

**А.А. РОМАНОВ, А.А. РОМАНОВ,
С.В. ТРУСОВ, Ю.М. УРЛИЧИЧ**

СПУТНИКОВАЯ РАДИОТОМОГРАФИЯ ИОНОСФЕРЫ



МОСКВА[®]
ФИЗМАТЛИТ
2013

УДК 550.388.2 : 551.501.8

ББК 26.2

Р 69

Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В., Урличич Ю.М.
Спутниковая радиотомография ионосферы. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 296 с. — ISBN 978-5-9221-1462-2.

В монографии рассматриваются проблемы электрофизики ионосферы, связанные с методами и технологиями исследования состояния ионосферной плазмы при помощи средств космического томографического радиомониторинга. Излагаются современные и перспективные методики спутниковой лучевой радиотомографии, проводится анализ аппаратно-программных средств бортового и наземного базирования, используемых при восстановлении вертикальных разрезов электронного содержания ионосферы. Предложен оригинальный способ глобального радиотомографического зондирования с применением кластеров малогабаритных космических аппаратов.

Обобщен более чем десятилетний опыт исследований, проведенных авторами в рамках Федеральной космической программы, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.», а также при выполнении грантов РФФИ и международных проектов.

Книга предназначена студентам старших курсов, аспирантам и научным работникам, специализирующимся в области прикладных задач электрофизики, дистанционного аэрокосмического зондирования и геофизики.

Рецензенты:

С. А. Пулинец, доктор физико-математических наук, профессор

А. С. Селиванов, доктор технических наук, профессор

© ОАО «Российские космические системы», 2013

© ФИЗМАТЛИТ, 2013

ISBN 978-5-9221-1462-2

© А. А. Романов, А. А. Романов, С. В. Трусов,
Ю. М. Урличич, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Обозначения и сокращения	7
Введение	9
 Глава 1. Анализ существующих и перспективных методов спутни- ковой радиотомографии ионосферы.	 18
1.1. Виды спутниковой томографии.	18
1.2. Перспективный метод определения электронной концентрации ионосферы	22
1.2.1. Определения ПЭС из многочастотных фазовых измерений. . .	22
1.2.2. Определение неоднозначности восстановления ПЭС из много- частотных измерений	25
1.2.3. Сравнительный анализ эффективности использования различ- ных комбинаций частот.	27
1.3. Выводы по разделу.	28
 Глава 2. Радиотомографическая сеть подсистемы наблюдения ионосферы системы геофизического мониторинга России	 29
2.1. Космические аппараты с радиомаяками когерентных сигналов. . . .	34
2.2. Наземный комплекс приема информации	36
2.2.1. Технические требования к приемникам низкоорбитальных на- вигационных и специализированных КА	36
2.2.2. Сравнение основных характеристик отечественных и зарубеж- ных приемников спутниковых сигналов	38
2.2.3. Описание приемного комплекса RRT-1.	59
2.2.4. Сравнительный анализ основных характеристик RRT-1 и ха- рактеристик отечественных и зарубежных аналогов.	67
2.3. Выводы по разделу.	70
 Глава 3. Автоматизированная технология реконструкции верти- кальных распределений электронной концентрации ионосферы	 71
3.1. Методика обработки данных	71

3.1.1. Выделение полезного сигнала	71
3.1.2. Определение формальных критериев для совмещения данных одного сеанса, полученных на различных приемных установ- ках	76
3.1.3. Процедура оценки необходимости трансформации фазораз- ностных данных.	77
3.1.4. Процедура координатно-временной привязки данных	80
3.1.5. Процедура определения актуальных для обработки данных и алгоритм нахождения границ сетки реконструкции	81
3.1.6. Формирование проекционного оператора.	85
3.1.7. Формирование начального приближения	86
3.1.8. Формирование вектора коэффициентов релаксации и решение системы линейных уравнений.	90
3.2. Коррекция данных TLE.	91
3.2.1. Методика актуализации параметров движения КА в формате TLE	92
3.2.2. Реализация методики в системе радиотомографии ионосферы	94
3.2.3. Точность определения положения КА по актуализированным TLE-файлам	94
3.3. Программно-математический комплекс сбора и обработки данных томографии ионосферы	98
3.3.1. Функциональная структура программно-математического ком- плекса	98
3.3.2. Сегмент сбора информации	99
3.3.3. Сегмент обработки информации	100
3.3.4. Сегмент хранения информации	101
3.3.5. Сегмент представления информации	103
3.3.6. Сегмент информационного обеспечения процессов сбора и об- работки информации.	106
3.3.7. Сегмент контроля исполнения процедур сбора и обработки информации	107
3.3.8. Сегмент управления процессами	109
3.3.9. Подход к масштабируемости приемного сегмента	109
3.4. Верификация автоматизированной технологии реконструкции про- филей электронной концентрации ионосферы в дальневосточном регионе России	111
3.5. Выводы по разделу.	123
Глава 4. Развитие спутниковой радиотомографии ионосферы Земли	126
4.1. Перспективные космические приборы	126
4.1.1. Передатчик немодулированного сигнала частот 150 и 400 МГц	127
4.1.2. Двухчастотный передатчик шумоподобного сигнала L-диапа- зона	128
4.1.3. Комбинированный пятидиапазонный передатчик	128

4.1.4. Перспективный многочастотный передатчик когерентного излучения 150/400/1067/2844 МГц	129
4.1.5. Перспективный многочастотный приемник когерентного излучения 150/400/1067/2844 МГц	135
4.2. Перспективные модели космических группировок глобального мониторинга состояния ионосферы	143
4.2.1. Основные подходы к определению параметров орбитальной группировки для радиотомографии ионосферы	143
4.2.2. Модель группировки для радиопросвечивания ионосферы с использованием сигналов ГНСС	152
4.2.3. Модель группировки для радиопросвечивания ионосферы с использованием сигналов собственных передатчиков	166
4.2.4. Модель группировки для радиопросвечивания ионосферы на основе кластеров МКА	175
4.2.5. Использование нескольких кластеров в одной орбитальной плоскости	202
4.3. Выводы по разделу	209
Глава 5. Перспективы многомерной томографии ионосферы с использованием низкоорбитальных КА	210
5.1. Алгоритмы решения задач трехмерной томографии	210
5.1.1. Алгоритм дискретного решения задачи трехмерной томографии ионосферы	210
5.1.2. Алгоритм непрерывного решения задачи трехмерной томографии ионосферы	215
5.2. Моделирование перспективных орбитальных группировок для восстановления трехмерных высотных распределений электронной концентрации ионосферы	238
5.2.1. Постановка задачи и условия моделирования	238
5.2.2. Эксперимент 1. Оценка потенциала кластерно-плоскостной схемы	240
5.2.3. Эксперимент 2. Оценка влияния наклона орбиты и расстояния по широте между приемными установками на величину коэффициента заполнения	241
5.2.4. Эксперимент 3. Оценка влияния количества МКА и приемных станций, а также расстояния между ними на величину коэффициента заполнения	242
5.2.5. Эксперимент 4. Исследование зависимости величины коэффициента заполнения от расположения приемных станций	248
5.2.6. Предложения по орбитальному построению	250
5.3. Выводы по разделу	252
Список литературы	254
Приложение А. Томографические реконструкции ионосферы в дальневосточном регионе России	264

Приложение Б. Космические системы и специализированные аппараты мониторинга ионосферы.	269
Б.1. Российская низкоорбитальная навигационная система	269
Б.2. Система NNSS (США)	271
Б.3. Система FORMOSAT-3/COSMIC	273
Б.4. Сравнительная характеристика орбитальных группировок.	275
Б.5. Специализированные космические аппараты с радиомаяками когерентных сигналов	279
Б.5.1. Космический аппарат RadCal	279
Б.5.2. Космический аппарат DMSP/F15	280
Б.5.3. Космический аппараты GFO.	281
Б.5.4. Космический аппарат ARGOS.	282
Б.5.5. Космический аппарат PICOSat	282
Б.5.6. Космический аппарат COMPASS-2	283
Б.5.7. Космический аппарат C/NOFS	284
Б.5.8. Космический аппарат NPSAT1	285
Б.5.9. Космический аппарат EQUARS.	285
Б.5.10. Космический аппарат Cassiope.	286
Приложение В. Результаты расчета положений КА и соответствующие ошибки реконструкции.	288

Обозначения и сокращения

ВВС — военно-воздушные силы
ГЛОНАСС — Глобальная навигационная спутниковая система
ГНСС — глобальная навигационная спутниковая система
ГНТ — геомагнитные наведенные токи
ДВУ — долгота восходящего узла
ЕОФ — естественные (эмпирические) ортогональные функции
ИСЗ — искусственный спутник Земли
КА — космический аппарат
МКА — малоразмерный космический аппарат
ННКА — низкоорбитальный навигационный космический аппарат
НО КА — низкоорбитальный космический аппарат
ОГ — орбитальная группировка
ПЭС — полное электронное содержание
РННС — Российская низкоорбитальная навигационная система
РТ — радиотомография
СЛУ — система линейных уравнений
СО КА — среднеорбитальный космический аппарат
ARGOS — (Advanced Research & Global Observation Satellite) спутник детальных исследований и глобального мониторинга
C/NOFS — (Communication/Navigation Outage Forecasting System) система прогнозирования нарушений в работе космических связанных и навигационных систем
CERTO — (Coherent Electromagnetic Radio Tomography Experiment) когерентный электромагнитный томографический радиопередатчик
CIDR — (Coherent Ionospheric Doppler Receiver) когерентный ионосферный доплеровский приемник
COSMIC — (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) космическая система наблюдения по метеорологии, за ионосферой и климатом
DMSP — (Defense Meteorological Satellite Program) Оборонная метеорологическая спутниковая программа
EQUARS — (Equatorial Atmosphere Research Satellite) спутник исследования экваториальной атмосферы
GPS — (Global Positioning System) Глобальная система позиционирования
NIMS — (Navy Ionospheric Monitoring System) Военно-морская система мониторинга ионосферы

NNSS — (Navy Navigation Satellite System) Военно-морская навигационная спутниковая система

NPSAT1 — (Naval Postgraduate School Satellite) спутник Военно-морской академии

STP — (Space Test Program) программа исследования космоса

TECU — (Total Electron Content Unit) единица измерения полного электронного содержания 10^{16} эл./м²

UTC — (Universal Time Coordinate) всемирное координированное время

Введение

Эффекты космической погоды оказывают значительное влияние на функционирование различных технических и информационных систем, сделанных руками человека. Энергетические частицы, испущенные Солнцем, взаимодействуя с магнитным полем Земли, вызывают неоднородности магнитного поля и увеличивают ионизацию ионосферной плазмы на высотах от 100 до 1000 км (рис. 1).



Рис. 1. Общее влияние космической погоды на наземную инфраструктуру

Высокоэнергетичные частицы оказывают влияние на электронику космических аппаратов (КА), вызывая сбои в ее работе или приводя к полному выходу КА из строя [1, 2]. Радиоволны, которые используются для связи с КА или для осуществления передачи навигационного сигнала, задерживаются в возмущенной ионосфере, что приводит к нарушениям или полному исчезновению связи с КА, а в некоторых случаях — к потере навигационного сигнала наземными потребителями [3].

Магнитные неоднородности непосредственно влияют на исследования фундаментальных свойств магнитного поля Земли и происходящих в нем явлений, осложняя проведение изыскательных работ и создание

численных моделей. Существенное влияние неоднородности магнитного поля могут оказывать на транспортную инфраструктуру, вызывая индуцированные электрические токи в протяженных проводниках, таких как энергетические транспортные сети и трубопроводы, что может приводить к нарушению их функционирования, а также физическому повреждению [4].

Инфраструктурные решения, заложенные в существующих энергетических сетях, таковы, что токи, индуцированные в протяженных проводниках, стекают на землю через трансформаторы подстанций. Для описания подобных явлений был введен специальный термин — геомагнитные наведенные токи (ГНТ) [5]. ГНТ возникают вследствие появления электрических полей, вызванных неоднородностями магнитного поля, которые появляются во время геомагнитных возмущений. Вследствие их низкой частоты, сравнимой с частотой переменного тока, наведенные токи появляются на трансформаторных обмотках в виде медленно меняющегося постоянного тока. ГНТ, протекающие через обмотки трансформатора, вызывают дополнительное намагничивание, которое в определенный момент может вызвать насыщение сердечника трансформатора, что может привести к целому ряду проблем, например увеличению температуры сердечника и, как следствие, к его возгоранию. Кроме того, дополнительные гармоники, генерируемые трансформатором при нештатном режиме работы, порождают нежелательные переключения коммутационных реле, вызывающие внезапные отключения линий. Наиболее серьезной аварией в энергетических сетях в мире считается отключение электричества во всей провинции Квебек (Канада) 13 марта 1989 г. Тогда в результате сильной магнитной бури произошло масштабное отключение электроэнергии более чем на 9 часов [6].

С системной точки зрения, уязвимость энергетических сетей перед геомагнитными возмущениями увеличивается по мере увеличения нагрузки. Постоянное увеличение потребления электроэнергии и слабое отраслевое регулирование в этой области неизбежно обуславливают необходимость работы энергетических систем в режимах, близких к расчетному пределу, делая их более уязвимыми к внешним воздействиям. Четко выраженная особенность воздействия ГНТ на систему состоит в одновременном нарушении нормального функционирования во многих узлах одновременно. Это не соответствует характеру развития других проблем в силовых сетях, например ударам молнии или выходу из строя оборудования, которые, как правило, более локализованы. Взаимные соединения современных силовых систем, направленные на обеспечение противодействия подобным локальным угрозам, могут привести к внезапному веерному отключению узлов энергетической системы, аналогичному энергетическому «блэкауту» в Москве в 2005 г. [6].

Бесспорно, необходимо создавать технологии, способные прогнозировать приближение магнитной бури для уменьшения вероятности

выхода дорогостоящего электротехнического оборудования из строя. Затраты на восстановление после подобных аварий для операторов энергетических сетей включают в себя не только замену поврежденного оборудования, но и потери доходов от продажи электроэнергии. «Блэкаут» в Квебеке обошелся в 13,2 миллиона долларов, причем только стоимость поврежденного оборудования составила 6,5 миллионов долларов. Следовательно, упущенная выгода от недоставленной потребителю электроэнергии всего за 9 часов исчисляется миллионами долларов США [7].

Другой аспект проблемы состоит в том, что, как правило, сложное оборудование невозможно заменить быстро. Например, трансформатор в Салеме (Нью-Джерси, США) на атомной электростанции, выгоревший в результате магнитной бури, стоил «всего» несколько миллионов долларов. Но поскольку данное оборудование строится исключительно «под заказ», сроки доставки могут доходить до одного года. В таком случае ущерб в виде упущенной выгоды будет исчисляться просто «астрономическими» суммами [7].

Транспортная инфраструктура человечества не ограничивается функцией передачи электричества. Не менее активно используются трубопроводы для транспортировки нефти, газа, а также воды от источников этих ресурсов до их потребителей. По аналогии с энергетическими сетями и системами, в случае возникновения аварии на трубопроводе потери будут достаточно велики: не только вследствие затрат на восстановление нефтепровода и упущенной выгоды, но и в результате потенциальной опасности для окружающей среды и угрозы человеческих жертв.

Для передачи большого количества жидкости или газа под землей или водой трубы магистралей делают из стали, для того чтобы они выдерживали высокое давление. К сожалению, сталь, и, следовательно, трубы, которые из нее сделаны, подвержены коррозии. Поэтому, с учетом высокого давления, повреждение трубопровода может произойти не только от физического повреждения, но и вследствие коррозии стали труб. Для предотвращения этого вредного процесса сталь трубопровода покрыта специальным изолирующим слоем и подключена к специальным устройствам — «выпрямителям катодной защиты» [8].

Скорость протекания коррозионных процессов стали трубопровода действительно может быть существенно замедлена при условии поддержания на поверхности труб (катод) отрицательного потенциала по отношению к окружающей среде (анод).

Как правило, в транспортной системе трубопровода данная задача решается подключением отрицательного выхода источника постоянного тока непосредственно на трубопровод, а положительного — на анодное заземление, размещенное в почве таким образом, что электрический ток потечет от анода на трубопровод. Если с помощью катодного тока снизить значение электрического потенциала между трубами и грунтом до значения $-0,85 \div -1,2$ В, то скорость коррозии стали становится пренебрежимо малой [8].

Изменяющиеся по времени магнитные поля наводят изменяющиеся по времени электрические токи в проводниках. Вариации магнитного поля Земли наводят электрический ток в длинных проводящих трубопроводах и окружающей почве. Эти изменяющиеся по времени токи, названные «теллурическими токами», создают колебания напряжения в катодной защите трубопроводов и затрудняют поддержание разности потенциалов в рабочем диапазоне. В момент магнитных бурь вариации разности потенциалов, наводимых на трубопровод, могут быть настолько значительными, что напряжения выйдут из безопасного диапазона. Это приведет к существенному снижению эффективности защиты трубопровода, коррозии и, как следствие, снижению срока его службы [8].

Сложные условия космической погоды оказывают свое влияние и на телекоммуникационную инфраструктуру.

Телеграф был первой системой, сделанной человеком, которая использовала длинные проводники электрического тока, и одновременно первой системой, на которую воздействовали возмущения геомагнитного поля. Существует множество задокументированных фактов, когда телеграфные системы временно выходили из строя при появлении полярного сияния.

На раннем этапе развития телеграфии использовались различные методы записи сигнала, переданного по проводам. В «химическом телеграфе» Бейна использовалась специальная «химическая» бумага. Электрический ток, передаваемый стилусом, вызывал химическую реакцию и оставлял цветной след на бумаге. Во время магнитной бури 19.02.1852 электрический ток возрос настолько, что стилус поджег бумагу [9].

Несмотря на то, что в XX веке все технологии кабельных коммуникаций значительно изменились, тем не менее, все кабели по-прежнему подвержены воздействию разности потенциалов, наведенной геомагнитными возмущениями.

В начале XX века в телекоммуникационных системах был совершен переход на коаксиальные кабели. Их преимущество состояло в увеличенной пропускной способности коммуникационных систем, построенных на их основе, однако использование подобных кабелей требует наличия усилителей, компенсирующих энергетические потери в длинной линии. Эти усилители соединяются в цепь с использованием центральной жилы кабеля и питаются постоянным током, поставляемым терминальными станциями на концах кабеля. Переменное магнитное поле, возникающее в случае наведения разности потенциалов непосредственно на центральную жилу возмущениями геомагнитного поля, может привести к уменьшению и/или увеличению питающего напряжения усилителей, что приведет к снижению эффективности функционирования или выходу кабельной системы из строя.

Несмотря на то, что телекоммуникационные кабели последнего поколения используют для передачи сигналов оптические волокна, в них по-прежнему существует проводник для передачи напряжения

для «оптических усилителей». С учетом повышения эффективности новых кабельных систем, требующих меньшего количества усилителей и меньшего управляющего напряжения, необходимо тщательно отслеживать уровни напряжений, наведенных вследствие различных геомагнитных эффектов [10].

Существенное воздействие космической погоды ощущается не только на поверхности Земли в различных инфраструктурных системах. Не меньшее воздействие разгуливающая стихия может оказывать на функционирование космических аппаратов (КА) на орбите.

КА функционируют в среде, в которой присутствуют различные заряженные частицы (рис. 2). Они могут воздействовать на аппаратуру КА различными способами: непосредственно проникая в радиотехнические элементы, из которых состоят приборы и системы КА, а также косвенно, заряжая элементы структуры КА с последующим статическим разрядом. Вышеперечисленные процессы могут привести к возникновению ложных команд, повреждению электроники, частичной потере управления или полной потере КА [2].

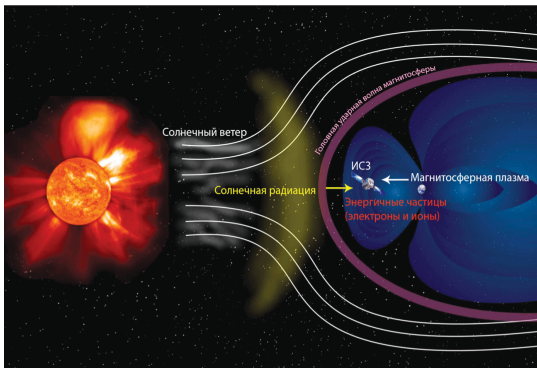


Рис. 2. Влияние потоков солнечной радиации на ИСЗ

Высокоэнергетичные ионы, проходя через полупроводниковые элементы (рис. 3), «выбивают» большое количество свободных электронов, вследствие движения которых возникает электрический ток. Большое количество электронов, попавших, например, в ячейки памяти, могут подменить информацию и привести к ложным командам или испортить информацию, которая в них хранилась. Бомбардировка тяжелыми заряженными частицами элементов памяти системы управления КА

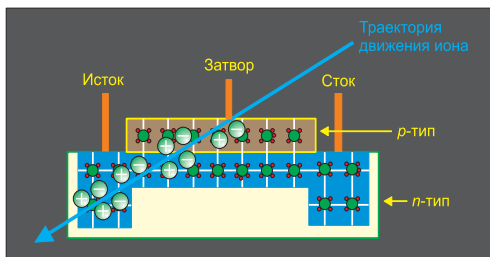


Рис. 3. Влияние тяжелых заряженных частиц на работу полупроводниковых интегральных схем

может привести к очень тяжелым последствиям и закончиться полной потерей космического устройства [1, 2].

Поверхностный заряд КА на солнечно-синхронных орбитах возникает в силу взаимодействия элементов его конструкции со значительными потоками электронов, с энергией в несколько десятков кэВ, в отсутствии надежного механизма стока заряда, например фотоэмиссии. Исследования показывают, что интенсивные потоки подобных электронов вызываются активностью магнитных суббурь, поскольку данный эффект проявляется в ночное время суток [1]. Дифференциальный заряд поверхности КА может приводить к деструктивным дуговым разрядам, вызывающим аномалии в работе КА.

Солнце излучает электромагнитную радиацию в широком спектральном диапазоне электромагнитных волн: от радиодиапазона до рентгеновского. Ультрафиолетовая солнечная радиация взаимодействует с верхней атмосферой и формирует ионизированный слой, который называется ионосферой. Фундаментальное свойство ионосферы — изменять характеристики радиоволн — приводит к тому, что изучение и контроль ее состояния становится важным как для исследовательских целей, так и для практического прикладного использования. Значительная изменчивость параметров ионосферы и возникающие при этом многочисленные задачи прикладного использования в различных сферах деятельности обуславливают необходимость получения текущей информации о параметрах ионосферы в реальном масштабе времени специальными средствами, обладающими повышенной чувствительностью и информативностью, с высоким пространственным и временным разрешением.

В нормальном состоянии ионосфера может выступать в качестве «зеркала» для радиосигналов с частотами ниже 30 МГц, и это свойство ионосферы позволяет осуществлять дальнюю радиосвязь по всему

миру, проводить загоризонтное зондирование и пр. Сигналы более высоких частот, как правило, проходят сквозь ионосферу.

Вспышки на Солнце генерируют электромагнитное излучение, которое вызывает повышение ионизации в нижней ионосфере. В зависимости от частоты распространяемого сигнала может наблюдаться целый ряд различных эффектов: от изменения фазы низкочастотного сигнала до увеличения затухания сигналов в ВЧ- и ОВЧ-диапазонах. Широкий спектр шума, который излучается вспышкой, может интерферировать с полезным сигналом. Ионосферные неоднородности могут излучать флуктуирующие сигналы (явление, известное как мерцание) и могут искривлять направление распространения радиоволн [11].

Солнечные вспышки могут сопровождаться потоками высокоэнергетичных частиц, которые движутся со скоростями, близкими к скорости света. Эти частицы (в основном протоны и электроны) проникают в верхнюю атмосферу в регионах, близких к магнитным полюсам. В результате нижние уровни полярной ионосферы становятся сильно ионизированными и сильно поглощают ВЧ- и ОВЧ-радиосигналы. Этот эффект называется поглощением «полярной шапки» и может продолжаться от нескольких дней до нескольких недель в зависимости от величины потока солнечных частиц и местонахождения источника излучения на Солнце. Связь в ВЧ-диапазоне спектра в подобных условиях, как правило, оказывается полностью нарушенной [12].

Таким образом, состояние ионосферы существенно зависит от гелио- и геомагнитной активности. В случае наличия неоднородностей электронной концентрации в ионосфере распространение радиоволн может быть частично нарушено или полностью прекращено.

Существенное влияние космическая погода оказывает на доступность услуг глобальных навигационных спутниковых систем, без которых уже невозможно представить повседневную жизнь.

Аппаратура потребителя — ГЛОНАСС/GPS-приемник использует сигналы, излучаемые КА, для определения расстояния до каждого спутника на орбите, от которого принимается навигационный сигнал. Радиосигнал, проходя через верхние слои атмосферы, задерживается ионосферной плазмой, что приводит к ошибкам в определении расстояния до КА и, следовательно, в определении координат потребителя [13].

Для устранения влияния ионосферной плазмы на навигационный сигнал применяются два подхода: первый состоит в использовании модели ионосферы для расчета ионосферных поправок непосредственно в приемнике, второй основывается на исключении частотно-зависимых поправок к навигационному сигналу при использовании линейной комбинации измерений на двух частотах [14–16].

В силу своей высокой стоимости, двухчастотная аппаратура потребителя в настоящее время не очень распространена на массовом коммерческом рынке. Поэтому для получения точных координат рядовыми

потребителями в спутниковой навигационной системе необходимо формировать актуальные ионосферные параметры, передаваемые в навигационных сообщениях. Особенно важно решить эту задачу для периодов магнитных бурь, поскольку ошибки определения местоположения, вносимые неоднородностями в магнитосфере и ионосфере Земли, а также за счет повышения ионизации ионосферной плазмы в период повышенной солнечной активности, могут превышать сотни метров.

Одним из наиболее перспективных направлений использования спутниковых навигационных сигналов является разработка радиотомографических методов исследования ионосферной плазмы. Без существенных финансовых затрат (не считая стоимости спутников, которые разрабатывались для решения других задач) томографическое радиопросвечивание ионосферы позволяет решать ряд научных и прикладных задач:

- исследование глобальной изменчивости пространственного распределения и временной динамики электронной концентрации в ионосфере;
- определение региональных особенностей вариации поля электронной концентрации в ионосфере для уточнения существующих ионосферных моделей;
- изучение эволюции и определение механизмов формирования неоднородностей электронной концентрации в ионосфере в связи с солнечной, сейсмической и антропогенной активностями.

Весьма перспективным представляется развитие разработанных методов и технологий в применении кластеров космических аппаратов, позволяющих обеспечить радиопросвечивание ионосферы в направлении от одного КА к другому, практически без использования сети наземных приемных станций. Данный подход позволяет обеспечить реальный глобальный мониторинг состояния ионосферной плазмы.

Безусловно, состояние ионосферы определяет и характер распределения возникающих глобальных электрических полей. Изучению таких полей посвящен ряд оригинальных монографий [17–19], однако эти поля, в силу неразвитости методов исследований глобальных электрофизических характеристик ионосферы и их проявлений в глобальных электрических полях, изучены достаточно слабо.

В данной книге рассматриваются проблемы электрофизики, связанные с методами и технологиями исследования состояния ионосферной плазмы при помощи средств космического томографического радиомониторинга. Обобщен более чем десятилетний опыт исследований, проведенных авторами в рамках Федеральной космической программы, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.», при выполнении грантов РФФИ, а также международных проектов.

По своей структуре книга последовательно охватывает все составляющие технологии спутниковой радиотомографии ионосферы: методи-

ческие проблемы и способы их решения; вопросы формирования спутниковых группировок, включая бортовые радиотехнические средства приема и передачи когерентных сигналов; создание кластеров специализированных малоразмерных КА; наземную сеть комплексов приема и обработки томографических сигналов, включая описание предложенных и разработанных аппаратно-программных средств, а также перспективную модель трехмерной реконструкции полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы на базе низкоорбитальных спутниковых систем.

Авторы выражают признательность коллегам, высказавшим ряд полезных замечаний по материалам, представленным в книге. Мы также благодарим сотрудников ОАО «Российские космические системы» С. А. Бобровского, О. И. Барабошкина, Д. М. Ермолаева, А. В. Григоров, А. В. Новикова и А. А. Таланова, сотрудника ГУП НПО «СПУРТ» В. О. Лося, которые участвовали в проведении исследований на разных этапах подготовки этой книги, а также технического редактора книги Г. Г. Язеряна.

Глава 1

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОТОМОГРАФИИ ИОНОСФЕРЫ

Первые исследования верхних ионизированных слоев атмосферы начались еще на рубеже XIX и XX веков. В 1916 г. Левенштейн, рассматривая распространение радиоволн в атмосфере, высказал убеждение, что «измерения интенсивности света, произведенные при заходе солнца, обнаруживают три отчетливые нарушения непрерывности, когда последние лучи солнца становятся касательными к слоям воздуха на высоте 11, 75, 220 км» [1].

Однако измерения, проводимые с поверхности Земли, позволяли получить картину происходящих процессов только до главного максимума электронной концентрации в ионосфере в слое F2. Качественный скачок в развитии исследований верхней атмосферы произошел с появлением искусственных спутников Земли (ИСЗ), а именно навигационных спутниковых систем.

С возникновением навигационных спутниковых систем первого поколения в 60-х годах XX века появилась возможность исследовать характеристики ионосферы, используя данные о фазовой задержке когерентных двухчастотных радиосигналов от ИСЗ, пропорциональной интегральному электронному содержанию на пути распространения радиосигнала.

В последние десятилетия интенсивно развиваются методы радиотомографии ионосферы с использованием сигналов низкоорбитальных навигационных космических аппаратов. В настоящем разделе представлена базовая теория методов радиотомографии ионосферной плазмы, а также рассматриваются некоторые перспективы их развития.

1.1. Виды спутниковой томографии

В настоящее время математическую основу томографии принято связывать с интегральной геометрией, где требуется восстановить объект, имея данные о нем в виде интегралов по многообразиям меньшей размерности. Поэтому термин томография понимается не в узком первоначальном смысле — как послойное исследование структуры неодно-

родных объектов, а более широко — как запись сечений или проекций объекта и последующее восстановление по ним его структуры.

В фундаментальных работах [20–22] показано, что задачи томографии ионосферы с использованием радиомаяков, устанавливаемых на КА, или спутниковой радиотомографии, подразделяются на статистические и детерминированные. В случае детерминированной обратной задачи необходимо восстановить структуру некоторых крупных неоднородностей или группы неоднородностей. Если же большое число неоднородностей занимает некоторую область в пространстве, то нецелесообразно реконструировать структуру отдельной реализации непрерывно меняющихся неоднородностей, здесь имеет смысл ставить задачу восстановления структуры статистических характеристик неоднородностей, таких как функция корреляции плотности электронной концентрации и др.

Для решения детерминированных обратных задач применяется либо лучевая, либо дифракционная томография. Для лучевой радиотомографии необходимо иметь ряд приемников вдоль траектории пролета спутника, расположенных на расстояниях порядка сотен километров [20–22]. При постановке задачи дифракционной радиотомографии используются поперечные направлению движения спутника линейки приемников. Расстояние между приемниками в линейке составляет 1 километр и более. Задачи статистической радиотомографии могут решаться как несколькими приемниками вдоль орбиты, так и несколькими поперечными линейками приемников, в зависимости от физической постановки задачи.

Физические основы радиотомографии ионосферы подробно представлены в работе [20], поэтому рассмотрение дальнейшего материала в книге будет проводиться на основании предположений и допущений, обсужденных в оригинальном издании.

Задачи лучевой томографии крупномасштабных структур формулируются обычно следующим образом: по измерениям линейных интегралов для серии лучей, пересекающих некоторую область, необходимо восстановить структуру этой области. Так как размеры крупных неоднородностей естественного происхождения (типа ионосферного провала) и искусственного происхождения (следы космических аппаратов, технологические выбросы) составляют от десятков до тысяч километров, то дифракционными эффектами при УКВ-зондировании можно пренебречь.

Теоретической основой лучевой радиотомографии (РТ) являются известные соотношения [20–22] для фаз и амплитуд радиоволн в приближении геометрической оптики. Следующая пара равенств определяет линейные интегралы от распределений электронной концентрации N и эффективной частоты соударений ν :

$$\phi = \lambda r_e \int N d\sigma, \quad \chi = -\frac{\lambda r_e}{\omega} \int N \nu d\sigma, \quad (1)$$

где λ — длина зондирующей волны, r_e — классический радиус электрона, $\omega = kc$, k — волновое число в свободном пространстве, c — скорость света, $\int d\sigma$ — символ интегрирования по пути распространения сигналов. Линейными интегралами здесь являются разность фаз $\phi = \Phi_0 - \Phi$ и уровень χ — логарифм соотношения амплитуд сигналов $\chi = \ln(A/A_0)$ измеряемого поля ($E = A_0 \exp(i\Phi)$) и поля зондирующей волны ($E = A_0 \exp(i\Phi_0)$).

Математическая постановка задачи подразумевает решение системы линейных уравнений (СЛУ) $Ax = b$, где A — матрица проекционно-оператора, b — вектор измеренных значений, x — вектор восстанавливаемых значений электронной концентрации. Проекционный оператор строится путем дискретизации значений функции распространения зондирующего радиосигнала на заданной сетке реконструкции. Для построения проекционного оператора могут быть использованы кусочно-постоянная, кусочно-планарная, билинейная, кубическая и другие виды аппроксимации. Для решения системы линейных уравнений в задаче радиотомографии ионосферы применяются различные методы. Наиболее распространенными являются итерационные алгоритмы решения систем линейных уравнений ART и MART [22, 23] и байесовский подход, основанный на процедуре стохастического обращения. Реже применяется алгоритм SVD [22].

В фазовом методе измеряется линейный интеграл вида (1), умноженный на константу порядка единицы [20–22], связанную с пересчетом фазы с одной частоты на другую. Основа возникающих трудностей по определению этого интеграла состоит в том, что величина фазы весьма велика. Для характерных значений электронной концентрации $N \sim 10^{12} \text{ м}^{-3}$, $\lambda = 2 \text{ м}$ и длины луча в ионосфере порядка тысячи километров ϕ составляет тысячи радиан. Отсюда возникает проблема выделения начальной фазы, остающейся постоянной в течение сеанса радиопросвечивания, $\phi_0 = 2\pi n$, которую нужно прибавить к измеряемой (в пределах 2π) $\Delta\phi$ и получить абсолютную (полную) фазу $\phi = \phi_0 + \Delta\phi$ или линейный интеграл (1) [20].

В работе [24] приведен анализ традиционных методик определения полной фазы когерентных сигналов и на основе численного моделирования показано, что при наличии характерных горизонтальных градиентов электронной концентрации в ионосфере в районе главного ионосферного провала $\frac{\partial N}{\partial \alpha} \sim 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot \text{рад}^{-1}$ ошибка в определении константы достигает 100–1000 %, что согласуется с результатами моделирования определения константы в работе [20]. В работе [25], авторы которой использовали модель тонкой ионосферы и значения относительной фазы, полученные на разнесенных приемных установках для одного и того же участка ионосферы, ошибка в определении начальной фазы составила 10 %. Значения константы определялись в результате решения системы уравнений для соответствующих лучей с одинаковым последним слагаемым.

Для решения проблемы неизвестной начальной фазы авторами [20] был предложен метод фазоразностной томографии, суть которого состоит в использовании в качестве интегральной характеристики производной фазы $d\phi/dt$ (которая, очевидно, не содержит неизвестную константу, соответствующую начальной фазе сигнала). В отличие от фазовой томографии, где интегральной величиной является полная фаза, фазоразностный метод более чувствителен к относительно малым неоднородностям электронной концентрации, которые вносят незначительный вклад в фазу и более существенный — в ее производную. В реконструкциях поля электронной концентрации, выполненных с использованием метода фазовой томографии, не проявляются детали размером менее нескольких сотен километров, в то время как фазоразностная томография позволяет хорошо восстанавливать структуры размером 100 км и величиной электронной концентрации 4–6 % от концентрации максимума [20–22]. Таким образом, метод фазоразностной томографии является наиболее точным и эффективным для реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере.

Рассмотренный материал показывает, что в настоящее время находят применение как фазовый, так и фазоразностный методы томографии ионосферы. При этом отличие методов состоит лишь в подходе к обработке данных, а схема регистрации сигналов не имеет значения.

Фазоразностный метод используется для двухчастотных измерений (150 и 400 МГц), при которых прямыми методами невозможно определить абсолютное ПЭС в силу необходимости разрешения фазовой неопределенности (неизвестного числа полных циклов фазы). Проблема неизвестного абсолютного ПЭС решается за счет дифференцирования относительного ПЭС по времени. Использование данного метода позволяет хорошо восстановить флуктуации электронной концентрации слоя максимума ионосферы, тогда как фоновое значение электронной концентрации может быть восстановлено только с существенной ошибкой.

Метод фазовой томографии позволяет восстанавливать распределение электронной концентрации на основе данных об абсолютном ПЭС. Использование данного метода спутниковой томографии ионосферы позволит осуществлять восстановление фоновых значений электронной концентрации с хорошей точностью, однако на данный момент не существует передатчиков когерентных сигналов, анализ характеристик которых мог бы привести к определению абсолютного ПЭС с достаточной точностью.

Указанные обстоятельства предопределяют необходимость разработки перспективных методов и спутниковой бортовой аппаратуры, позволяющих реализовать метод радиотомографии ионосферы, обеспечивающий восстановление абсолютных значений ПЭС.

1.2. Перспективный метод определения электронной концентрации ионосферы

1.2.1. Определения ПЭС из многочастотных фазовых измерений

В работах [14, 15] нами предложен метод определения ПЭС по многочастотным измерениям сигналов спутниковой радиотомографии ионосферы.

Использование многочастотных передатчиков дает возможность получить информацию одновременно о вариациях амплитуды и фазы сигнала и ПЭС вдоль луча, соединяющего передатчик и приемник. ПЭС может быть определено из различных характеристик принятого сигнала:

- из разности фаз между когерентными широко разнесенными по частотам сигналами;
- из относительной групповой задержки сигналов различных частот;
- из угла фарадеевского вращения линейно поляризованных радиоволн.

Кроме того, возможно использование комбинаций этих характеристик. Каждый метод определения ПЭС характеризуется своей точностью и величиной неоднозначности. Точность измерения ПЭС быстро растет при понижении несущей частоты сигнала, так как коэффициент преломления ионосферы обратно пропорционален квадрату несущей частоты. Разница в величине ПЭС, производящая минимальный различимый приемником фазовый сдвиг, есть точность определения ПЭС приемником. Величина набега фазы и угол фарадеевского вращения могут изменяться более чем на 2π радиан за счет влияния ионосферы. Величина ПЭС, соответствующая сдвигу фазы в 2π радиан, соответствует величине неопределенности метода измерений.

Приведем основные соотношения для расчета величины неопределенности ПЭС вдоль луча визирования передатчик-приемник на основе анализа фазовых характеристик сигналов.

Набег фазы радиосигнала, прошедшего через ионосферу, можно описать формулой

$$P = \left(S - \int \frac{\varepsilon N}{f^2} ds \right) \frac{f}{c}, \quad (2)$$

где S — геометрический путь, пройденный лучом; $\varepsilon = 40,3$; f — частота несущей сигнала; $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света; ds — элемент пути луча; $\int N ds$ — полное электронное содержание.

Разность фаз для сигналов частот несущих f_a и f_b имеет вид

$$\Delta P_{ab} = P_a - P_b \frac{f_a}{f_b} = \frac{(f_b - f_a)(f_b + f_a)\varepsilon}{cf_b f_a} \int N ds. \quad (3)$$

Разность фаз определяется приемником с неоднозначностью в целое число полных циклов.

Рассмотрим случай трех частот, причем соседние частоты отличаются в n_2/n_1 раз, где n_2 и n_1 — целые числа. Частоты, соответствующие этому случаю, можно выразить через основную частоту f_0 : $f_1 = n_1^2 \cdot f_0$, $f_2 = n_1 n_2 \cdot f_0$, $f_3 = n_2^2 \cdot f_0$. Тогда разность фаз для каждой пары частот можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta P_{12} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon}{n_1^3 n_2^2 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{13} &= \frac{(n_2^4 - n_1^4)\varepsilon}{n_1^3 n_2^4 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{14} &= \frac{(n_2^6 - n_1^6)\varepsilon}{n_1^3 n_2^6 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{23} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon}{n_1^2 n_2^3 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{24} &= \frac{(n_2^4 - n_1^4)\varepsilon}{n_1^2 n_2^5 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{34} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon}{n_1 n_2^4 c f_0} \int N ds.\end{aligned}\tag{4}$$

Так как фаза всегда определена с точностью до константы, разность фаз можно представить в виде неизвестной целой и измеряемой дробной части:

$$\Delta P_{ab} = K_{ab} + \Delta \Phi_{ab}.\tag{5}$$

В реальности измерить можно только дробную часть фазы. Целая часть может быть определена путем разрешения фазовой неоднозначности. При двухчастотных измерениях неоднозначность ПЭС соответствует целому числу полных циклов фазы. Величины неоднозначностей для пар между тремя частотами имеют вид

$$\begin{aligned}\Delta_{12} \int N ds &= \frac{n_1^3 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon} = 7,44 \times 10^6 f_0 \frac{n_1^3 n_2^2}{(n_2^2 - n_1^2)} \text{ м}^{-2}, \\ \Delta_{13} \int N ds &= \frac{n_1^3 n_2^4 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4)\varepsilon} = 7,44 \times 10^6 f_0 \frac{n_1^3 n_2^4}{(n_2^4 - n_1^4)} \text{ м}^{-2}, \\ \Delta_{14} \int N ds &= \frac{n_1^3 n_2^6 c f_0}{(n_2^6 - n_1^6)\varepsilon} = 7,44 \times 10^6 f_0 \frac{n_1^3 n_2^6}{(n_2^6 - n_1^6)} \text{ м}^{-2}, \\ \Delta_{23} \int N ds &= \frac{n_1^2 n_2^3 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon} = 7,44 \times 10^6 f_0 \frac{n_1^2 n_2^3}{(n_2^2 - n_1^2)} \text{ м}^{-2}, \\ \Delta_{24} \int N ds &= \frac{n_1^2 n_2^5 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4)\varepsilon} = 7,44 \times 10^6 f_0 \frac{n_1^2 n_2^5}{(n_2^4 - n_1^4)} \text{ м}^{-2}, \\ \Delta_{34} \int N ds &= \frac{n_1 n_2^4 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon} = 7,44 \times 10^6 f_0 \frac{n_1 n_2^4}{(n_2^2 - n_1^2)} \text{ м}^{-2}.\end{aligned}\tag{6}$$

Поскольку измерения на трех частотах производятся в один момент времени, значения ПЭС для всех трех случаев должны быть одинаковы. Следовательно, можно записать пропорцию для разностей фаз:

$$\frac{\Delta P_{12}}{n_2^2} = \frac{\Delta P_{13}}{n_1^2 + n_2^2} = \frac{\Delta P_{23}}{n_1 n_2}. \quad (7)$$

Неоднозначность определения ПЭС при использовании трех частот выражается формулой

$$\Delta_{123} \int N ds = \frac{n_1^2 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \epsilon} n_2^2 = 7,44 \times 10^6 f_0 \frac{n_1^2 n_2^4}{(n_2^2 - n_1^2)} \text{ м}^{-2}. \quad (8)$$

Величина неоднозначности трехчастотных измерений в $n_1 n_2$ раз больше, чем максимальная двухчастотная неоднозначность (5). Это утверждение справедливо при известных сдвигах задержки фазы для каждой из трех частот, обусловленных приемным трактом.

Неоднозначность значения ПЭС можно разрешить, решая уравнение в целых числах:

$$\Delta P_{12} (n_1^2 + n_2^2) = \Delta P_{13} n_2^2, \quad (9a)$$

$$(K_{12} + \Delta\phi_{12}) (n_1^2 + n_2^2) = (K_{13} + \Delta\phi_{13}) n_2^2, \quad (9b)$$

$$K_{12} (n_1^2 + n_2^2) - K_{13} n_2^2 = \Delta\phi_{13} n_2^2 - \Delta\phi_{12} (n_1^2 + n_2^2). \quad (9b)$$

Здесь $\Delta\phi_{12}$ и $\Delta\phi_{13}$ — дробные части измерений фазы; K_{12} и K_{13} — неизвестные целые величины — число целых циклов набега фазы. Правая часть уравнения (9b) должна быть целой, так как левая часть — целая.

Задача сводится к нахождению наименьшего общего знаменателя:

$$x_{12} (n_1^2 + n_2^2) - x_{13} n_2^2 = 1, \quad (10)$$

$$K_{12} = [\Delta\phi_{13} n_2^2 - \Delta\phi_{12} (n_1^2 + n_2^2)] x_{12} + k n_2^2, \quad (11a)$$

$$K_{13} = [\Delta\phi_{13} n_2^2 - \Delta\phi_{12} (n_1^2 + n_2^2)] x_{13} + k (n_1^2 + n_2^2), \quad (11b)$$

где k — целое число.

Запишем значения абсолютных фаз, с учетом уравнений (11):

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= K_{12} + \Delta\phi_{12} = \\ &= [\Delta\phi_{13} n_2^2 - \Delta\phi_{12} (n_1^2 + n_2^2)] x_{12} + k n_2^2 + \Delta\phi_{12}, \end{aligned} \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{13} &= K_{13} + \Delta\phi_{13} = \\ &= [\Delta\phi_{13} n_2^2 - \Delta\phi_{12} (n_1^2 + n_2^2)] x_{13} + k (n_1^2 + n_2^2) + \Delta\phi_{13}. \end{aligned} \quad (12b)$$

Тогда значения восстановленного ПЭС можно представить в виде

$$\int N ds = \Delta P_{12} \frac{n_1^2 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon} = \frac{n_1^2 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon} \times \\ \times \{ [\Delta \phi_{13} n_2^2 - \Delta \phi_{12} (n_1^2 + n_2^2)] x_{12} + \Delta \phi_{12} \} + \frac{k n_1^2 n_2^4}{(n_1^2 - n_2^2)}, \quad (13a)$$

$$\int N ds = \Delta P_{13} \frac{n_1^2 n_2^4 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4) \varepsilon} = \frac{n_1^2 n_2^4 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4) \varepsilon} \times \\ \times \{ [\Delta \phi_{13} n_2^2 - \Delta \phi_{12} (n_1^2 + n_2^2)] x_{13} + \Delta \phi_{13} \} + \frac{k n_1^2 n_2^4}{(n_1^2 - n_2^2)}. \quad (13b)$$

С учетом уравнения (10) получаем простое выражение:

$$\int N ds = \frac{n_1^2 n_2^4 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon} [(\Delta \phi_{13} x_{12} - \Delta \phi_{12} x_{13}) + k], \quad (14)$$

где k — произвольное целое число. Значения x_{12} и x_{13} находятся из уравнения (10) при известных значениях n_1 и n_2 .

1.2.2. Определение неоднозначности восстановления ПЭС из многочастотных измерений

Обобщим некоторые из полученных выводов для случая произвольного числа используемых когерентных частот. Пусть используется $(k+1)$ частота, причем

$$f_{i+1} = \frac{n_2}{n_1} f_i, \quad (15)$$

тогда

$$\begin{aligned} f_1 &= n_1^k f_0, \\ f_2 &= n_1^{k-1} n_2 f_0, \\ &\dots, \\ f_{l+1} &= n_1^{k-l} n_2^l f_0, \\ &\dots, \\ f_{k+1} &= n_2^k f_0. \end{aligned} \quad (16)$$

Из (16) имеем

$$\Delta P_{l(l+1)} = \frac{(n_2^{2l} - n_1^{2l}) \varepsilon}{n_1^k n_2^{2l} c f_0} \int N ds, \quad (17a)$$

$$\Delta P_{l(k+1)} = \frac{(n_2^{2k} - n_1^{2k}) \varepsilon}{n_1^k n_2^{2k} c f_0} \int N ds. \quad (17b)$$

Составим пропорцию для $\Delta P_{l(l+1)}$ и $\Delta P_{l(k+1)}$:

$$\frac{\varepsilon}{cf_0} \int N ds = \frac{\Delta P_{l(l+1)}}{\frac{(n_2^{2l} - n_1^{2l})}{n_1^k n_2^{2l}}} = \frac{\Delta P_{l(k+1)}}{\frac{(n_2^{2k} - n_1^{2k})}{n_1^k n_2^{2k}}}. \quad (18)$$

Следовательно, выражение для трехчастотной неоднозначности определения ПЭС при использовании максимальной, минимальной и одной из промежуточных частот имеет вид

$$\Delta_{l(l+1)(k+1)} \int N ds \frac{n_1^{2l} n_2^{2k} cf_0}{(n_2^{2l} - n_1^{2l}) \varepsilon} n_2^{2k-2l} = 7,44 \times 10^6 f_0 \frac{n_1^{2l} n_2^k}{(n_2^{2l} - n_1^{2l})} n_2^{2k-2l} \text{ м}^{-2}. \quad (19)$$

Для передатчиков низкоорбитальных навигационных систем (150/400 МГц), использующихся для исследований ионосферы, приняты следующие значения: $n_1 = 3$ и $n_2 = 8$; значения f_0 находятся вблизи 16,666 МГц.

Из формул (4) имеем

$$\Delta_{12} = \frac{55}{576} \frac{\varepsilon}{cf_0} \int N ds = 7,96 \times 10^{-16} \int N ds.$$

Величина двухчастотной неоднозначности из (19) будет иметь значение около 0,1 TECU.

Для спутниковых передатчиков ГЛОНАСС $n_1 = 7$ и $n_2 = 9$; значение f_0 составляет 25,4286 МГц.

Согласно первой формуле (6), величина неоднозначности будет иметь значение около 0,004 TECU.

Для передатчика CERTO:

$$\begin{aligned} f_0 &= 16,668 \text{ МГц}, \\ f_1 &= 9f_0 = 150,012 \text{ МГц}, \\ f_2 &= 24f_0 = 400,032 \text{ МГц}, \\ f_3 &= 64f_0 = 1066,752 \text{ МГц}. \end{aligned}$$

Формулы (6) имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta_{12} &= \frac{55}{576} \frac{\varepsilon}{cf_0} \int N ds = 7,96 \times 10^{-16} \int N ds, \\ \Delta_{13} &= \frac{4015}{368\,646} \frac{\varepsilon}{cf_0} \int N ds = 8,82 \times 10^{-16} \int N ds, \\ \Delta_{23} &= \frac{55}{1536} \frac{\varepsilon}{cf_0} \int N ds = 2,56 \times 10^{-16} \int N ds. \end{aligned} \quad (21)$$

Величины двухчастотных неоднозначностей (22) примут значения:

$$\Delta_{12} \int N ds = 1,2995 \times 10^{15} m^{-2} \approx 0,1 \text{ TECU},$$

$$\Delta_{13} \int N ds = 1,1392 \times 10^{15} m^{-2} \approx 0,1 \text{ TECU},$$

$$\Delta_{23} \int N ds = 3,4652 \times 10^{15} m^{-2} \approx 0,3 \text{ TECU}.$$

И, наконец, трехчастотная неоднозначность будет равна:

$$\Delta_{123} \int N ds = 8,3165 \times 10^{16} m^{-2} \approx 8,3 \text{ TECU}.$$

Трехчастотная неоднозначность в 64 раза больше, чем при измерениях на частотах 150 и 400 МГц.

Для определения формулы перевода фазовых разностей в ПЭС необходимо решить уравнение (10): $x_{12}73 - x_{13}64 = 1$, имеем $x_{12} = -7$, $x_{13} = -8$. Тогда уравнение (13) примет вид

$$\int N ds = 8,3165 \times 10^{16} [(-\Delta\phi_{13}7 + \Delta\phi_{12}8)_{\text{mod } 1} + k].$$

Точность трехчастотного метода примерно в $\sqrt{x_{12}^2 + x_{13}^2}$ ниже точностей двухчастотных методов. То есть использование частот 150, 400 и 1067 МГц (передатчик CERTO) позволяет определить ПЭС примерно в 10 раз точнее, чем при радиопросвечивании ионосферы частотами 150 и 400 МГц. Если точность измерения разности фаз составляет 6 градусов, то точность определения ПЭС для 1-й и 3-й, а также 1-й и 2-й пар частот будет около 0,002 TECU, значит, точность определения ПЭС для трехчастотного метода составит порядка 0,02 TECU.

Следующей когерентной частотой в ряду 150, 400, 1067 МГц будет $f_4 = \frac{n_2}{n_1} f_3 = \frac{8}{3} \times 1066,66 \text{ МГц} = 2844,44 \text{ МГц}$. Рассмотрим трехчастотный сигнал: 150/400/2844 МГц. Тогда $k = 3$, из (15) следует, что $f_0 = 5,556 \text{ МГц}$. Тогда величина неоднозначности из (19) будет составлять 1418 TECU.

1.2.3. Сравнительный анализ эффективности использования различных комбинаций частот

При подборе наиболее предпочтительной частотной комбинации будем руководствоваться соображениями максимизации величины неопределенности и обеспечения приемлемого уровня точности измерения ПЭС. При этом, как было показано, точность при использовании трехчастотных комбинаций падает, по меньшей мере, на порядок, однако, при использовании принимающей аппаратуры, разработанной на современной элементной базе с использованием цифровой обработки сигналов, может быть обеспечен достаточно высокий уровень точности определения разности фаз.

Значение величины неопределенности имеет несравнимо большую важность с точки зрения корректной интерпретации данных. При достаточно больших ее значениях может существовать всего несколько значений ПЭС, имеющих физический смысл. Для определения числа возможных значений достаточно разделить величину интервала возможных значений ПЭС на величину неопределенности. Этот интервал для схемы зондирования ионосферы с помощью сети наземных приемников составляет 30 TECU, для схемы просветного зондирования может доходить до 300 TECU.

Очевидно, что для двухчастотного передатчика число возможных значений ПЭС даже при использовании наземного приемника и наличии предварительных модельных оценок составляет несколько десятков, что делает невозможным использование этих данных для оценки абсолютного значения ПЭС.

Следует также отметить, что точность трехчастотного метода достаточна для разрешения неопределенности двухчастотных измерений. Это означает, что точность измерения абсолютного ПЭС трехчастотным методом может быть увеличена до точности измерения относительного ПЭС по двум частотам [14, 15].

1.3. Выводы по разделу

Обзор методов фазовой и фазоразностной радиотомографии показал, что при использовании двухчастотных измерений (150, 400 МГц) определение абсолютных значений ПЭС с приемлемой точностью невозможно, поэтому для реконструкции электронной концентрации применяется метод фазоразностной томографии. Он характеризуется хорошей точностью восстановления градиента электронной концентрации и, в меньшей степени, ее абсолютных значений. Методы фазовой томографии требуют точного определения абсолютного ПЭС, и для этого хорошо подходит трехчастотный передатчик когерентных сигналов.

Использование трех когерентных частот (150, 400, 1067 МГц), применяющихся в американском передатчике CERTO, не позволяет непосредственно определять абсолютное ПЭС, однако делает возможным его определение с учетом наличия некоторой априорной информации (данных из моделей ионосферы или измерений наземного ионозонда).

Перспективный четырехчастотный приемник (150, 400, 1067, 2844 МГц) для передающей аппаратуры томографии ионосферы позволяет однозначно определять абсолютное ПЭС без использования априорной информации. Таким образом, сигналы радиомаяков могут быть использованы не только для более точного восстановления распределения электронной концентрации ионосферы методом фазовой томографии, но и в качестве входных данных для ассимиляционных моделей ионосферы, которые обладают большей значимостью и перспективностью в плане практического применения, чем результаты томографии.

Глава 2

РАДИОТОМОГРАФИЧЕСКАЯ СЕТЬ ПОДСИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ СИСТЕМЫ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РОССИИ

В настоящее время в мире существует несколько исследовательских групп, занимающихся радиотомографией ионосферы.

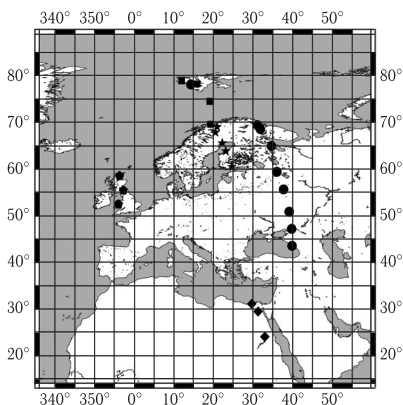


Рис. 4. Расположение томографических приемников в Европе

В европейской части России томографические исследования ионосферы проводятся на трассе Баренцбург — Сочи, длина которой около 4000 км. Приемные установки находятся в населенных пунктах Баренцбург, Корзуново, Верхнетуломский, Кемь, Бабаево, Москва, Острогжск, Ростов и Сочи. Расположение приемных пунктов (рис. 4, приемные установки этой цепочки отображаются кружочками) выбрано с учетом направлений пролета российских низкоорбитальных