

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 50.388.2

Шкляник
Екатерина Ивановна

**Методы зондирования ионосферы Земли с помощью спутниковых
навигационных систем**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра
по специальности 1-39 80 01 «Радиосистемы и радиотехнологии»

Научный руководитель
Давыденко Игорь Николаевич
Кандидат технических наук, доцент

Минск 2023

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мониторинг земной ионосферы переходит на новый методический и технологический уровень, обусловленный полным развертыванием глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS и развитием алгоритмов решения обратных задач радиопросвечивания, предназначенных для определения параметров земной ионосферы. Этот переход является новой эрой в ионосферных исследованиях, поскольку основные свойства данных систем - возможность проводить измерения непрерывно во времени и пространстве в любой точке земного шара - непосредственно переносятся на ионосферный мониторинг и позволяют обеспечить исследование глобальных и региональных явлений в ионосфере.

Прогнозирование состояния ионосферы является одной из важнейших составляющих систем декаметрового радиосвязи. Несмотря на ряд недостатков, присущих радиосвязи этого диапазона длин волн, ее роль и место в общей системе связи остаются достаточно высокими. Это объясняется тем, что коротковолновая радиосвязь позволяет оперативно устанавливать прямую связь на больших расстояниях, включая труднодоступные водные и горные районы. Организация же постоянно действующих пунктов связи в таких регионах практически невозможна из-за отсутствия в них какой-либо инфраструктуры.

Работа средств радиосвязи коротковолнового диапазона во многом зависит от рефракционных свойств ионосферы на траектории распространения радиосигнала. Состояние ионосферы, как электрически заряженной среды, зависит от многих факторов естественного и антропогенного характера. Их влияние может приводить как к нарушениям качества радиосвязи в этом диапазоне, так и полному ее исчезновению на выбранной несущей частоте.

Учет фактического состояния ионосферы при анализе и прогнозировании работы радиосредств (прогнозирование значений максимально применимых частот (МППЧ)) в настоящее время затруднен из-за крайне ограниченного количества станций вертикального зондирования или же их полного отсутствия вдоль выбранного направления связи. Ликвидировать этот пробел можно только при наличии глобальной системы мониторинга ионосферы. Одним из элементов такой системы может быть глобальная навигационная спутниковая сеть, которая наилучшим образом подходит для решения поставленной задачи.

Преимущества использования глобальных навигационных систем для мониторинга ионосферы Земли заключаются в следующем:

- 1) использование существующих спутниковых сигналов;
- 2) наличие хорошо развитой сети наземных пунктов международной геодезической службы (IGS – International Geodynamics Service) и опорных региональных пунктов (CORS – Continuously Operating Reference Station);
- 3) применение для измерений стандартных двухчастотных навигационногеодезических приемников;
- 4) полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы не зависит от предположений о магнитном поле Земли вплоть до высоты 20000 км;
- 5) данные двухчастотных измерений могут быть получены из многих источников, например из баз данных IGS и CORS через интернет;
- 6) данные измерений содержат информацию о всей толще ионосферы и протоносферы;
- 7) базы данных IGS и CORS содержат измерения разных типов приемников в едином формате RINEX (Receiver Independent Exchange);
- 8) влияния поглощения в ионосфере и магнитного поля Земли на параметры радиоволн можно не учитывать, так как номиналы излучаемых спутниками сигналов $f_1 \approx 1,6$ ГГц МГц и $f_2 \approx 1,2$ ГГц достаточно высоки.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Исследование природы околоземного космического пространства представляет собой фундаментальную проблему, важную как для научных, так и прикладных целей. При её решении используют различные экспериментальные и модельные методы. С запуском космических аппаратов на околоземную орбиту начали развиваться спутниковые методы изучения окружающей среды.

Степень разработанности проблемы

Зондирование ионосферы Земли с использованием спутниковых навигационных систем является относительно новым научным направлением и находится в стадии своего становления. В стадии обсуждения находится вопрос возможных направлений использования систем дистанционного зондирования Земли с использованием спутниковых радионавигационных систем, в то время как принципы работы навигационных систем хорошо разработаны и эти системы находятся в стадии широкого практического использования в своем основном применении: определении местоположения потребителей. В то же время ясно, что без дополнительных доработок зондирование ионосферы Земли невозможно: необходимо использование специализированных навигационных приемников; сетей передачи информации и их протоколов; разработка методов определения полного электронного содержания и, что самое главное, их пересчета в высотные профили электронного содержания ионосферы. Что касается методов определения полного электронного содержания, то они хорошо разработаны, но остается неопределенность в доработках навигационных приемников, чтобы они могли решать дополнительные задачи в интересах зондирования ионосферы. В стадии интенсивных исследований в настоящее время находятся методы пересчета полного электронного содержания в высотные профили электронной концентрации. Отсутствует информация о необходимом числе и качестве измерений полного электронного содержания ионосферы для решения задачи определения высотного профиля ионосферы с требуемым качеством. Все еще актуальна задача формирования аппаратно-алгоритмического облика комплексов по определению высотного профиля ионосферы с использованием спутниковых радионавигационных систем. В условиях редкого пространственного размещения навигационных приемников актуальной задачей является пересчет параметров ионосферы по измерениям

ее локальных параметров с использованием пространственно-временных алгоритмов экстраполяции.

Цель и задачи исследования

Целью магистерской работы является разработка предложений по использованию зондирования ионосферы Земли с использованием спутниковых навигационных систем в интересах народного хозяйства. Для решения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

1. Анализ направлений использования спутниковых навигационных систем с дистанционной диагностикой ионосферы.
2. Анализ существующей группировки спутников глобальной навигационной системы.
3. Анализ ионосферы Земли и влияющих на нее факторов.
4. Рассмотреть методы определения параметров ионосферы с использованием СРНС.
5. Анализ аппаратного и алгоритмического обеспечения систем дистанционного зондирования ионосферы.
6. Провести моделирование системы дистанционного зондирования ионосферы.

Объект исследования

Системы дистанционного зондирования ионосферы Земли с использованием спутниковых радионавигационных систем.

Предмет исследования

Методы зондирования ионосферы Земли с помощью спутниковых радионавигационных систем.

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты известных исследований русских и зарубежных специалистов в области зондирования ионосферы.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

1. Обзор направлений использования спутниковых радионавигационных систем с дистанционной диагностикой ионосферы.
2. Анализ методов определения высотного профиля ионосферы с

использованием измерений полного электронного содержания.

3. Моделирование систем дистанционного зондирования ионосферы.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Обзор направлений использования спутниковых навигационных систем с дистанционной диагностикой ионосферы.
2. Анализ существующей группировки спутников глобальной навигационной системы.
3. Методы определения параметров ионосферы с использованием СРНС.
4. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение систем дистанционного зондирования ионосферы.
5. Моделирование системы дистанционного зондирования ионосферы.

Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 58-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск 2022г.) и Республиканской научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии» (г. Минск 2022г.), а также были опубликованы в научно-популярном журнале «Базис» (г. Минск 2022г.).

Публикации

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 3 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций. Общий объем публикаций 13 страниц.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе рассматриваются обзор литературы по теме исследования, а именно сама ионосфера и методы изучения её параметров, также рассмотрено практическое применение исследований ионосферы.

Во второй главе проведен анализ направлений использования спутниковых навигационных систем с дистанционной диагностикой ионосферы.

В третьей главе проведен анализ существующей группировки спутников глобальной навигационной системы.

В четвертой главе проведен анализ ионосферы Земли и влияющих на нее факторов.

В пятой главе рассмотрены методы определения параметров ионосферы с использованием СРНС.

В шестой главе проведен анализ аппаратного и алгоритмического обеспечения систем дистанционного зондирования ионосферы.

В седьмой главе проведено моделирование системы дистанционного зондирования ионосферы.

Общий объем диссертационной работы составляет 80 страниц. Из них 68 страниц основного текста, 19 иллюстраций, библиографический список из 62 наименований, список собственных публикаций соискателя из 3 наименований, 1 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводятся обоснование актуальности работы, а также выделены преимущества использования глобальных навигационных систем для мониторинга ионосферы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней даны понятия о самой ионосфере, рассматриваются слои ионосферы, а также распределение концентрации ионов и электронов, обращено внимание на характерные черты ионосферы, такие как изменчивость и неоднородность, рассмотрено практическое применение ионосферы.

Ионосфера - самая верхняя часть атмосферы Земли, ионизованная коротковолновым излучением Солнца и космическими лучами.

Установлено, что концентрация ионов и электронов в ионосфере распределена неравномерно по высоте: имеются слои, где она достигает максимума.

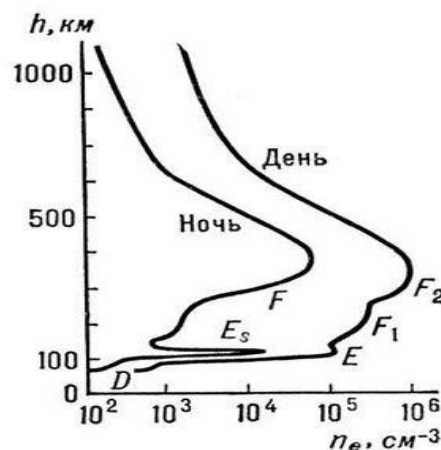


Рисунок 1 Распределение электронной концентрации в ионосфере

При переходе ото дня к ночи в области D концентрация электронов резко уменьшается и соответственно уменьшается поглощение радиоволн. В момент солнечных вспышек 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).

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 – 160 км величина концентрации электронов сильно уменьшается, однако в области E на высотах 100 – 120 км обычно сохраняется довольно высокая

концентрация. На высотах областей D и E часто наблюдают кратковременные необычайно узкие слои повышенной ионизации (так называемые спорадические слои E_s), состоящие в основном из ионов металлов. За счёт E_s возможно дальнейшее распространение телевизионных передач.

Концентрация ионов O⁺ становится больше 50% выше уровня 170 – 180 км днём и выше 215 – 230 км утром, вечером и ночью. Выше и ниже этого уровня условия образования ионосферы совершенно различны. Так, днём в области максимума ионизации коротковолновым излучением Солнца, когда он расположен ниже этого уровня, образуется слой F₁. Поэтому слой F₁ регулярно наблюдается на ионограммах только при большой высоте Солнца над горизонтом, преимущественно летом и в основном при низкой активности солнца, а в максимуме активности зимой он вообще не наблюдается. Выше указанного уровня создаются благоприятные условия для образования области F₂. Поведение главного максимума ионизации, или области F, является очень сложным, оно коренным образом отличается от поведения областей E и F₁. Так, хотя в среднем электронная концентрация в слое F₁ определяется солнечной активностью, но ото дня ко дню она сильно изменяется. Сезонной аномалией называется необычное увеличение концентрации электронов зимой по сравнению с летним сезоном.

К характерным чертам ионосферы относятся изменчивость и неоднородность. Классификация ионосферных неоднородностей производится по их пространственно-временным масштабам, скорости перемещения, величине изменения концентрации электронов. К основным типам ионосферных возмущений относят: крупномасштабные, среднемасштабные, мелкомасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (КМ ПИВ, СМ ПИВ, ММ ПИВ, соответственно), ионосферные неоднородности промежуточного масштаба (ПМ ИН), ударно-акустические волны (УАВ), внезапные ионосферные возмущения (ВИВ).

Знание высотного распределения электронной концентрации ионосферы чрезвычайно важно для решения многих научных и прикладных задач в области радиосвязи, радионавигации, радиовещания, а также транспортных, геодезических, геофизических, экологических и других проблем.

Вторая глава посвящена анализу направлений использования спутниковых радионавигационных систем, где мы выяснили, что радиосигналы, непрерывно излучаемые СРНС, предоставляют широкие возможности для осуществления исследований ионосферы различными методами.

С их помощью мы можем исследовать различные ионосферные структуры, а именно: провалы ионизации, авроральный овал, волновые и квазиволновые структуры, перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), «блобы», «пятна», «пузыри», «языки» ионизации, ионосферные «следы» корпускулярные ионизации т.д.

Третья глава анализирует существующие группировки СГНС, рассматриваются их структура, достоинства и недостатки.

В четвертой главе более детально рассмотрена ионосфера и влияющие на нее факторы, кроме того, рассмотрена геометрия зондирования ионосферы сигналами ГНСС.

Рассмотрим системы координат, на рисунках 2, 3 схематически представлены геометрия зондирования ионосферы сигналами НИСЗ и используемые системы координат. При решении задач трансionoсферного зондирования применяется несколько систем координат, две основные из которых – геоцентрическая (ГСК) и топоцентрическая (ТСК).

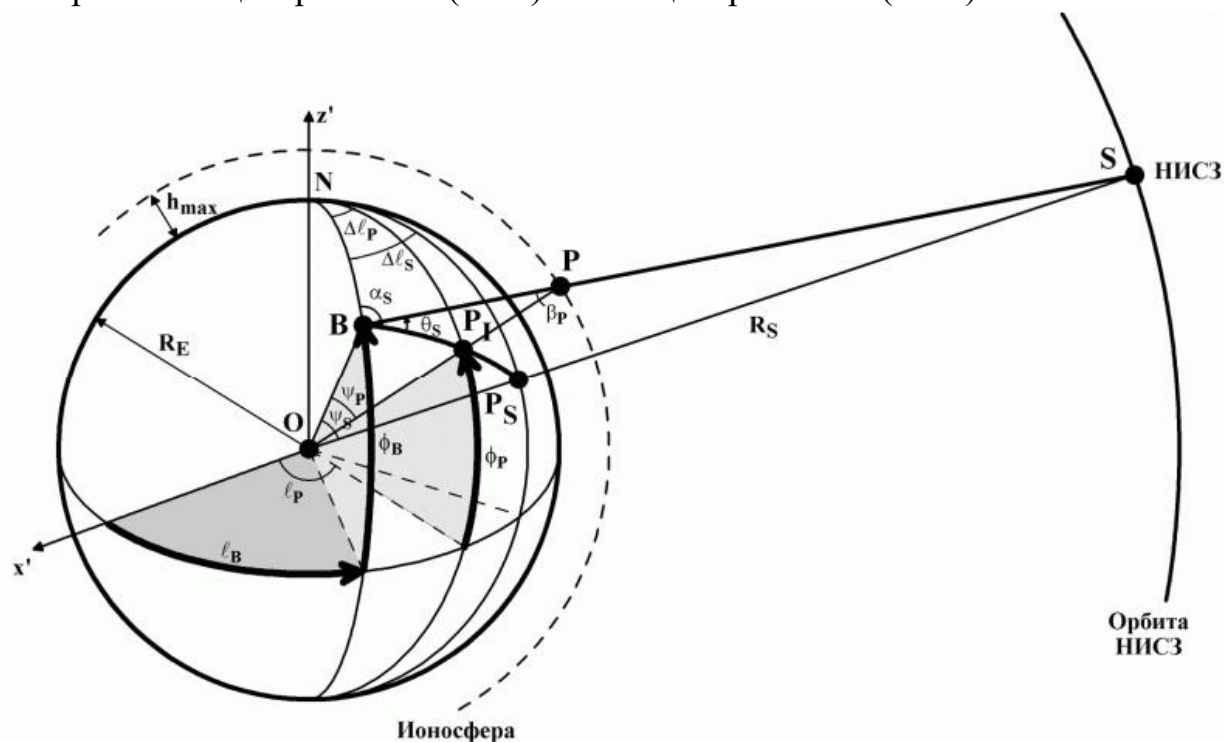


Рисунок 2 Геометрия зондирования ионосферы сигналами ГНСС: т. О – центр земного шара; т. В – приемник ГНСС (пункт наблюдений); S – навигационный спутник ГНСС; h_{max} – высота максимума ионизации (слой F_2); P, P_1 , P_2 – ионосферная, подионосферная, подспутниковая точки, соответственно (по материалам).

За центр ГСК (т. О) принимается центр масс Земли (Рисунок 3а). При этом считается, что Земля имеет форму шара с радиусом R_E . Широко используются сферические (радиус-вектор r' , широта φ , долгота l) и геодезические (широта Φ , долгота Λ , высота H) геоцентрические координаты. Геоцентрическая широта и долгота совпадают с географической широтой и долготой. Геодезические координаты определяют положение точки относительно эллипсоида, который более точно характеризует форму Земли.

Центром ТСК (т. В) может служить любая точка на поверхности Земли с известной географической широтой φ_B и долготой l_B . Оси x, y, z направлены, соответственно, на восток, на север, в зенит. Плоскость xBy соответствует плоскости горизонта. Сферические топоцентрические координаты (Рисунок 3б): r (радиус-вектор), θ (угол места, который отсчитывается от плоскости xBy), α (азимут, который отсчитывается от оси y).

Для описания орбитального движения НИСЗ вводятся две дополнительных геоцентрических системы координат (Рисунок 3в-г): инерциальная система координат (ГСК_и) и орбитальная система координат (ГСК_ω). Обе эти системы, в отличие от ГСК, не принимают участие в суточном движении Земли, являются в этом смысле неподвижными. Ось $x'_и$ ГСК_и направлена в точку весеннего равноденствия. Угол s_0 , отсчитываемый в плоскости экватора от точки весеннего равноденствия против хода часовой стрелки до Гринвичского меридиана определяет среднее звездное время: $s_0 = s_{00} + 0.985647348 \cdot d + \omega_E t$, где ω_E - угловая скорость вращения Земли; t – мировое время в секундах от 0 часов текущей даты; s_{00} - среднее звездное время на 0 часов всемирного времени условной опорной даты; d – целое число суток от 0 часов всемирного времени опорной даты до 0 часов текущей даты. ГСК_и соответствует система сферических координат: радиус-вектор r' , прямое восхождение η , склонение δ (Рисунок 3в). ГСК_ω связана с НИСЗ: плоскость $x'_\omega O y'_\omega$ совпадает с плоскостью орбиты НИСЗ; ось x'_ω направлена в точку пересечения орбиты спутника с плоскостью экватора, ось y'_ω – в сторону движения спутника перпендикулярно оси x'_ω . Ориентацию плоскости орбиты характеризуют прямое восхождение восходящего узла Ω_0 и угол наклона Ω_i орбиты. Переходы между подвижной и неподвижными геоцентрическими системами координат осуществляются с помощью преобразований координат.

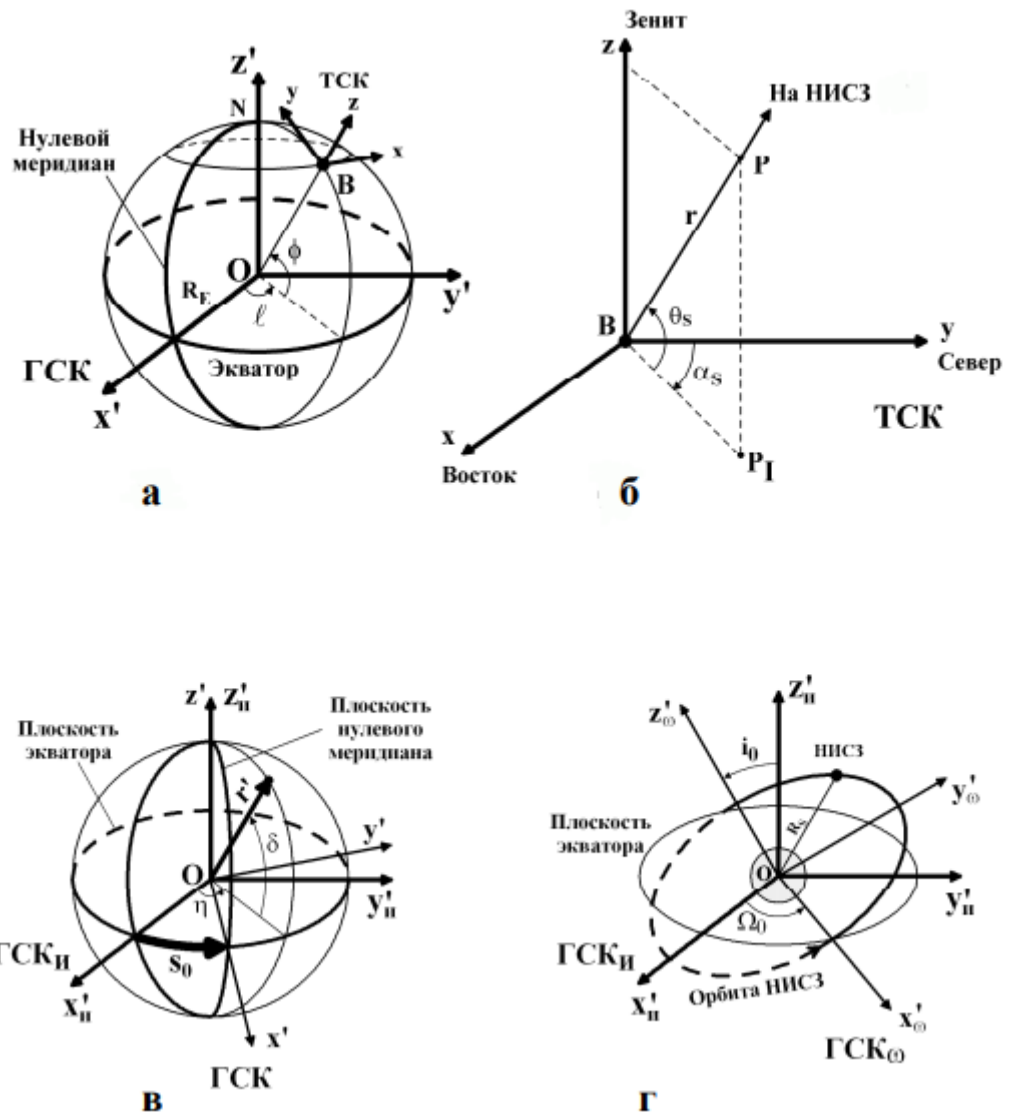


Рисунок 3 Используемые системы координат: геоцентрическая (а), топоцентрическая (б), геоцентрическая инерциальная (в), геоцентрическая орбитальная (г).

При зондировании ионосферы сигналами ГНСС ПЭС рассчитывается вдоль луча "приемник-НИСЗ". Ориентация луча в пространстве задается его углом места θ_s и азимутом α_s (Рисунок 2), которые вычисляются по геоцентрическим координатам НИСЗ x'_s, y'_s, z'_s . Значения x'_s, y'_s, z'_s , в свою очередь, определяются по информации об эфемеридах НИСЗ, которая содержится в навигационном сообщении.

Далее координаты α_s, θ_s можно определять разными методами. Можно применять формулы преобразования координат. Это удобно, т.к. напрямую связывает α_s и θ_s с геоцентрическими координатами НИСЗ x'_s, y'_s, z'_s .

Данное преобразование используется тогда, когда форму Земли можно считать шаром.

В практике расчета орбит ИСЗ и ГНСС-измерений принято определять азимут и угол места ИСЗ на основе геодезических координат ИСЗ и точки наблюдения:

$$\alpha_S = \arccos \left(\frac{\sin \Phi_S - \sin \Phi \cos \psi_S}{\sin \psi_S \cos \Phi} \right)$$

$$\theta_S = \arctg \left(\frac{\cos \psi_S - R_E / R_S}{\sin \psi_S} \right) \quad (1)$$

$$\psi_S = \arccos (\sin \Phi \sin \Phi_S + \cos \Phi \cos \Phi_S \cos (\Lambda_S - \Lambda))$$

где Φ – геодезическая широта приемника ГНСС; Λ – геодезическая долгота приемника ГНСС; Φ_S – геодезическая широта навигационного спутника ГНСС; Λ_S – геодезическая долгота навигационного спутника ГНСС; R_S – радиус орбиты навигационного спутника ГНСС; R_E – радиус Земли; ψ_S – центральный угол между приемником и навигационным спутником ГНСС (Рисунок 2).

Интегральной характер ПЭС, в общем случае, делает невозможной привязку возмущений ПЭС к конкретной высоте. Однако, было показано, что наибольший вклад в вариации ПЭС вносит область, расположенная вблизи главного максимума ионосферы (максимум слоя F_2 , высота максимума h_{\max}). В связи с этим в настоящее время принято относить вариации ПЭС, рассчитанные вдоль луча "приемник-ИСЗ", к высоте h_{\max} . При этом ионосфера рассматривается, как тонкий слой на данной высоте, а луч "приемник-ИСЗ" пересекает этот слой в точке, которая получила название "ионосферная точка" (т. Р на рисунке 2). Т.о. считается, что ПЭС образуется в ионосферной точке на высоте h_{\max} . В зависимости от геофизических условий h_{\max} варьируется от 250 до 36 400 км. Надо отметить, что представление "тонкого слоя" приемлемо для ионосферных возмущений, вертикальный размер которых сравним со шкалой высот в области F_2 ионосферы.

Формулы для расчета географической широты ψ_P и долготы l_P ионосферной точки можно получить из сферического треугольника BNP_1 (Рисунок 2):

$$\varphi_P = \arcsin (\sin \varphi_B \cos \psi_P + \cos \varphi_B \sin \psi_P \cos \alpha_S)$$

$$l_P = l_B + \arcsin(\sin \psi_P \sin \alpha_S \sec \varphi_P) \quad (2)$$

$$\psi_P = \frac{\pi}{2} - \theta_S - \arcsin\left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \cos \theta_S\right)$$

Проекцию ионосферной точки P на земную поверхность часто называют подионосферной точкой. Как видно из рисунка 2, подионосферная точка P₁ имеет те же географические координаты, что и т. P.

Топоцентрические координаты x_P, y_P, z_P ионосферной точки в ТСК, связанной с приемником, рассчитываются по формулам. Для высоких углов места НИСЗ ($\theta_S > 30^\circ$) можно пользоваться упрощенными выражениями, полученными в предположении плоской ионосферы:

$$x_P = h_{\max} \sin \alpha_S \operatorname{ctg} \theta_S \quad y_P = h_{\max} \cos \alpha_S \operatorname{ctg} \theta_S \quad z_P = h_{\max} \quad (3)$$

Горизонтальная проекция w скорости перемещения ионосферной точки в ТСК:

$$w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad w_x = \frac{dx_P}{dt} \quad w_y = \frac{dy_P}{dt} \quad (4)$$

Учитывая, что период обращения НИСЗ GPS – 12 часов, а высота орбиты – 20000 км, горизонтальная скорость перемещения ионосферной точки на высоте $h_{\max} = 350$ км в средних широтах при угле места НИСЗ $\theta_S \sim 30^\circ$ составляет около 100 м/с.

В пятой главе описаны методы определения параметров ионосферы с использованием СРНС, рассмотрены параметры, такие как чувствительность, пространственное разрешение наземной сети приемников, временное разрешение сети, узнали как определять ПЭС с использованием СРНС, а также как производить пересчет ПЭС в высотный профиль с помощью обратных задач.

Большинство знаний о структуре и динамике ионосферы получены с помощью радиофизических методов зондирования, к которым относят:

- риометрический метод;
- метод измерения доплеровского сдвига частоты;
- метод вертикального зондирования и его разновидностей;
- метод некогерентного рассеяния;
- внешнее зондирование.

Для определения полной интегральной концентрации ионосферы используются как псевдодальномерные измерения (кодовые измерения дальности), так и измерения по фазе несущей. С учетом возможных ошибок измерений псевдодальномерные и фазовые измерения могут быть представлены в следующем виде:

псевдодальномерные измерения по P - или C A-коду:

$$\begin{cases} PR_{L_1} = R + RI_{L_1} + RT_{L_1} + RM_{L_1} + RN_{L_1} \\ PR_{L_2} = R + RI_{L_2} + RT_{L_2} + RM_{L_2} + RN_{L_2} \end{cases} \quad (5)$$

фазовые измерения (измерения по фазе несущей):

$$\begin{cases} \Phi_{L_1} = \frac{2\pi}{\lambda_1} (R - RI_{L_1} + R\Phi_{L_1} + N_1\lambda_1 + RM\Phi_{L_1} + RN\Phi_{L_1}) \\ \Phi_{L_2} = \frac{2\pi}{\lambda_2} (R - RI_{L_2} + R\Phi_{L_2} + N_2\lambda_2 + RM\Phi_{L_2} + RN\Phi_{L_2}) \end{cases} \quad (6)$$

Здесь R - псевдодальность, включающая в себя тропосферную задержку, погрешности, обусловленные рассинхронизацией бортовых часов спутника и приемника, прочие частотно- независимые погрешности, общие для всех четырех уравнений наблюдения; RI_L - изменения псевдодальности за счет влияния ионосферы, причем $RI_{L_2} = kRI_{L_1}$; $k = (L_1/L_2)^2 = (77/60)^2$ для системы GPS, $k = (L_1/L_2)^2 = (9/7)^2$ для системы ГЛОНАСС; RT и $R\Phi$ - аппаратурная погрешность передатчика при кодовых и фазовых измерениях, соответственно; RM и $RM\Phi$ - измерения псевдодальности, вызванные многолучевостью распространения при дальномерных и фазовых измерениях, соответственно; RN и $RN\Phi$ - шумовая ошибка измерений.

При двухчастотных измерениях псевдодальностей вклад ионосферы может быть определен из линейной комбинации соотношений (5):

$$RI_{L_1}(t) = \frac{1}{1-k} \{ [PR_{L_1}(t) - PR_{L_2}(t)] + \Delta RT + \Delta RM + \Delta RN \} \quad (7)$$

где $\Delta RT = RT_{L_1} - RT_{L_2}$, $\Delta RM = RM_{L_1} - RM_{L_2}$, $\Delta RN = RN_{L_1} - RN_{L_2}$ - ошибки измерения дальностей, обусловленные задержками времени распространения сигналов в трактах передатчика и приемника, многолучевостью и шумами приемника.

Значения интегральной электронной концентрации ТЕС можно определить непосредственно из измерений псевдодальностей по следующей формуле:

$$\text{TEC}(t) = 9,52 \cdot 10^{16} \{ [\text{PR}_{L_2}(t) - \text{PR}_{L_1}(t)] + \delta R_k \}, \text{эл/ м}^2, \quad (8)$$

где δR_k - суммарная ошибка кодовых измерений.

При фазовых измерениях на частотах L_1 и L_2 диапазонов вклад ионосферы в измерения может быть определен из линейной комбинации соотношений (6):

$$\begin{aligned} \text{RI}_{L_1}(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{1-k} \{ [\lambda_1 \Phi_{L_1}(t) - \lambda_2 \Phi_{L_2}(t)] + \Delta R\Phi + \Delta RM\Phi + \Delta RN\Phi + \\ + N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2 \}. \end{aligned} \quad (9)$$

Также, как и для кодовых измерений, значение интегральной электронной концентрации можно определить по следующей формуле:

$$\text{TEC}(t) = 1,81 \cdot 10^{16} \{ [\lambda_2 \Phi_{L_2}(t) - \lambda_1 \Phi_{L_1}(t)] + [N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2] + \delta R_\varphi \}, \quad (10)$$

где δR_φ - суммарная погрешность фазовых измерений.

Учитывая высокую точность фазовых измерений, основным источником ошибок является дифференциальная неоднозначность биения фаз. Эта неоднозначность фаз может быть устранена путем линейной комбинации кодовых и фазовых измерений. Полагая, что основными источниками погрешности измерений являются аппаратурные задержки при кодовых измерениях и дифференциальная неоднозначность биения фаз в фазовых измерениях, из соотношений (5) и (6) можно сформировать линейную комбинацию кодовых и фазовых измерений:

$$[\text{PR}_{L_1}(t) - \text{PR}_{L_2}(t)] - [\lambda_1 \Phi_{L_1}(t) - \lambda_2 \Phi_{L_2}(t)] = \Delta RT - [N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2] \quad (11)$$

Выразив отсюда неоднозначность фаз, и, подставив ее в формулу (10), можно определить интегральную электронную концентрацию по данным фазовых измерений с учетом погрешности кодовых измерений. Используя также то обстоятельство, что неоднозначность биения фаз является постоянной величиной (при условии, если с момента начала проведения измерений не было потери фазы), из соотношения (9) можно получить изменение влияния ионосферы в зависимости от времени (приращение

интегральной электронной концентрации ТЕС) на временном интервале наблюдений T :

$$\Delta RI_{L_1}(t) = \frac{1}{1-k} \frac{\{\lambda_1[\Phi_{L_1}(t)-\Phi_{L_1}(t-T)]-\lambda_2[\Phi_{L_2}(t)-\Phi_{L_2}(t-T)]\}}{2\pi T} + \delta R_\varphi \quad (12)$$

где δR_φ - некорректируемая суммарная погрешность фазовых измерений, составляющая в линейной мере несколько мм. Это приводит к погрешности определения ТЕС не более 0,1 TU. Поэтому при определении приращения ТЕС ей можно пренебречь.

Как видно, соотношение (12) не содержит неоднозначности фазовых измерений и дает возможность определять как градиент интегрального содержания ионосферы Земли, так и высотное распределение электронной концентрации. Последнее следует из того, что приращение $\Delta RI_{L_1}(t)$ на временном интервале $T \rightarrow 0$ можно представить в следующем виде:

$$\Delta RI_{L_1}(t) = \frac{RI_{L_1}(t)-RI_{L_1}(t-T)}{T} \underset{T \rightarrow 0}{=} \frac{\partial}{\partial T} RI_{L_1}(t). \quad (13)$$

С учетом формулы можно записать, что

$$\Delta RI_{L_1}(t) = A \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_1}^{z_2} N(z) \frac{(a+z)dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 v]^{1/2}}, \quad A = \frac{40,4 \cdot 10^6}{L_1^2}. \quad (14)$$

Полагая, что $N(z) = \text{const}$ в течение времени проведения измерений (если при измерении не было потери фазы), в результате выполнения процедуры дифференцирования получим:

$$\Delta RI_{L_1}(t) = A \frac{a^2 \sin 2v}{2} \frac{dv}{dt} \int_{z_1}^{z_2} N(z) \frac{(a+z)dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 v]^{3/2}}. \quad (15)$$

Используя формулы (12) и (15), получим еще одно интегральное уравнение, связывающее высотный профиль распределения электронной концентрации с точными фазовыми измерениями:

$$A \frac{a^2 \sin 2v}{2} \frac{dv}{dt} \int_{z_1}^{z_2} N(z) \frac{(a+z)dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 v]^{3/2}} = \frac{1}{2\pi T} \frac{1}{1-k} \{[\lambda_1 \Delta \Phi_{L_1}(t) - \lambda_2 \Delta \Phi_{L_2}(t)]\} \quad (16)$$

Данное уравнение точнее учитывает влияние ионосферы, так как фазовые измерения на несущей по своей физической сути являются более точными, чем кодовые дальномерные измерения.

Детальный анализ возможных ошибок измерений, показал, что основная ошибка определения ТЕС может возникать из-за влияния аппаратных задержек. Последние обусловлены различием трактов прохождения сигналов L_1 и L_2 диапазонов. Использование корректирующих поправок, передаваемых в навигационном сообщении, и проведение предварительной калибровки приемника позволяет уменьшить влияние задержек в трактах до 0,5 нс. Эффекты многолучевости и шумы приемника могут вносить ошибку в измерения псевдодальности до 0,35 нс. С учетом этих оценок погрешность измерения разности псевдодальностей может достигать 1 нс. При этом ошибка определения ТЕС будет составлять 2-3 ТУ (1 ТУ= 10^{16} эл/ м²). Кроме этого, значения ТЕС содержат в данном случае вклад протоносферы. В источниках утверждается, что вклад протоносферы не превышает 4 ТУ.

При решении обратной задачи были рассмотрены несколько видов априорной информации.

Предполагалось, что искомая функция может принадлежать одному из следующих классов функций: монотонные; монотонно убывающие выпуклые вверх; монотонно убывающие выпуклые вниз. Также предполагалось, что все используемые функции относятся к классу неотрицательных ограниченных функций.

Для решения обратной задачи воспользуемся методом сопряженных градиентов. При реализации данного метода необходимо построить некоторую последовательность $[\varphi_\delta]_j$, минимизирующую функционал

$$\Phi(\varphi_\delta) = \left\| A \frac{a^2 \sin 2v}{2} \frac{dv}{dt} \int_{z_1}^{z_2} N(z) \frac{(a+z) dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 v]^{3/2}} - \frac{1}{2\pi T} \frac{1}{1-k} \{ [\lambda_1 \Delta\Phi_{L_1}(t) - \lambda_2 \Delta\Phi_{L_2}(t)] \} \right\|$$

на выпуклом множестве, которое при конечно-разностной аппроксимации переходит в множество, определяемое одним из следующих ограничений:

$$M_{\downarrow C} = \left\{ \begin{array}{l} \varphi_\delta^{i=1} - \varphi_\delta^i \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ 0 \leq \varphi_\delta^i \leq C, \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \end{array} \right\}$$

$$M^U = \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{\delta}^i \geq 0, \quad i = 2, \dots, n \\ \varphi_{\delta}^{i=1} - \varphi_{\delta}^i + \varphi_{\delta}^{i+1} \leq 0, \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \end{array} \right\},$$

$$M^U \downarrow = \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{\delta}^i \geq 0, \quad i = 2, \dots, n \\ \varphi_{\delta}^{i=1} - \varphi_{\delta}^i + \varphi_{\delta}^{i+1} \leq 0, \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \\ \varphi_{\delta}^{i=1} - \varphi_{\delta}^i \leq 0, \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \end{array} \right\}.$$

Заметим, что при использовании фазовых измерений необходимо учитывать скорость изменения зенитного угла наблюдения, которая в точке траверза орбиты (точка орбиты, наименее удаленная от пункта наблюдения) обращается в нуль. Это может привести к тому, что в отличие от псевдодальномерных измерений, фазовые измерения в районе траверза могут быть непригодны для решения обратной задачи.

Результаты численного моделирования показали, что выбор класса функций в качестве априорной информации может влиять как на точность, так и качество полученного решения. На рис 4 приведены результаты определения максимума электронной концентрации при погрешности определения исходного эффекта, равной 10% его среднего на интервале наблюдения значения.

Скорость изменения зенитного угла определялась по реальным данным наблюдений одного из навигационных спутников. Из результатов моделирования видно, что точность определения максимума ионосферы для первых трех функций, используемых в качестве априорной информации, практически не зависит от условий наблюдений. Расхождение между восстановленными значениями ионосферы и моделируемыми не превышает 0,01 NU (1NU=10⁶ эл/см³). Применение более “сложной” априорной информации не дает в данном случае желаемого эффекта, результаты моделирования для этого случая отмечены на рисунке стрелкой. Точность определения максимума ионосферы ухудшается более чем в 10 раз – до 0,09 - 0,13 NU. Кроме этого, решение обратной задачи не имеет физически обоснованного решения в районе траверза, т.е. измерения в районе траверза, на интервале примерно 1,5 часов, не пригодны для решения обратной задачи при используемой априорной информации (на рис. 4 эта область отмечена пунктиром). Поэтому для фазовых измерений целесообразно использовать более простую априорную информацию. По-видимому, это связано с наличием в подынтегральном выражении степени 3/2.

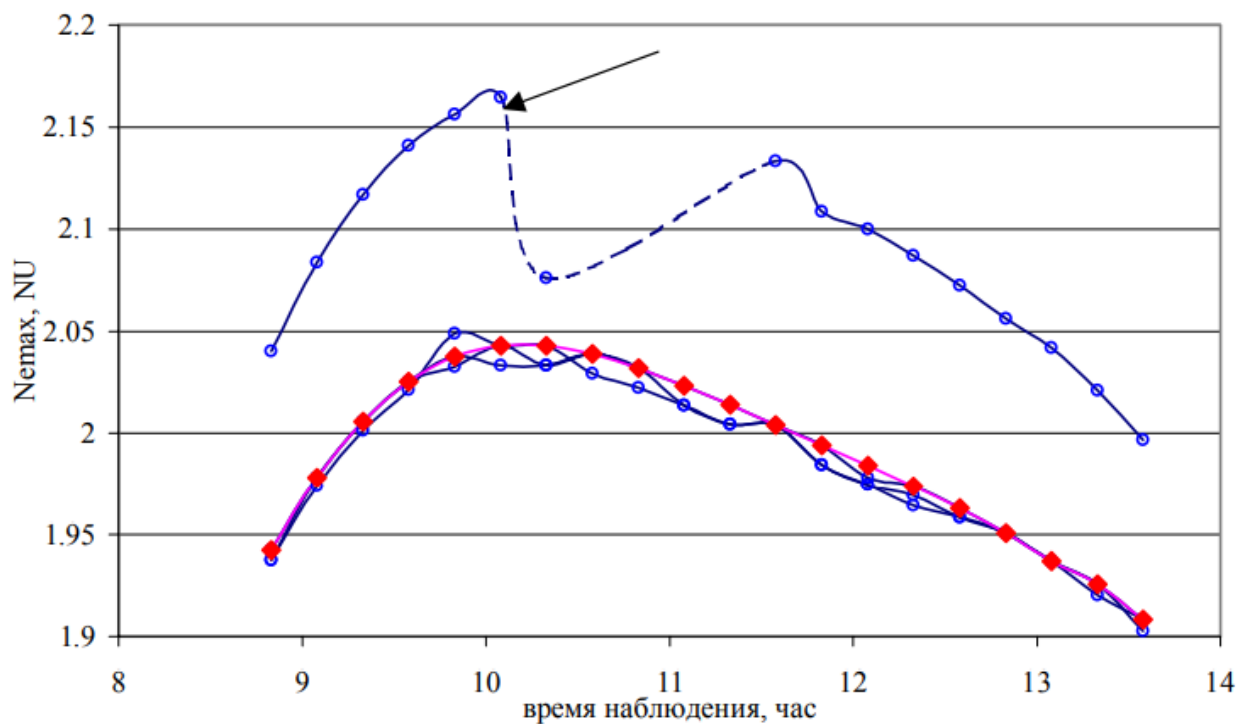


Рисунок 4 Определение максимума ионосферы в зависимости от характера априорной информации: —○— результаты восстановления, —◆— модель.

Наличие в подынтегральном выражении степени $3/2$ приводит к уменьшению влияния погрешности фазовых измерений на точность полученного решения. Более того, как показали результаты численного моделирования при среднеквадратической погрешности измерений, составляющей до 65% от среднего значения исходного эффекта на наблюдаемом интервале, точность определения максимума ионосферы практически постоянна на всем наблюдаемом интервале. Результаты численного моделирования, полученные для постоянной погрешности измерений, составляющей 10% от среднего значения моделируемого эффекта, и при использовании реальных погрешностей фазовых измерений, представлены на рис.5. Из данных рисунка видно, что основная погрешность фазовых измерений находится в интервале от 10 до 35% их средних значений на наблюдаемом интервале. Использование априорной информации, относящейся к четвертому классу функций, приводит к более сильной зависимости получаемого решения от погрешности фазовых измерений. Результаты моделирования для этого случая отмечены на рисунке стрелкой.

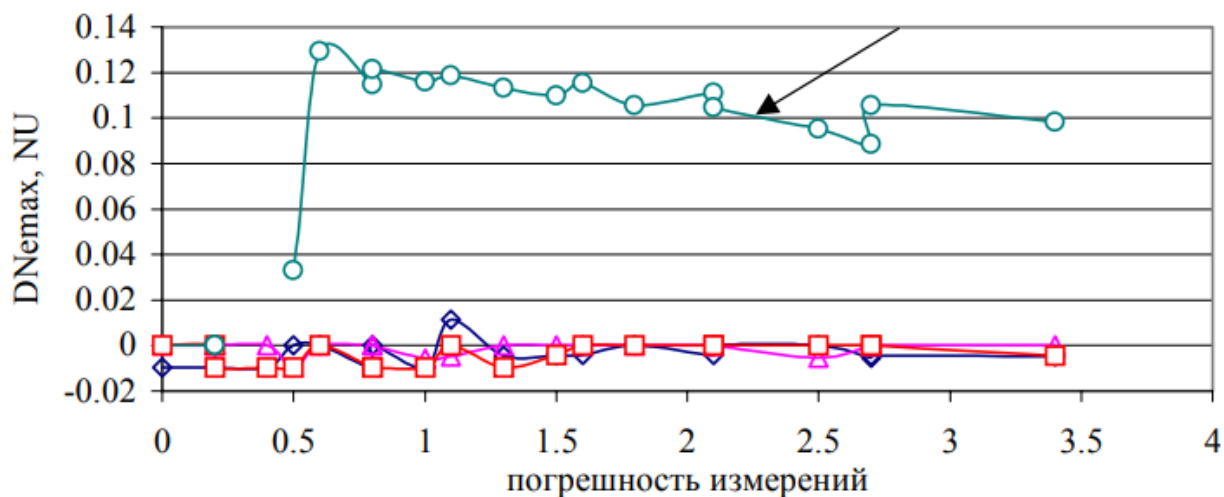


Рисунок 5а. Зависимость точности определения максимума ионосферы при фиксированной погрешности фазовых измерений (10% от исходного эффекта) от характера априорной информации.

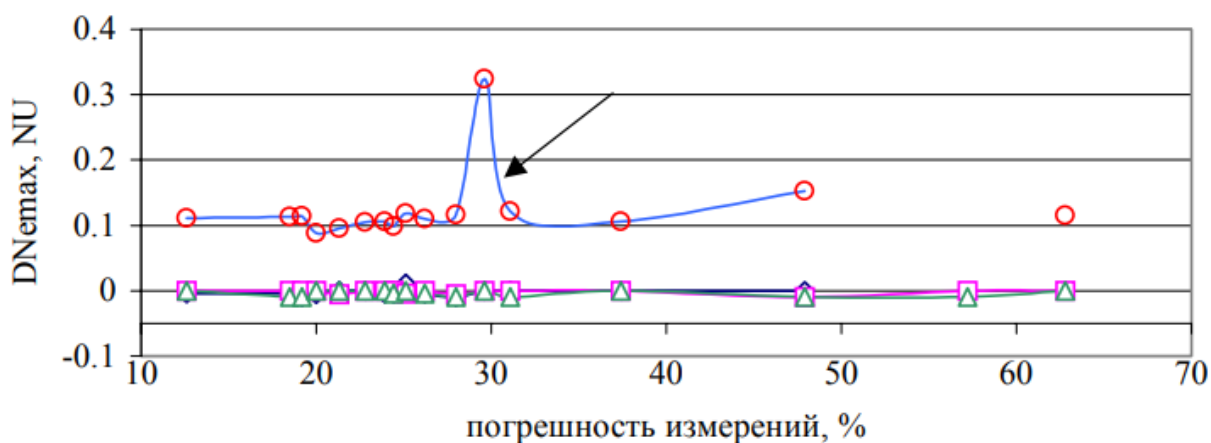


Рисунок 5б. Зависимость точности определения максимума ионосферы от погрешности реальных фазовых измерений и характера априорной информации.

Таким образом, результаты численного моделирования показали, что решение обратной задачи радиопросвечивания, основанное на использовании фазовых измерений навигационных сигналов, практически не зависит от среднеквадратической точности получения исходных данных измерений, что является признаком кооректности решения обратной задачи. Т.е. применение фазовых измерений в этом смысле при решении обратной задачи является более предпочтительным.

Напомним, что в случае псевдодальномерных измерений, точность определения должна быть не хуже 0,3 м или 10% их исходного значения. Т.е.

в этом случае предъявляются более жесткие требования к точности определения исходных данных измерений. Однако следует обратить внимание на тот факт, что применение фазовых измерений требует отсутствия потери фазы на всем интервале наблюдений. Кроме этого, в случае использования фазовых измерений проблема корректного определения параметров ионосферы может возникать в области траверза.

Шестая глава анализирует аппаратное и алгоритмическое обеспечение систем дистанционного зондирования ионосферы. Здесь мы рассмотрели специализированные приемники, предназначенные для определения ПЭС и их характеристики. Увидели, какое алгоритмическое обеспечение добавлено дополнительно в навигационные приемники и какое нужно для решения обратных задач уже отдельно от приемника.

В седьмой главе мы провели модельный расчет ПЭС, а также рассмотрели анализ влияния высотного распределения метеопараметров на интенсивность ионосферных возмущений, вызванных ТЦ КАТРИНА, РИТА, WILMA.

Расчет ПЭС. ПЭС вдоль луча "приемник-НИСЗ" в ГСК равно:

$$I^m(t) = \int_0^{D(t)} N(t, r') ds, \\ D(t) = \sqrt{(x'_S - x'_R)^2 + (y'_S - y'_R)^2 + (z'_S - z'_R)^2} \quad (17)$$

где $D(t)$ – дальность до НИСЗ; x'_S, y'_S, z'_S - геоцентрические координаты НИСЗ; x'_R, y'_R, z'_R - геоцентрические координаты приемника.

Для спутников ГНСС ионосфера расположена гораздо ниже траектории НИСЗ, поэтому при расчете ПЭС вдоль луча "приемник-НИСЗ" интегрирование можно ограничить нижней $r'_{bot}(t)$ и верхней $r'_{top}(t)$ границами ионосферы:

$$I^m(t) = \int_{r'_{bot}(t)}^{r'_{top}(t)} N(t, r') ds, \quad (18)$$

$r'_{bot}(t)$ и $r'_{top}(t)$ рассчитываются из условий: $r'_{bot}(t) = (h'_{bot}(t) + R_E)$ и $r'_{top}(t) = (h'_{top}(t) + R_E)$, здесь h_{bot} , h_{top} – высота нижней и верхней границы ионосферы. При расчетах обычно полагается: $h_{bot} = 0$, $h_{top} = 2000$ км.

Заключение ПЭС. Расчет ПЭС по формуле (18) имитирует эксперимент в идеальных условиях – в отсутствие аддитивных помех, шумов фазовых измерений, а также возможного случайного фона возмущений ПЭС. Чтобы приблизить модельные расчеты к реальному эксперименту, используется

процедура добавления случайного шума, имитирующего помехи различного рода:

$$I^m(t) = I^m(t) \cdot (1 + A_{\text{ran}} \cdot \text{RAN}), \quad (19)$$

где A_{ran} – задаваемая амплитуда шума; RAN – случайное число, которое имеет равномерное распределение на интервале $\{0 \div 1\}$, математическое ожидание 0.5 и дисперсию 1/12.

Оценка ракурсных условий. В целях оценки ракурсных условий на исследуемой траектории модель дополнена модулем для расчета углов $\gamma(t)$ и коэффициента $M(t)$ по формуле набега фазы, возникающего при распространении навигационного радиосигнала вдоль луча "приемник-НСС":

$$\varphi_{1,2} = \frac{2\pi f_{1,2}}{c} \int_0^D n_{1,2} ds + \varphi_0, \quad (20)$$

где f_1 и f_2 – рабочие частоты ГНСС; $\varphi_{1,2}$ – набег фазы для частоты соответственно f_1 и f_2 ; φ_0 – некоторая неизвестная начальная фаза, $n_{1,2}$ – коэффициент преломления в ионосфере сигналов с частотами f_1 и f_2 ; D – расстояние между приемником и передатчиком.

Модуль считается достаточно автономным: он может использоваться как вместе с моделью, так и независимо от нее для обработки экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы, были решены все поставленные задачи. Был выполнен обзор научно-технической литературы по теме исследования и проведен анализ направлений использования спутниковых навигационных систем с дистанционной диагностикой ионосферы в результате чего сделали вывод, что радиосигналы, непрерывно излучаемые СРНС, предоставляют широкие возможности для осуществления исследований ионосферы различными методами.

С их помощью мы можем исследовать различные ионосферные структуры, а именно: провалы ионизации, авроральный овал, волновые и квазиволновые структуры, перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), «блобы», «пятна», «пузыри», «языки» ионизации, ионосферные «следы» корпускулярные ионизации т.д.

Также проеден анализ существующей группировки спутников глобальной навигационной системы, выяснив, какие группировки существуют на данное время, их достоинства и недостатки, далее мы концентрировали своё внимание на GPS/ГЛОНАСС.

Проанализировав ионосферу Земли и влияющие на неё факторы, мы перешли к методам их определения с использованием спутниковых радионавигационных систем. Затрагивая обзор радиофизических методов, определение ПЭС с использованием СРНС, а также пересчет ПЭС в высотный профиль с помощью обратных задач. Выяснив, что одним из проблемных вопросов является влияние суточного и широтного распределения плотности электронов вдоль длинной траектории, в то время как необходимо восстановить профиль на одной широте (а другие спутники где-то соответствуют ночи, где-то вечеру, где-то дню и так далее).

В анализе аппаратного и алгоритмического обеспечения систем дистанционного зондирования ионосферы мы рассмотрели специализированные приемники, предназначенные для определения ПЭС и их характеристики. Увидели, какое алгоритмическое обеспечение добавлено дополнительно в навигационные приемники и какое нужно для решения обратных задач уже отдельно от приемника.

В заключительном разделе мы провели модельный расчет ПЭС, а также рассмотрели анализ влияния высотного распределения метеопараметров на интенсивность ионосферных возмущений, вызванных ТЦ КАТРИНА, РИТА, WILMA.

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Шкляник Е. И., Давыденко И. Н. Исследование ионосферы Земли в интересах народного хозяйства / Research of the Earth's ionosphere in the interests of the national economy// Научно-практический журнал «Базис.2022№1(11)». ISSN 2587-8042. УДК 551.510.535, Поволжский кооперативный институт (филиал) Российского университета кооперации, Россия, г. Энгельс, С.25-31.

2. Шкляник Е. И., Давыденко И. Н. Методы зондирования ионосферы Земли с помощью спутниковых навигационных систем // Радиотехника и электроника: сборник тезисов докладов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, апрель 2022 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2022. – С. 199–201.

3. Шкляник Е. И., Давыденко И. Н. Анализ радиофизических методов зондирования ионосферы // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2022: материалы научно-технической конференции, Минск, 29–30 ноября 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2022. – С. 64–66.