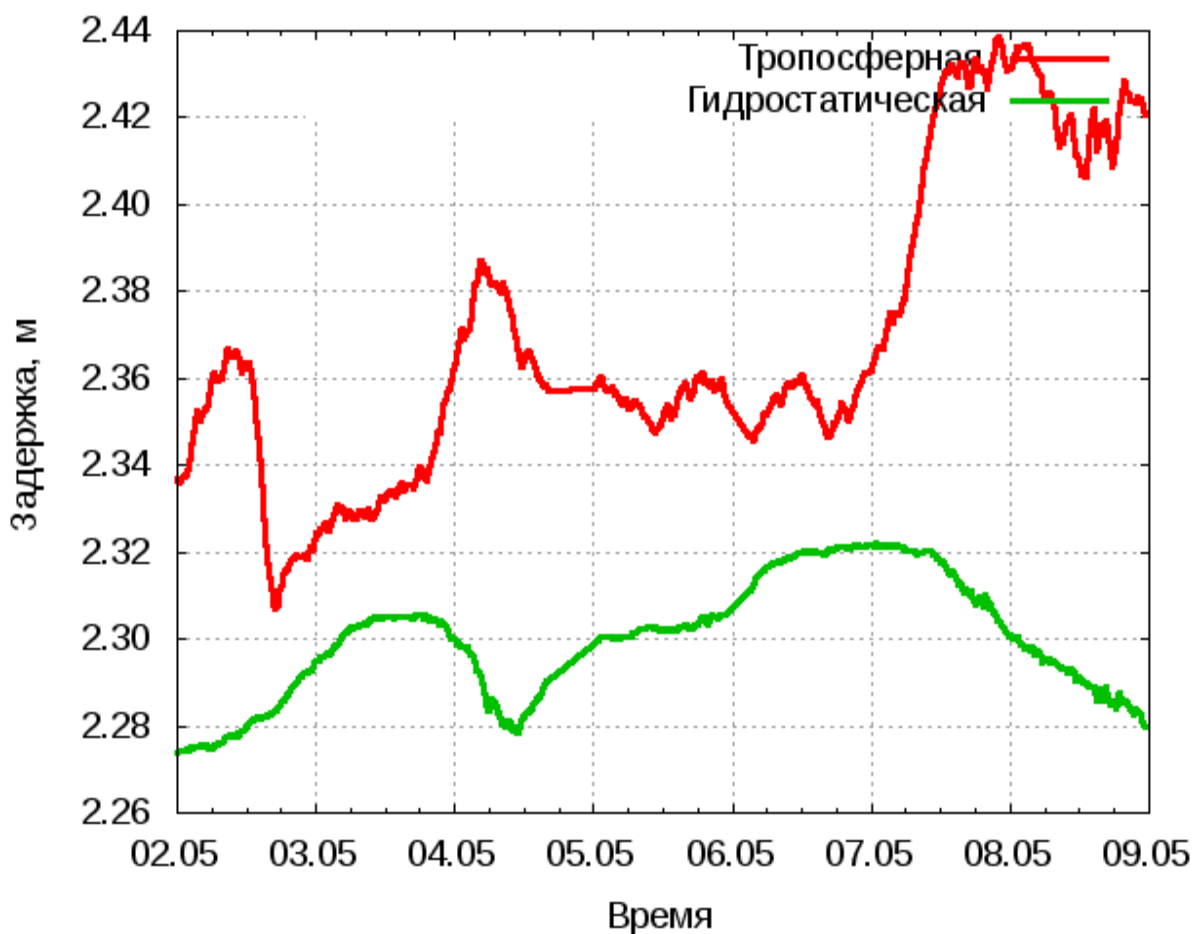


Рисунок 5.7 – Изменение влажной задержки радиосигналов на станции «Светлое» за период с 02.05 по 08.05.2010

Какова причина такого изменения значений задержек? Давайте обсудим это! Кажется, что влажная задержка радиосигналов так же важна при решении навигационных задач, а причина этой части задержки заключается в наличии в атмосфере водяного пара.

Посмотрим на рисунке 5.8! Нам не трудно видеть, что максимальные значения влажной задержки соответствует максимумам разности между тропосферной и гидростатической задержками, которые нам хорошо видны из рисунка 5.7. Максимальная влажная задержка радиосигналов составляет свыше 14 см, а минимальная — около 2 см. Эти значения характерны для данного выбранного района.

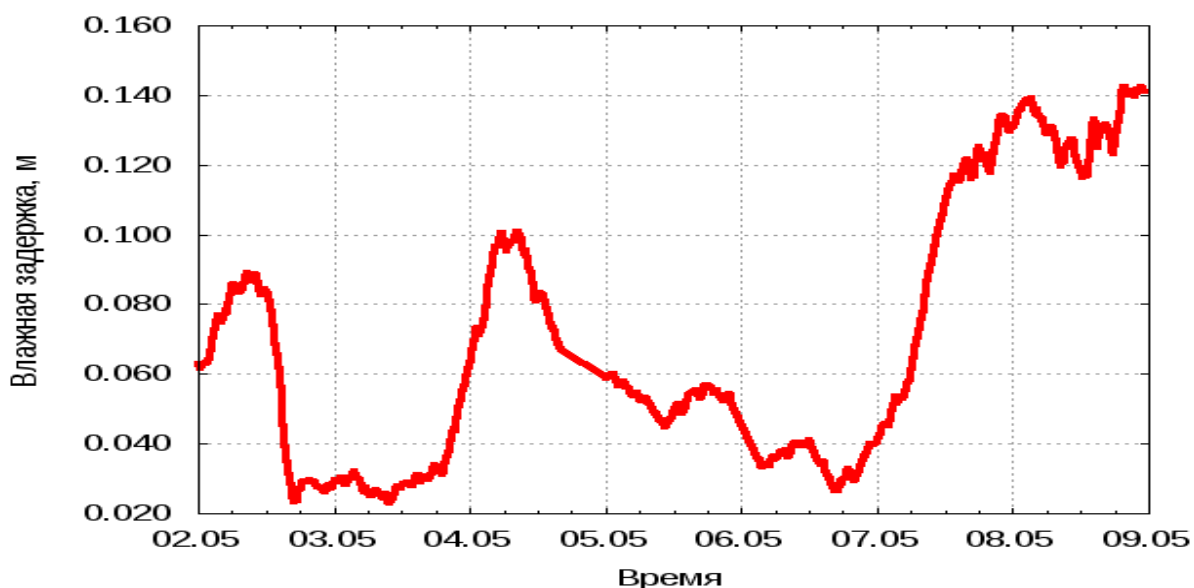


Рисунок 5.8 – Изменение влажной задержки радиосигналов на станции «Светлое» за период с 02.05 по 08.05.2010

Для более объективной оценки мы будем анализировать характер изменения метеорологических величин за данный период. На рисунках 5.9, 5.10 и 5.11 представлены графики изменения приземных значений атмосферного давления, парциального давления водяного пара и температуры воздуха:

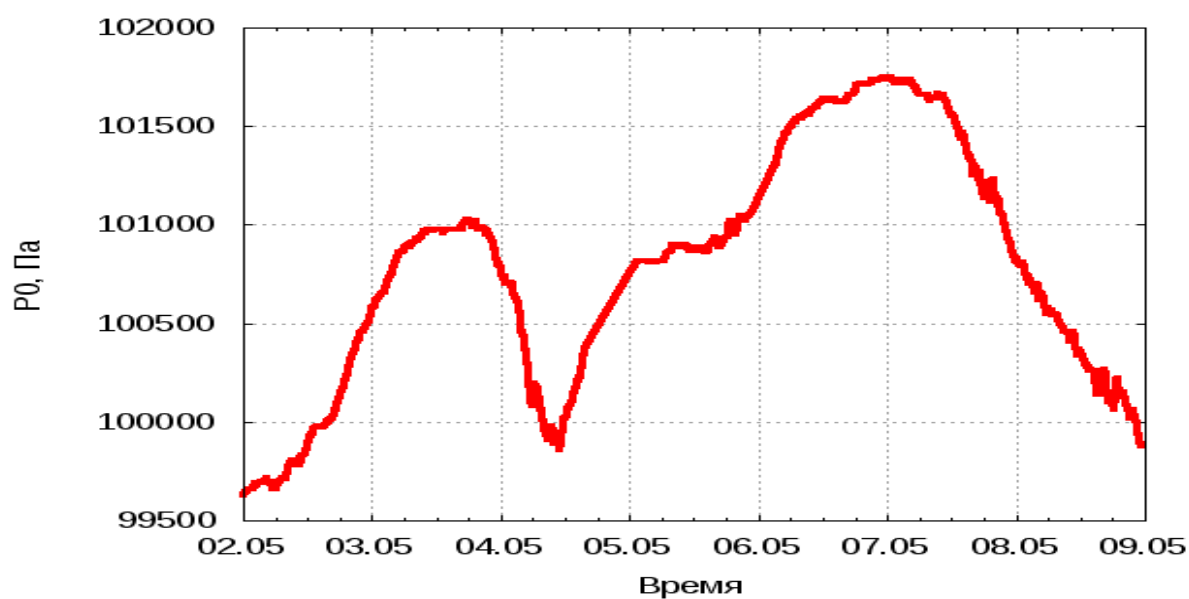


Рисунок 5.9 – Изменение атмосферного давления над станцией «Светлое» за период с 02.05 по 08.05.2010

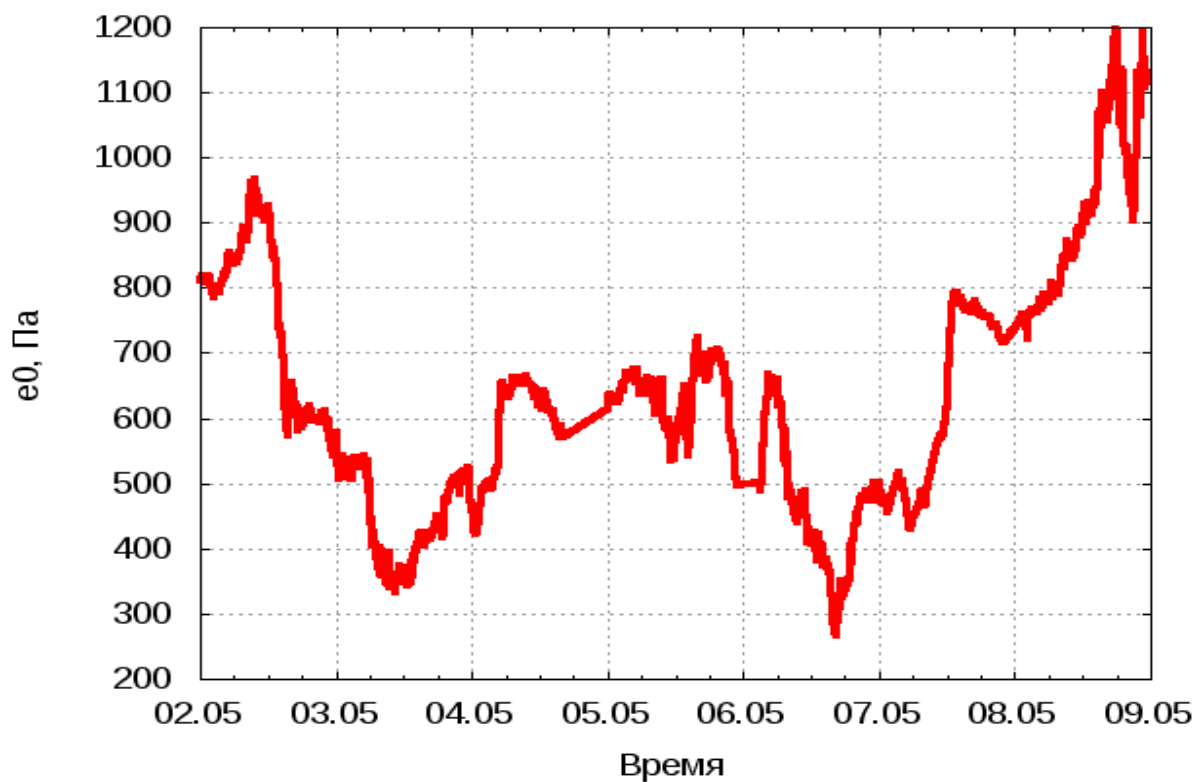


Рисунок 5.10 – Изменение парциального давления водяного пара над станцией «Светлое» за период с 02.05 по 08.05.2010

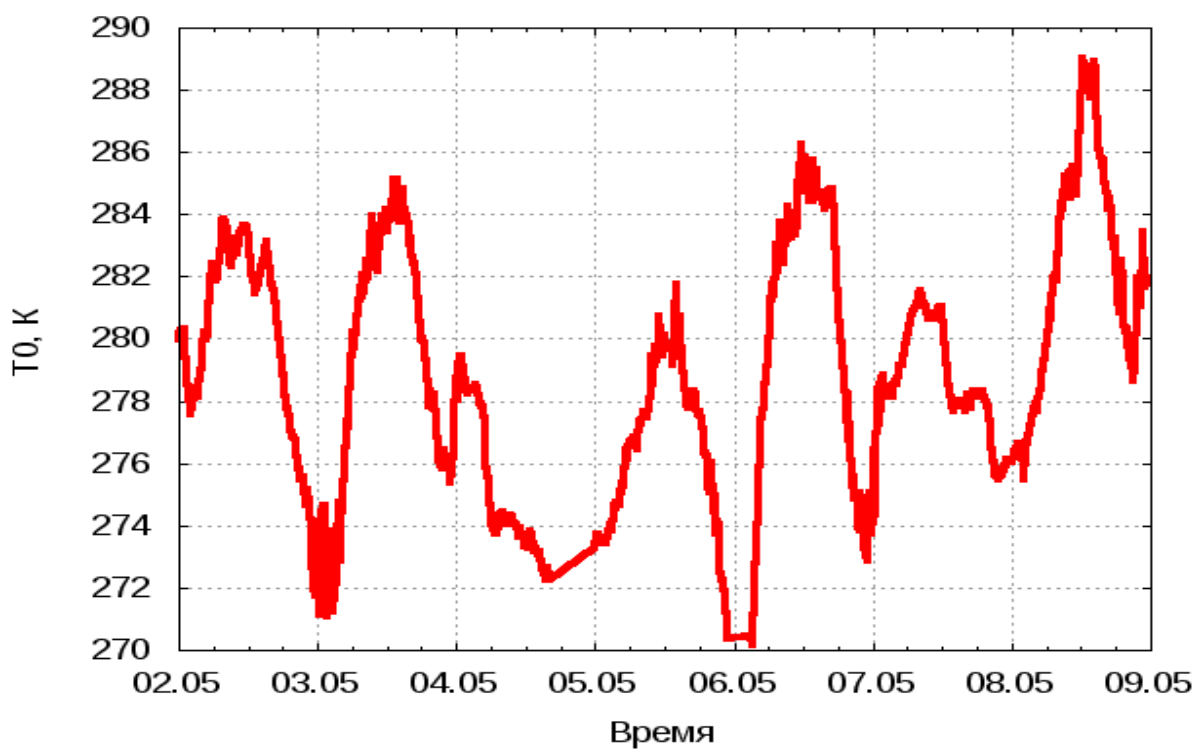


Рисунок 5.11 – Изменение температуры воздуха на станции «Светлое» за период с 02.05 по 08.05.2010

Проанализировав рисунки 5.9, 5.10 и 5.11 можно сказать, что влажная задержка в большей степени зависит от атмосферного давления и парциального давления водяного пара так, как гидростатическая задержка определяется главным образом приземным давлением поэтому зависимость влажной задержки от приземного давления обратная. Это можно увидеть, глядя на рисунки 5.8 и 5.9. Рисунки 5.8 и 5.10 в свою очередь нам показывают прямую зависимость влажной задержки от приземного парциального давления водяного пара. А как видно из рисунка 5.11, зависимость влажной задержки радиосигналов от температуры однозначно трудно говорить.

На основе взятых данных было рассчитано по модели значение интегрального количества водяного пара над станцией «Светлое». На рисунке 5.12 представлена его изменчивость за период с 02.05 по 08.05.2010.

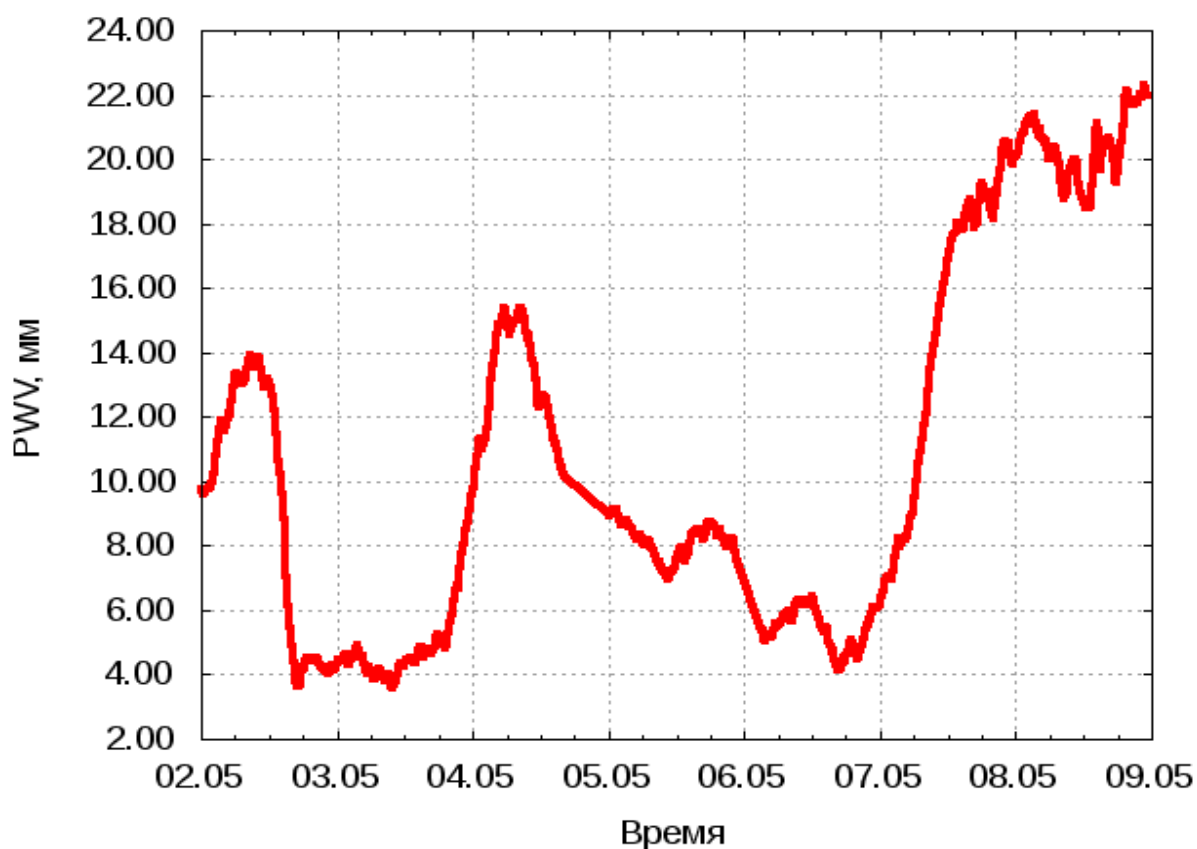


Рисунок 5.12 – Изменчивость интегрального количества водяного пара над станцией «Светлое» за период с 02.05 по 08.05.2010

Мы видим, что кривая, изображенная на рисунке 5.12, соответствует кривой влажной задержки на рисунке 5.8. За данный период общее содержание водяного имеет три значения максимума. Максимальное его значение наблюдается в ночь 8-го мая и составляет свыше 22 мм.

Из сделанных анализов можно прийти к выводу, что метод дистанционного зондирования водяного пара с помощью навигационных приемников позволяет с хорошей точностью определить интегральное количество водяного пара в атмосфере поэтому он имеет большое практическое значение так, как знание об интегральном количестве водяного пара будет входить в качество исходных данных гидродинамических моделей, что уточняет прогнозы. Такой метод оперативен и имеет много преимуществ по сравнению с другими методами. Это заключается в экономической значимости, в простой реализации измерения водяного пара. И самым главным образом он позволяет с меньшим временным интервалом определить интегрального количества водяного пара.

В следующем пункте данной главы мы рассмотрим возможность развертывания сети ГНСС-приемников, которая бы служила измерениям водяного пара с целью ассимиляции данных в гидродинамические модели прогнозов погоды.

5.4 Эксплуатация сети навигационных приемников — ГНСС станций

Сбор данных измерений ГНСС-приемников в режиме реального времени осуществляется с помощью беспроводной сети, первичная информация о псевдодальностях от приемного устройства до спутников обрабатывается Java-приложением с помощью Virtual Java Machine (JVM) и передается по беспроводной сети (GPRS, EDGE, WiMAX) на сервер, где происходит вторичная обработка навигационной информации с учетом поправок на распространение радиосигнала в ионосфере и тропосфере,

уточненных параметров орбит спутников. Результаты вычислений координат местоположения ГНСС-приемников возвращаются через беспроводную сеть Java-приложению, которое отображает данную информацию пользователю. Данная сеть решает также задачу сбора навигационной информации в режиме реального времени по значительной площади для целей ассимиляции этих данных в численных моделях прогноза погоды.

На рисунке 5.13 представлен один из вариантов построения сети навигационных приемников:

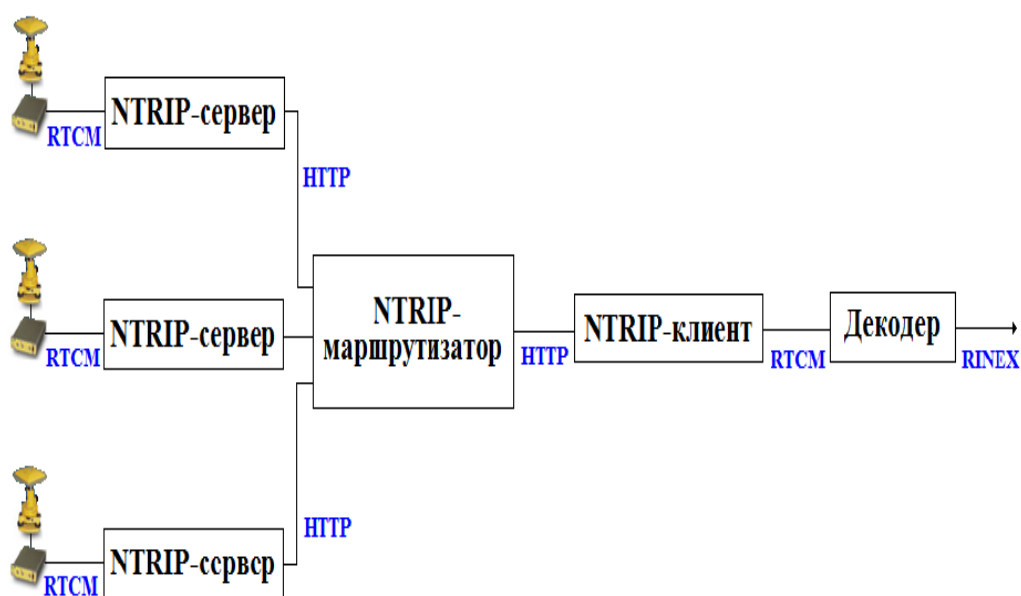


Рисунок 5.13 — Построение сети навигационных приемников

Здесь мы используем технология NTRIP для осуществления работы сети. Такая сеть позволяет передать информацию в центр, где с помощью программного обеспечения данные обрабатываются и передаются.

Предположение строения сети ГНСС-приемников имеет большое значение для тех районов, где очень редкая сеть станций, такие регионы как Вьетнам. Из работы с данным на станции «Светлое» нам удалось сопоставить полученное значение интегрального количества водяного пара с данными зондирования на станции «Воейково». На рисунке 5.14 показывается это сравнение:

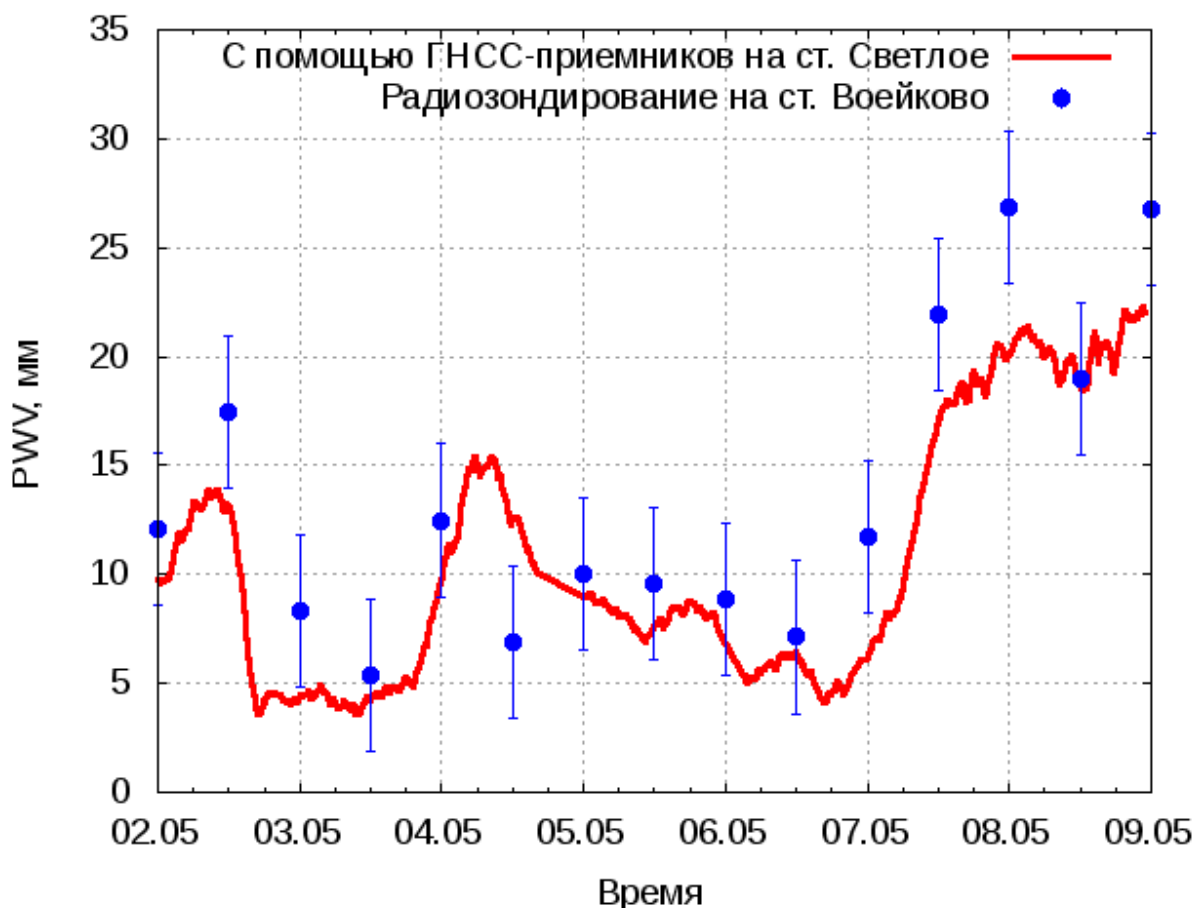


Рисунок 5.14 — Сравнение данных на аэрологической станции «Воейково» и полученных данных моделью на станции «Светлое»

На рисунке 5.14 точки отображают значение интегрального количества водяного пара на аэрологической станции «Воейково», а красная кривая — на станции «Светлое» с помощью ГНСС-приемников.

Согласно рисунку 5.14 можно сказать, что с точностью до 5 мм ГНСС-приемников может измерить водяной пар в радиусе около 100 км. И вот почему возникла идея построения сети ГНСС-приемников. Но такая точность очень невелика, значит нужно сгущать сеть. Бытовые ГНСС-приемники могут быть использованы в качестве ГНСС-станций. Для этого нужно разрабатывать комплексный пакет программ, который бы решил проблему определения псевдодалности с высокой точностью.

Метод дистанционного зондирования водяного пара сетью наземных навигационных приемников имеет большое практическое значение и

экономическую ценность в эксплуатации измерений поэтому будем рассматривать возможно ли построить сеть ГНСС-станций на территории Вьетнама. На рисунке 5.15 предполагается вариант создания сети ГНСС-приемников. Такая сеть своей эффективной работе будет улучшать качества прогнозов погоды путем ассимиляции данных в численные модели гидродинамических прогнозов.

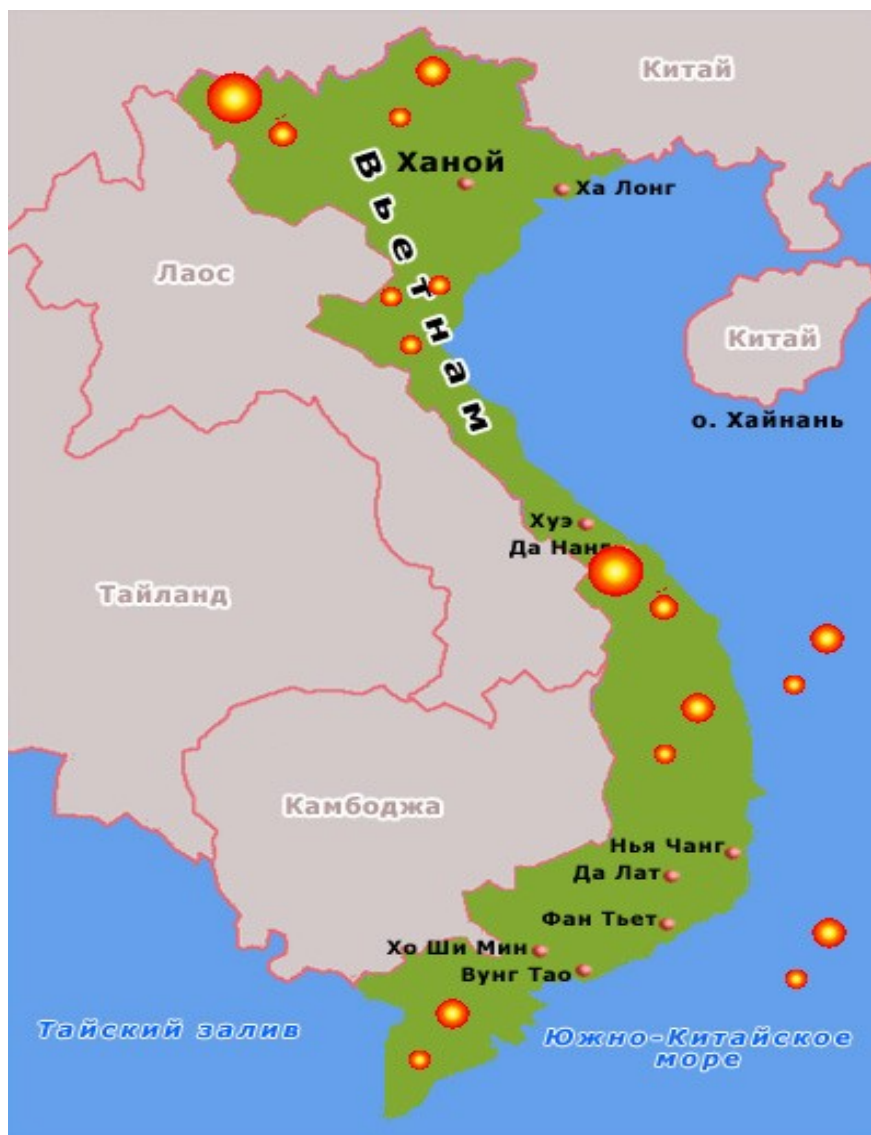


Рисунок 5.15 — Планировка эксплуатации сети ГНСС-станций

На рисунке 5.15 красные кружочки обозначает планируемые местоположения ГНСС-станций. Данные, полученные с помощью ГНСС-приемников, передаются через Интернет.

Заключение

Исходя из потребности получать гидрометеорологическую информацию оперативно и регулярно проделанная бакалаврская работа рассматривает возможность качественного использования спутниковых информационных данных для целей метеорологического обеспечения высокоточными прогнозами погоды.

Работа посвящена теоретическим основам разработки нового метода зондирования водяного пара в атмосфере и реализации метода программным комплексом. В результате проделанной работы были получены следующие результаты:

- физико-математическое описание модели тропосферной задержки радиосигналов;
- составление программ, которые помогают определить координаты спутников и приемников. Благодаря этому получили значения влажной задержки радиосигналов;
- разработка некоторых программ для обработки данных;
- оценка практического значения нового метода зондирования водяного пара;
- рассмотрение реализации метода зондирования водяного пара сетью навигационных приемников.

Новый метод зондирования водяного пара имеет ряд преимуществ:

- получение интегрального количества водяного пара с высоким временным разрешением;
- оперативность, "всепогодность" (независимость от наличия облаков), полная автоматизация, отсутствие расходных материалов при проведении дистанционного зондирования атмосферы;

- информация, получаемая этим методом, может быть использована в региональных численных моделях прогноза погоды с целью улучшения качества прогноза и его пространственной детализации.

В своем совершении метод дистанционного зондирования водяного пар сетью наземных навигационных приемников будет активно использован в системе оперативного мониторинга атмосферы.

Дальнейшие направления работы предусматривают совершение метода, разработку методов восстановления профиля метеорологических величин по высоте с помощью глобальных навигационных спутниковых систем.

Список использованных источников

- 1 Соловьев, Ю.А. Системы спутниковой навигации. [Текст] / Ю.А. Соловьев.– М.: Эко-Трендз, 2000. – 270 с .
- 2 Чукин В.В. Применение сетевых технологий при построении системы дистанционного зондирования атмосферы с помощью глобальной навигационной спутниковой системы [Текст] / В.В. Чукин // Успехи современного естествознания. – 2008. – №11. – С.58.
- 3 Гурин, С. Е. Спутниковые радионавигационные системы ГЛОНАСС/GPS на железнодорожном транспорте. [Текст] /. С. Е. Гурин – М.: МИИТ, 2004. – 55 с
- 4 Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces ICD– GPS–200 Revision C.: – ARINC RESEARCH CORPORATION, 1999.
- 5 Глобальная Спутниковая Радионавигационная Система ГЛОНАСС / Под ред. В. Н. Харисова, В. А. Болдина, А. И. Перова. – М.: ИПРЖ, 1999.
- 6 Shaowei Han. Carrier Phase-based long-range GPS kinematic positioning.– Shool of geomatic engineering university of new south wales Sydney, Australia, 1997.
- 7 Single point positioning using low cost single frequeny GPS receiver. - Faculty of Geoinformation Science and Engineering Universiti Teknologi Malaysia , 2005.
- 8 Иванов-Холодный Г.С., Ионосфера. БСЭ. – М.: Советская энциклопедия, 1969 – 1978.
- 9 Biomenhofer H. Untersuchungen zu hochpräzisen kinematischen DGPS - Echtzeitverfahren mit besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Fehlereinflüsse. – Universitat der Bundeswehr Munchen, Neubiberg, 1996.

- 10 Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Гидрометеоиздат, 1984г.
- 11 Бронштейн Г. С., Власов В. Д., Зайцева Н. С. и др. Инженерная геодезия. Учебник для вузов ж-д. Транспорта / Под ред. С. И. Матвеева. – М.: УМК МПС России, 1999 .
- 12 Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS Leveling/ F. Kleijer — NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie, Netherlands Geodetic Commission, Delft, The Netherlands 2004.
- 13 Gurtner W. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. Version 2.10 [Text] / Gpurtner W. – Astronomical Institute of Berne, 2000.
- 14 Bevis M. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning system [Text] / Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H. // J. Geophys. Res. – 1992. – Vol.97. – P.15787-15801.
- 15 ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 3-е, перераб. – М.: Радиотехника, 2005, 688с., ил.
- 16 GNSS DATA CENTER. - Режим доступа к архиву <http://igs.bkg.bund.de/file/index>
- 17 International GNSS Service (IGS). - Режим доступа к архиву <ftp://igs.eng.ign.fr/pub/igs/products/troposphere/2010/>