ВВЕДЕНИЕ

Курсовая посвящена экспериментальному изучению распространения естественных электромагнитных импульсных излучений, частотный спектр которых перекрывает верхнюю область сверхнизкочастотного (СНЧ) и нижнюю область сверхдлинноволнового диапазонов (СДВ) в волноводе Земля - ионосфера и исследованию пространственно - временного распределения их источников. Работа основана на результатах наземной и морской регистрации вертикальной электрической (E ) и двух взаимно ортогональных горизонтальных магнитных (Hx и Hy ) компонент поля естественных излучений в диапазоне от 0.3 до 13 кГц. Измерения проводились в пос. Мартовая Харьковской обл. и на борту научно-исследовательского судна (НИС) @Академик Вернадский@ в акваториях Индийского и Атлантического океанов.

Актуальность работы. Диапазоны СНЧ и особенно СДВ активно используются для связи, навигации, передачи сигналов точного времени. Важную роль при разработке соответствующих систем играет выбор частоты, способ возбуждения волновода Земля-ионосфера, интенсивность и спектральный состав помех и пр. Однако, интервал частот 0.3 - 10 кГц остается при этом наименее изученным, что связано, прежде всего, с отсутствием искусственных источников таких полей. Поэтому весьма актуально исследование электромагнитных волн, возбуждаемых естественными широкополосными источниками грозами.

Определяющую роль в глобальной грозовой активности играют так называемые мировые грозовые центры, расположенных в Африке, Южной Америке, юго-восточной Азии. Известные из литературы распределения источников измерялись за продолжительные промежутки времени, или охватывали локальные области Земного шара. Глобальные распределения получались затем сопоставлением данных большого числа отдельных метеостанций. Эти результаты не позволяют оценить одновременно динамику и пространственную структуру глобальных источников атмосфериков. Поэтому актуально получение данных о пространственно-временной динамике активности мировых грозовых центров.

Значительный интерес представляет изучение системы Земля - ионосфера, как радиофизического объекта. До настоящего времени наименее изучена нижняя часть ионосферы, оказывающая основное влияние на распространение низкочастотных радиоволн.

Исследуемые в диссертации эффекты тесно связаны с состоянием нижней ионосферы, поэтому они оказываются не только источником дополнительной информации, но и основой новых методов измерения параметров нижней ионосферы. Кроме того, радиоволны в промежутке Земля-ионосфера несут информацию и об источнике возбуждения. Поэтому рассматриваемые в диссертации экспериментальные методики могут оказаться полезными в исследовании грозовых разрядов и других естественных электромагнитных источников в данном диапазоне частот.

Цель работы и метод исследования. Целью диссертации является экспериментальное исследование спектральных и поляризационных свойств электромагнитного поля естественных импульсных сигналов в диапазоне частот от 0.3 до 13 кГц, распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера, разработка методики пеленгации импульсных сигналов, получение новых экспериментальных данных о пространственно-временной динамике активности мировых грозовых очагов, обработка, анализ и интерпретация полученных экспериментальных данных.

Методы исследования базируются на теории распространения электромагнитных радиоволн, теории цепей, теории информации, структурном программировании, математических методах обработки результатов экспериментов.

Научная новизна. Экспериментально обнаружены поперечные резонансы полости Земля-ионосфера в средних и единичных спектрах атмосфериков в диапазоне частот от 0.3 до 13 кГц.

Обоснована методика оценки добротности полости Земля-ионосфера на поперечных резонансах. Разработаны методы выделения резонансных мод в динамических спектрах атмосфериков, позволяющие оценивать эффективную высоту отражения от ионосферы, дальность до источника. Экспериментально обнаружено преобладание TM волн при распространении атмосфериков с запада на восток и преобладание TE волн при распространении с востока на запад. Предложена и апробирована оригинальная методика пеленгации источников импульсного излучения. Получены длительные непрерывные ряды измерений интенсивности потока и азимутальных распределений СДВ атмосфериков, позволившие проследить динамику активности мировых грозовых центров за период, охвативший смену сезона. Разработан и создан аппаратурный комплекс для регистрации трех компонент э/м поля импульсных излучений и их обработки.

**Научная и практическая ценность работы**. Полученные в диссертации экспериментальные результаты развивают и дополняют знания о распространении электромагнитных волн СНЧ-СДВ диапазонов в волноводе Земля-ионосфера, динамике мировой грозовой активности, позволяют оценить эффективную высоту отражения НЧ волн от ионосферы. Результаты проведенных экспериментов могут быть использованы как для фундаментальных геофизических исследований, так и в прикладных областях, таких, как радионавигация и радиосвязь. Разработанные алгоритмы обработки сигналов, схемы и принципы, использованные при конструировании универсального аналого-цифрового комплекса, могут быть применены для создания однопунктовых систем локации молний, автоматических систем мониторинга нижней ионосферы, новых систем связи.

**Апробация работы**. Результаты исследований были доложены на XII г. Красноярск, 1986 г.` межведомственном семинаре по распространению километровых и более длинных радиоволн, 16 Всесоюзной конференции по распространению радиоволн г. Харьков, 1990 г.`, 3 Всесоюзной научно-технической конференции @Прием и анализ сверхнизкочастотных колебаний естественного происхождения@ ~г. Львов, 1990 г.`, 9 Международной конференции по атмосферному электричеству ~г. Санкт-Перербург, Рос- сия, 1992 г.`, на 24 Генеральной Ассамблее URSI ~ заказной доклад, г. Киото, Япония, 1993 г.` Основные результаты диссертации изложены в 9 печатных работах и включены в ряд отчетов по плановым НИР.

**Структура и объем работы**. Курсовой общим объемом 153 страницы состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 32 рисунка, список литературы из 80 наименований.

Содержание работы. Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, изложено краткое содержание и основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе описана аппаратура, использованная в измерениях. Здесь рассмотрены принципы конструирования широкополосного приемника прямого усиления СДВ диапазона, указаны технические характеристики экспериментальной установки, предназначенной для регистрации и обработки естественных сигналов.

В первом параграфе оценены требуемые параметры антенны и антенного усилителя тракта электрической компоненты. Эти параметры использовались при конструировании приемника.

Во втором параграфе получена оценка эффективной площади магнитной антенны с ферромагнитным сердечником. Отмечено, что реальные антенны с ферромагнитным и воздушным сердечниками, имеющие одинаковое количество витков обмотки, обладают эффективной площадью одного порядка, если диаметр воздушной рамки равен длине ферромагнитного сердечника.

Важным требованием к магнитной антенне, при измерении импульсных полей является передача сигналов без искажения их формы. Эти искажения в индукционной антенне обусловлены тем, что Э.Д.С. пропорциональна производной по времени от падающего магнитного поля. Это приводит к линейному росту модуля коэффициента передачи антенны с частотой и постоянному фазовому сдвигу на 90 Э.Д.С. относительно падающего поля. Для устранения этих недостатков в третьем параграфе предложена схема антенного усилителя для магнитной антенны, построенная на основе усилителя тока. В нем индуктивность магнитной антенны используется для компенсации фазо-частотных искажений. Схема обеспечивает постоянный действительный коэффициент передачи сквозного тракта антенна - антенный усилитель по полю в рабочем диапазоне частот.

В четвертом параграфе приведено описание комплекта аппаратуры для измерения спектров вертикального электрического поля атмосфериков в диапазоне 1 - 10 кГц. В его состав входят:

1. вертикальная электрическая антенна
2. широкополосный антенный усилитель
3. фильтры верхних и нижних частот
4. магнитограф НО-62
5. анализатор спектра СК4-72/2.

Динамический диапазон сквозного тракта регистрации - воспроизведения составлял не менее 40 дБ.

В пятом параграфе описан универсальный аналого-цифровой комплекс, предназначенный для одновременного приема и обработки трех компонент электромагнитного импульса СНЧ-СДВ диапазона. В его состав входят:

1. вертикальная электрическая антенна
2. две магнитные рамочные антенны
3. широкополосные антенные усилители
4. трехканальный тракт полосовых фильтров
5. масштабирующие усилители
6. двенадцатиразрядные АЦП в каждом канале
7. цифровое буферное устройство
8. ПЭВМ @ Электроника - 85 @
9. комплекс программ, обеспечивающих ввод данных в ЭВМ и их обработку в реальном времени.

Технические и эксплуатационные характеристики комплекса:

1. рабочая полоса частот: 0.3 - 13.0 кГц
2. девиации АЧХ и ФЧХ между различными каналами не более 2 дБ и 3 градусов соответственно.
3. пределы ступенчатой регулировки усиления одновременно по трем каналам: 0 - 48 дБ с дискретностью 6 дБ
4. динамический диапазон во всех каналах: не хуже 66 дБ
5. частота дискретизации: 100 кГц
6. длительность запоминаемой цифровой реализации по каждому каналу: 40.96 мсек (3 \* 4096 12-разрядных слов)
7. длительность предыстории импульсного сигнала: от 0 до 38.4 мсек

Предусмотрена фиксация даты и времени прихода каждого сигнала. Передача информации в ЭВМ осуществляется через последовательный ~RS - 232` или параллельный ~ИРПР` интерфейсы.

Режим работы комплекса - ждущий. Запись информации происходит при превышении сигналом в канале электрической компоненты установленного порога. После записи в память буферного устройства, временные формы трех компонент принятого сигнала контролируются по экрану осциллографа. По решению оператора цифровые реализации передаются в память ЭВМ для обработки. В автоматическом режиме каждый принятый атмосферик передается в ЭВМ без предварительной визуальной оценки. Информация в виде файлов накапливается на магнитных дисках.

Во второй главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований влияния поперечных резонансов (ПР), возникающих в вертикальном сечении полости Земля-ионосфера, на спектры СДВ-атмосфериков, рассмотрены поляризационные свойства э/м поля атмосфериков на поверхности Земли.

В начале главы приведен обзор литературы, посвященной резонансным явлениям в полости Земля-ионосфера.

В первом параграфе показано, что при падении волн в направлениях близких к нормали к границам полости собственные частоты сферической полости и плоского промежутка совпадают. Различие между сферической и плоской системами состоит в том, что в сферической полости имеется дискретный спектр собственных частот, определяемый номером зональной гармоники, в то время, как в плоской системе резонансные частоты имеют сплошной спектр. Таким образом, частоты поперечных резонансов, обусловленных переотражениями от границ полости Земля - ионосфера, определяются высотой нижней границы ионосферы над поверхностью Земли, поверхностным импедансом ионосферы, углом падения волн, конструирующих резонансную моду. При возбуждении полости Земля-ионосфера точечным источником - разрядом молнии, возникает набор волн, которые распространяются под различными углами к границам, и соответствуют различным поперечным резонансам. Показано, что для выделения резонансных колебаний, возникающих при нормальном падении на частотах близких к частотам отсечки волновода, необходимо рассматривать хвостовую часть атмосферика.

Во втором параграфе рассмотрены результаты измерений средних энергетических спектров вертикальной электрической компоненты естественных импульсных сигналов в диапазоне 1 - 10 кГц, которые проводились с помощью комплекта аппаратуры, описанного в главе 1. В обработку включались атмосферики, амплитуда которых превышала пороговый уровень, величина которого выбиралась достаточной для предотвращения срабатывания аппаратуры от помех, излучаемых силовой сетью на высших гармониках. Усреднение проводилось по ансамблям, состоявшим из 60- 80 отдельных спектров атмосфериков. Для набора одного ансамбля обычно требовалось от 10 до 45 минут в зависимости от сезона и времени суток.

Были получены средние спектры двух типов: гладкие, с широким плавным максимумом в области частот 4 - 8 кГц, и содержащие характерные резонансные максимумы вблизи частот 2, 4 кГц. Средние спектры первого типа наблюдались, как правило, в светлое время суток, тогда как спектры второго типа - только ночью. Как показал эксперимент, резонансная структура средних спектров сохраняется в нескольких подряд идущих сериях измерений. Время жизни резонансной структуры составляет от нескольких десятков минут до единиц часов, что согласуется с временем существования локальных грозовых очагов.

Таким образом, приведенные результаты наблюдений позволили заключить, что поперечные резонансы проявляются в средних спектрах, если во время проведения измерений существовал достаточно мощный компактный грозовой очаг. В этом случае процедура усреднения сглаживает тонкую структуру пиков, возникающих в спектрах отдельных импульсов, подчеркивая резонансные максимумы.

В третьем параграфе рассмотрены результаты трехкомпонентных измерений электромагнитного поля атмосфериков в диапазоне 0.3 - 13 кГц, выполненных на борту научно-исследовательского судна. Регистрация сигналов вертикальной электрической и двух скрещенных горизонтальных магнитных компонент проводилась с помощью разработанного автором комплекса ~см. Гл. 1`. Исследовались сигналы характерной формы с многократными отражениями, записанные в ночное время суток. Цифровые реализации трех компонент поля длительностью 40 мсек. записывались на гибкие магнитные диски и обрабатывались впоследствии на ПЭВМ IBM PC AT. Для каждого обрабатываемого сигнала определялось направление прихода волны, а затем система координат в точке наблюдения разворачивалась на источник. Полученные вертикальная электрическая, а также азимутальная и продольная магнитные компоненты поля подвергались спектральному анализу с частотным разрешением 50 Гц. Характерная форма спектра амплитуд представляет собой ряд широких изрезанных максимумов, начинающихся вблизи частот ПР и, в среднем, спадающих с ростом частоты.

Показано, что поперечные резонансы, соответствующие близким к нормальному углам падения волн наблюдаются в спектрах хвостовой части атмосфериков.

Были получены также динамические спектры электрической и магнитных компонент поля (сонограммы). В обработку включались последовательно отрезки длительностью 2.56 мсек., начало которых сдвигалось с шагом 0.4 мсек. от начала импульса к “хвосту”. При этом использовалось временное окно Хэмминга, что уменьшило дисперсию спектральных оценок. Получающиеся максимумы в текущих спектрах группировались при этом в резонансные ветви (моды), имеющие вид кривых, монотонно спадающих по частоте с увеличением времени, асимптотически приближающихся к значениям частот отсечки волновода. В результате выделения таких мод получались временные зависимости частот ПР, разности фаз между спектральными составляющими горизонтальных магнитных компонент и отношений их амплитуд. Для увеличения разрешения по частоте значения частот максимумов получались путем определения “центра тяжести” спектрального пика по соседним отсчетам в спектре. В сонограммах различных атмосфериков наблюдались от одной до восьми мод. В основной массе импульсов можно было выделить не более двух первых мод, пригодных для анализа.

В результате обработки более чем 200 ночных импульсов, зарегистрированных в южном полушарии, путем выделения первой и второй моды, было установлено, что, независимо от направления прихода, поляризация электромагнитного поля в хвостовой части стремится к левой ~вектор поля вращается по часовой стрелке и совпадает с направлением вращения положительного заряда вокруг вектора магнитного поля Земли `. В ряде обработанных импульсов (около 30 штук) для первой моды наблюдалось изменение знака поляризации в начальной части. Переход от начальной линейной поляризации к конечной левой мог происходить тремя путями:

1. линейная - левая - правая - левая;
2. линейная - правая - левая;
3. линейная - левая,

причем для второй моды поляризация изменялась только от линейной к левой.

Частоты резонансных максимумов, соответствующих ПР, во времени монотонно спадают, асимптотически стремясь к частотам отсечки волновода. Оценки резонансных частот, соответствующих нормальному падению волн, дают величину 1.70 ± 0.05 кГц для первого резонанса, что соответствует эффективным высотам отражения от 85 до 91 км. Кратность частоте первой моды соблюдается для высших мод с доступной точностью.

Обнаружено, что в атмосфериках, приходящих с востока преобладает продольная компонента, а в атмосфериках, приходящих с запада - поперечная компонента магнитного поля.

В третьей главе обсуждаются результаты морского мониторинга временных вариаций числа и направлений прихода СДВ атмосфериков.

В первом параграфе рассматривается методика пеленгации атмосфериков, основанная на вычислении среднего вектора Умова-Пойнтинга для импульсного сигнала. Предложенная методика отличается от известных узкополосных и широкополосных способов тем, что позволяет работать во временной области, а также использовать когерентную составляющую импульсных сигналов.

Реализация предложенной методики пеленгации на базе универсального аналого-цифрового комплекса позволила провести измерения суточных вариаций азимутальных распределений и интенсивности потоков СДВ-атмосфериков. Измерения проводились на борту НИС “Академик Вернадский” в 1991г. Маршрут судна проходил в Индийском океане между Африканским и Азиатским мировыми грозовыми очагами, а также в Атлантическом океане между Африканским и Американским очагами. Это обстоятельство в обоих случаях позволило наблюдать одновременно два мировых грозовых очага из одного пункта.

До начала измерений путем моделирования алгоритма обработки была решена задача оценки потерь, возникающих из-за конечного быстродействия аппаратуры. Как правило, в экспериментах значения интенсивности регистрируемого потока находились в пределах от 2000 до 4000 имп/час, что соответствует потерям от 10% до 23% входных событий. Максимальные значения интенсивности потока достигали 6000 имп/час, при этом потери составляли 32%. Полученные оценки пропусков являются систематическими погрешностями и в принципе могут быть существенно уменьшены.

В диссертацию вошли результаты 39 - суточных морских измерений, когда были построены суточные вариации плотности потока атмосфериков и соответствующих им азимутальных распределений молний, составившие ансамбли в 6, 11 и 22 суток непрерывной регистрации.

Показано, что в Индийском океане практически весь поток атмосфериков был сосредоточен в двух секторах, каждый шириной около 30-35 градусов. Эти сектора оказались ориентированы на континентальные и островные мировые грозовые центры в Африке и Азии. Ориентация и ширина этих секторов оставались стабильными, испытывая небольшие флуктуации, не только в течение суток, но и от суток к суткам. В то же время, были отмечены существенные временные вариации числа атмосфериков, приходящих из этих секторов. При приближении к суше размеры секторов увеличивались, а их структура усложнялась. Суточные вариации азимутальных распределений проявляются в виде изменений относительных амплитуд отдельных максимумов, однако, положение этих максимумов неизменно совпадает с направлением на Азиатский, Африканский и Американский мировые грозовые центры, а сами максимумы приходятся, как правило, на 9, 16 и 20 часов мирового времени.

Было проведено сопоставление суточных вариаций интенсивности потока атмосфериков и уровня шума в СНЧ-диапазоне ~на частоте около 100 Гц`, измеренных вблизи южного побережья Африки. Результаты указывают, что в периоды максимальной активности африканских грозовых центров, наблюдается линейная связь между СНЧ и СДВ данными. Это обстоятельство позволяет предсказывать уровень поля на СНЧ с помощью простой методики счета СДВ-атмосфериков.

Результаты морских измерений статистических характеристик СДВ-атмосфериков показывают, что глобальная грозовая активность определяется источниками, связанными с континентальными грозовыми центрами, расположенными на суше. В течение суток доминирующая роль в глобальной грозовой активности переходит от одного континентального грозового центра к другому, “перепрыгивая” через океаны, вслед за движением терминатора.

В заключении кратко отражены основные результаты и выводы, выносимые на защиту диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработан и в режиме длительной непрерывной работы испытан в сухопутных и морских условиях аналого-цифровой комплекс аппаратуры, предназначенной для измерений трех компонент поля атмосферных импульсных сигналов в полосе частот 300 Гц - 13 кГц.

1.1. Комплекс позволил обнаружить поперечные резонансы полости Земля-ионосфера в средних спектрах атмосфериков.

1.2. Комплекс позволил провести трехкомпонентные измерения электромагнитного поля СДВ-атмосфериков, а также их азимутальных распределений и вариаций интенсивности потока в реальном масштабе времени при интенсивности потока до 6000 импульсов в час.

1.3. Универсальный аналого-цифровой комплекс показал высокую надежность, работая непрерывно в течение четырех месяцев в морских условиях на борту научно-исследовательского судна.

2. Проведены экспериментальные исследования поперечных резонансов (ПР) естественного волновода, образованного поверхностью Земли и нижней кромкой ионосферы. Впервые экспериментально обнаружены поперечные резонансы в средних спектрах атмосфериков. Резонансные максимумы в спектрах единичных СДВ-атмосфериков позволили оценивать высоту нижней кромки ионосферы.

2.1. В спектре всей временной реализации атмосферика поперечные резонансы маскируются из-за интерференции волноводных нормальных волн. Это обстоятельство затрудняет обнаружение ПР.

2.2. ПР проявляются наиболее ярко в спектрах ночных атмосфериков, хвостовая часть которых содержит многократные отражения между границами волновода. При этом, наиболее отчетливо частоты ПР видны в координатах время-частота (сонограммах), что обеспечивает определение эффективного поперечного размера волновода.

3. Выполнены поляризационные исследования сигналов ночных атмосфериков в южном полушарии. Обнаружена поляризационная невзаимность распространения на трассах запад-восток, восток-запад.

3.1. Обнаружено, что в атмосфериках приходящих с востока преобладает продольная компонента горизонтального магнитного поля, а в атмосфериках, приходящих с запада - поперечная компонента.

3.2. Поляризация электромагнитного поля атмосфериков в результате многократных отражений от ионосферы становится левой эллиптической. В ряде случаев для первой моды наблюдается перемена направления вращения вектора магнитного поля с правой ~в начале атмосферика ` на левую ~в хвостовой части`, в то время, как для второй моды поляризация остается левой на всей длительности атмосферика.

4. Предложена, обоснована и апробирована методика определения пеленгов источников импульсных сигналов, использующая измерение среднего вектора Умова-Пойнтинга во временной области. Эта методика позволила получать в реальном времени гистограммы азимутальных распределений СДВ-атмосфериков, и применялась при обработке сигналов отдельных атмосфериков.

5. Получены длительные непрерывные ряды наблюдений интенсивности потока и азимутальных распределений СДВ атмосфериков, которые позволили проследить динамику грозовой активности в мировых грозовых центрах.

5.1. Морской мониторинг показал, что основной вклад в мировую грозовую активность дают континентальные и островные грозовые центры. Вариации интенсивности потока импульсов хорошо интерпретируются изменениями во времени активности мировых грозовых очагов, тогда как направления прихода атмосфериков прямо указывают на эти грозовые центры.

5.2. По результатам пеленгации обнаружен дрейф африканских источников с юга на север с февраля по март 1991г. на расстояние около 1500 км. Этот результат подтверждает справедливость модели континентальных грозовых центров. Пеленги гроз, измеренные экспериментально, хорошо интерпретируются и в том случае, когда смещение приемника относительно источников является существенным.

5.3. Сопоставление суточных вариаций интенсивности потока атмосфериков и уровня шума в СНЧ-диапазоне, измеренных вблизи южной оконечности Африки указывает на линейную связь между ними в периоды суточной активности африканских очагов.

ГЛАВА 1. АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИМПУЛЬСНЫХ ПОЛЕЙ СНЧ-СДВ ДИАПАЗОНОВ

Представленные в данной работе экспериментальные результаты были получены с помощью двух различных комплектов аппаратуры, сходных по назначению и различных по возможностям регистрации и обработки сигналов. При построении приемной аппаратуры использовалась схема прямого усиления.

Для приема, регистрации и получения спектральных характеристик вертикальной компоненты электрического поля СНЧ-СДВ атмосфериков в диапазоне частот от 1 до 10 кГц использовался комплекс аппаратуры, описание которого приведено в параграфе 1.5. Комплекс использовался на полигоне в пос. Мартовая Харьковской обл. в течение 1985 - 1987 гг. С его помощью проводились исследования средних спектров вертикальной электрической компоненты СДВ-атмосфериков, в результате которых были обнаружены поперечные резонансы полости Земля-ионосфера.

Универсальный СНЧ-СДВ аналого-цифровой комплекс, описанный в параграфе 1.6 используется в измерениях с 1990 г. Комплекс применялся для регистрации и предварительной обработки трех компонент электромагнитного поля атмосфериков в полосе частот от 0.3 до 13 кГц на сухопутных и морских измерительных пунктах. С его помощью был накоплен банк данных временных реализаций трех компонент, была опробована широкополосная методика пеленгации СДВ - атмосфериков во временной области, которая применялась для измерения азимутальных распределений источников и их суточных вариаций в акваториях Индийского и Атлантического океанов в течение января - апреля 1991 г.

Общую структуру обоих комплексов можно представить в виде двух основных частей: 1` одно-трех-` канальный широкополосный приемник прямого усиления\* 2` устройство регистрации и обработки сигналов. Упрощенная функциональная схема приемо - анализирующего комплекса для приема одной компоненты поля представлена на Рис. 1.1.

В данной главе рассматриваются принципы конструирования и выбора параметров широкополосного приемника прямого усиления СДВ диапазона, а также основные технические характеристики, предъявляемые к аппаратуре регистрации и обработки электромагнитного поля естественных импульсных сигналов.

1.1 Электрическая антенна

В качестве электрической антенны ~ЭА` использовался емкостной зонд, представляющий собой изолированный металлический электрод, поднятый над уровнем земли на стальной мачте. Принцип действия антенн такого типа был подробно проанализирован в работе [62]. Эквивалентная схема емкостной антенны, размеры которой малы по сравнению с длиной волны в диапазоне СНЧ-СДВ, представлена на Рис. 1.2. Здесь введены следующие обозначения:

1. С - собственная емкость активного электрода
2. С - входная емкость антенного усилителя
3. R - входное сопротивление антенного усилителя
4. е = h E - потенциал, наводимый на активном электроде антенны
5. E - вертикальная компонента напряженности электрического поля
6. h - действующая высота ЭА, которая в случае плоской идеально проводящей Земли близка к удвоенной геометрической высоте подъема зонда над поверхностью`.

Следовательно, эквивалентом электрической антенны на высоких частотах является емкостной делитель. Коэффициент передачи в этом случае не зависит от частоты сигнала, а определяется исключительно отношением емкостных параметров эквивалентной схемы. Чтобы достичь максимального коэффициента передачи, необходимо уменьшать входную емкость антенного усилителя. С другой стороны, в случае, когда есть запас по чувствительности приемника, увеличение С позволяет расширить рабочий диапазон в сторону нижних частот. При заданной частоте среза за счет увеличения С можно уменьшить входное сопротивление антенного усилителя. Это повышает его стабильность при воздействии неблагоприятных атмосферных условий. На нижних частотах, где справедливо условие:

wR (C + C )<<1 ,

имеет место следующее выражение:

K = iwC R ,

т.е., эквивалентом нашей электрической антенны является дифференциальная цепь первого порядка с крутизной спада АЧХ в сторону нижних частот 6 дБ/окт. Собственная емкость применяющихся антенн составляла в различных экспериментах от 10 до 40 пФ. Оценим величину входного сопротивления антенного усилителя, необходимого для получения равномерной амплитудно-частотной характеристики ~АЧХ` антенны выше 1 кГц при емкости антенны С = 40 пФ.

Для обеспечения требуемого высокого входного сопротивления и согласования антенны с соединительным кабелем непосредственно в корпус антенны был установлен усилитель с полевым транзистором во входной цепи, обеспечивающий малую входную емкость [30]. Подача питания осуществлялась по сигнальному кабелю. С целью подавления высокочастотных помех, возбуждаемых в антенне и в соединительном кабеле сигналами радиостанций, результаты детектирования которых во входных цепях могут значительно повысить уровень помех в рабочем диапазоне частот, на входе антенного усилителя и на выходе кабеля были включены пассивные интегрирующие RC-цепи 1-го порядка, настроенные на частоту около 100 кГц.

1.2 Магнитная антенна

В настоящем параграфе получена оценка эффективной площади магнитной антенны ~МА` с ферромагнитным сердечником, а также вытекающие из нее рекомендации по выбору типа сердечника.

При измерениях низкочастотных магнитных полей в качестве магнитных антенн обычно применяют проволочные соленоиды с ферромагнитным или воздушным сердечником. Главной характеристикой таких антенн является величина Э.Д.С., развиваемой на зажимах соленоида, при заданном внешнем магнитном поле фиксированной частоты. Эта величина зависит от эффективной площади магнитной рамки, которая в свою очередь определяется материалом сердечника, его размерами, числом витков обмотки, их средней площадью.

При расчете магнитной антенны возникает задача максимизации эффективной площади, что на первый взгляд связано с варьированием четырех перечисленных выше параметров. Можно показать, что эффективная площадь магнитной рамки с сердечником, а значит и ее чувствительность, фактически определяется не четырьмя, а двумя параметрами.

Эффективная площадь МА с сердечником равна [29,42]

S = pb m N. (1.2.1)

Здесь предполагается, что сердечник из материала с эффективной магнитной проницаемостью m имеет форму вытянутого сфероида с полуосями a > b = c, а N - число витков соленоида.

Для эллипсоидального сердечника конечных размеров m оказывается меньшим, нежели m магнитного материала. Это уменьшение описывается известным коэффициентом размагничивания і [29, 42, 19]. Последний определяется геометрическими параметрами сердечника. При этом оказывается, что использование материалов с высоким m оказывается выгодным только в случае сильно вытянутых сердечников. На практике эксплуатация таких антенн сопряжена с целым рядом неудобств (например, вибрационные помехи), поэтому как правило выполняется условие і>>1/m.

Эффективная магнитная площадь реальных антенн с точностью до слагаемых порядка a /mb<<1 связана исключительно с геометрическими параметрами, а влияние магнитной проницаемости m носит поправочный характер. Сохраняя главный член в формуле (2.2) получим сравнительно простое соотношение:

Как видно, S определяется в основном числом витков соленоида N и длиной сердечника 2a. Причем она равна примерно площади воздушной рамки с тем же числом витков, если их диаметр равен длине сердечника 2a. Насколько нам известно, это обстоятельство в литературе не отмечалось.

Таким образом, при m>>a/b увеличение проницаемости сердечника не дает заметного выигрыша в чувствительности. Этим, по-видимому, и объясняется близость размеров всех низкочастотных МА, используемых в практике измерений [8].

Полученная выше приближенная формула (1.2.3) существенно упрощает расчет и позволяет сделать следующие практические выводы.

1. Реальные магнитные антенны удовлетворяют условию m(b /a )>>1, поэтому их эффективная площадь зависит от числа витков обмотки и длины сердечника.
2. При фиксированной длине стержня 2a эффективная площадь тем больше, чем больше толщина сердечника.
3. При фиксированном радиусе сердечника b эффективная площадь монотонно возрастает с увеличением длины стержня, пока не достигает наибольшего значения, определяемого проницаемостью материала сердечника.
4. Магнитные антенны с воздушным и ферромагнитным сердечниками, имеющие одинаковое количество витков обмотки, обладают примерно одинаковой эффективной площадью, если диаметр воздушной рамки равен длине ферромагнитного сердечника.

Таким образом, проблема сердечника для магнитной антенны сводится к выбору одномерной конструкции с ферромагнитным сердечником или двумерной - с воздушным, при линейных размерах одного порядка.

Последнее обстоятельство учитывалось при выборе воздушной рамки в качестве МА для широкополосных измерений. Это позволило без потери чувствительности избавиться от таких проблем, как насыщение ферромагнитного сердечника внешним

постоянном магнитном полем Земли, собственные шумы феррита и т.п., присущих МА с ферромагнитными сердечниками.

В качестве приемных антенн магнитного поля использовались экранированные воздушные рамочные антенны, входящие состав промышленного СДВ приемника ПК-66. Для обеспечения требуемой широкой полосы рабочего диапазона рамки были модифицированы путем удаления элементов резонансного контура, встроенных в корпуса антенн. Обмотка антенны содержит 60 витков провода, диаметр антенны составляет 80 см.

1.3 Антенный усилитель для магнитной антенны

Не менее важным требованием к датчику магнитного поля при измерении импульсов является передача сигналов без искажения их временной формы. При отсутствии ~или малости` нелинейных искажений форма сигнала зависит от частотных искажений, определяемых свойствами комплексного коэффициента передачи приемного тракта. Частотные искажения в индукционной соленоидальной антенне обусловлены тем, что Э.Д.С., возникающая в ней, пропорциональна производной по времени от индукции падающего магнитного поля:

Э.Д.С. = - K -- cosq , ~1.3.1`

где B - индукция магнитного поля, K - постоянный коэффициент, зависящий от числа витков катушки и конструкции магнитной антенны, q - угол между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости намотки МА. Э.Д.С., возбуждаемая в антенне на фиксированной частоте равна:

Э.Д.С. = iw K B cosq, (1.3.2)-

где w - круговая частота колебаний, i - мнимая единица; зависимость от времени предполагается вида exp(-iwt). Мы видим, что Э.Д.С. на выходе МА нарастает линейно с ростом частоты, а мнимая единица описывает фазовый сдвиг Э.Д.С. на 90 по отношению к падающему магнитному полю. Эквивалентом магнитной антенны на низких частотах служит дифференциальная цепь первого порядка. Чтобы скомпенсировать линейное нарастание с частотой модуля коэффициента передачи и постоянный фазовый сдвиг на 90 во всей области рабочих частот относительно падающего магнитного поля, применяются разнообразные достаточно сложные конструктивные и схемотехнические методы [29, 1].

Нами была предложена и реализована простая схема антенного усилителя магнитной антенны, обеспечивающего постоянство амплитудно-частотной характеристики ~АЧХ` и устранение фазового сдвига на 90 фазо-частотной характеристики ~ФЧХ` сквозного тракта "антенна - антенный усилитель" по полю в широком диапазоне частот. Это необходимо для передачи сигналов без искажений формы. Принципиальная схема устройства, за основу которой взят усилитель тока ~ см. например [13] ` , приведена на Рис. 1.3. Здесь использованы следующие обозначения:

1. МА - магнитная антенна;
2. R - сопротивление обратной связи;
3. R - активное сопротивление обмотки;
4. C - паразитная межвитковая емкость;
5. А1 - операционный усилитель.

Проанализируем работу данной схемы. Магнитная антенна ~МА` подключена ко входу операционного усилителя, который работает в режиме усиления тока, что достигается за счет введения отрицательной обратной связи через сопротивление R, за счет которой на инвертирующем входе поддерживается потенциал, равный потенциалу неинвертирующего входа, т. е. нулю. С другой стороны, потенциал инвертирующего входа образуется суммой втекающего во входную цепь и вытекающего через сопротивление обратной связи токов. Эти токи должны быть равны по величине и противоположны по знаку. Входной ток циркулирует в контуре, образованном короткозамкнутой катушкой МА с индуктивностью L .

i = Э.Д.С./Z , (1.3.3)

где Z = iwL - комплексное сопротивление МА. Подставив выражения для Э.Д.С. (1.3.2) и Z в формулу для входного тока (1.3.3), получим, что ток в короткозамкнутой МА пропорционален индукции падающего магнитного поля и не зависит от частоты:

i = iw K B cosq/iwL = K B cosq/L

Выходное напряжение найдем из условия равенства втекающего и вытекающего токов на инвертирующем входе операционного усилителя:

i = U /R = - i .

Отсюда получаем

U = -R K B cosq/L.

Следовательно, коэффициент передачи устройства по полю равен:

K = U / B = -R K cosq/ L . (1.3.4)

Как видно из полученного выражения, коэффициент передачи устройства по магнитному полю действителен и не зависит от частоты. Это значит, что АЧХ устройство равномерна, а вносимый фазовый сдвиг на всех частотах равен 180 градусам.

Полученный результат справедлив в случае, если компоненты антенного усилителя и магнитная антенна обладают идеальными характеристиками. В действительности такие параметры, как паразитные емкости МА, конечное активное сопротивление намоточных проводов, конечный коэффициент усиления операционного усилителя ограничивают диапазон частот, в котором остается справедливым равенство ~1.3.4`.

Рассмотрим влияние конечного активного сопротивления МА на коэффициент передачи устройства. Полный коэффициент передачи по полю в этом случае записывается в следующем виде:

KB = - Rjc K cosq iw/ (Ra + iwL).

При wL . Ra мы получаем коэффициент передачи для идеального случая (1.3.4). При wL , Ra коэффициент передачи по полю пропорционален частоте входного сигнала:

KB = Rjc cosq iw/ Ra.

Отсюда видно, что величина активного сопротивления, включенного последовательно с МА определяет нижнюю частоту среза устройства.

Теперь рассмотрим влияние паразитной емкости МА на коэффициент передачи устройства. Напряжение на выходе МА равно:

Uc = Э.Д.С./(1-w LC `, ~1.3.5`

Коэффициент передачи устройства:

Uds[/Э.Д.С. = - Rjc/ Zrjyn, 1.3.6`

где Zrjyn - полное сопротивление контура во входной цепи.

Zrjyn = iwL / ( 1-w L C )

Подставляя выражения для Uc и Z в равенство ~1.3.6` получим

Uds[/ Э.Д.С. = - Rjc/iwL,

Данное выражение, с учетом (1.3.2), эквивалентно ~1.3.4), т.е. коэффициент передачи устройства не зависит от паразитной емкости. Полученный вывод можно было сделать из следующих простых соображений: поскольку на инвертирующем входе поддерживается нулевой потенциал, то через паразитную емкость C не текут токи смещения, и, следовательно, ее величина на коэффициент передачи не влияет.

Тем не менее, при конструировании реальных антенных усилителей следует учитывать что вследствие конечного быстродействия операционных усилителей паразитная емкость антенны может исказить коэффициент передачи на высоких частотах.

Схема усилителя для магнитной антенны, использовавшегося в измерениях приведена на Рис.1.4. Амплитудно-частотная характеристика тракта МА - антенный усилитель по полю, снятая с помощью соленоидального излучателя, представлена на Рис.1.5.

1.4 Фильтры нижних и верхних частот

Фильтры нижних и верхних частот применяются в приемном тракте, предназначенном для анализа атмосфериков, с целью подавления сигналов помех, частота которых лежит за пределами рабочего диапазона. В области частот ниже 1 кГц помехи представлены излучением на частотах гармоник силовой промышленной электросети. В области частот выше 10 кГц - сигналами навигационных и радиовещательных радиостанций СДВ - ДВ диапазонов.

При создании аппаратуры для исследования вертикальной электрической компоненты электромагнитного поля атмосфериков в качестве ФВЧ и ФНЧ были выбраны активные фильтры второго порядка, которые обладают крутизной спада модуля амплитудно-частотной характеристики за полосой пропускания равной 12 дБ/окт. С помощью фильтров наиболее мощная помеха от силовой сети частотой 50 Гц была подавлена почти на 50 дБ, а также существенно ослаблены помехи от навигационных станций СДВ диапазона, что позволило привести динамический диапазон сигнала в соответствие с параметрами использовавшегося для регистрации магнитографа НО-62.

При использовании цифровой обработки принятых сигналов производится их преобразование к числовой последовательности ~дискретизация`. В соответствии с теоремой Котельникова, частота дискретизации должна превышать удвоенное значение максимальной частоты составляющие которой присутствуют в сигнале. Чтобы ограничить спектр сигнала, его пропускают через фильтр нижних частот. Важную роль для уменьшения ~исключения` искажений за счет наложения спектра при дискретизации и цифровой обработке в ЭВМ играют параметры фильтра нижних частот. Поскольку реальный фильтр обладает не бесконечной крутизной спада АЧХ (такой фильтр физически нереализуем), необходимо учитывать присутствие в сигнале частотных составляющих, лежащих выше частоты среза ФНЧ.

При конструировании универсального аналого-цифрового комплекса частота дискретизации в аналого-цифровых преобразователях была выбрана равной 100 кГц при верхней границе рабочего частотного диапазона, равной 13 кГц. Достаточно высокое значение частоты дискретизации позволило практически исключить погрешность аналого-цифрового преобразования, вызванную наложением частот “фолдингом” в спектре и применить ФНЧ невысокого порядка, более простого в настройке, более стабильного по параметрам и, что важно для измерения азимутов, вносящего меньшие фазовые искажения. В качестве фильтров верхних и нижних частот были выбраны фильтры Баттерворта 6-го порядка, обеспечивающие затухание вне полосы пропускания равное 36 дБ/окт. При проектировании фильтров применялись схемы звеньев на операционных усилителях и методики расчета, приведенные в [25].

1.5 Комплекс аппаратуры для исследования вертикального электрического поля СДВ-атмосфериков

Комплекс предназначен для регистрации и спектральной обработки вертикальной компоненты электрического поля СДВ атмосфериков. В его состав входят:

1. вертикальная электрическая антенна, представляющая собой изолированный металлический диск диаметром 30 см., установленный на мачте высотой 3 м.
2. широкополосный антенный усилитель с входным сопротивлением около 6 МОм и динамическим диапазоном не менее 60 дБ,
3. фильтры верхних и нижних частот с частотами среза соответственно 1 и 10 кГц и затуханием 12 дБ/окт.,
4. магнитограф НО-62.

Блок-схема и передаточная характеристика всего приемо - регистрирующего тракта, которая контролировалась через эквивалент антенны, приведены на Рис. 1.6. и 1.7.

Прием и регистрация сигналов происходила следующим образом. Сигнал с антенны через интегрирующую RC цепь, поступал на антенный усилитель. С выхода антенного усилителя по экранированному кабелю, длиной около 50 м, сигнал подавался на фильтры верхних и нижних частот, настроенные соответственно на 1 и 10 кГц.

Между выходом кабеля и входом полосового активного фильтра была включена интегрирующая RC-цепь аналогичная цепи, установленной на входе антенного усилителя. Отфильтрованный и усиленный до необходимого уровня сигнал записывался на магнитограф НО-62 в режиме прямой записи, который обеспечивал требуемую полосу частот и динамический диапазон не менее 40 дБ.

Спектральная обработка записей, выполненных на магнитографе НО-62, проводилась с помощью спектроанализатора СК4- 72/2. Для обработки импульсов совместно с анализатором спектра использовалось устройство задержки остановки записи.

Это устройство позволяет регулировать положение атмосферика относительно начала анализируемой временной реализации, при этом сохраняется его передний фронт и предысторию импульса. Кроме этого, появляется возможность очистить от помех часть реализации, хранящейся в памяти СК4-72, не занятую анализируемым импульсом.

1.6 Универсальный аналого-цифровой комплекс для исследований многокомпонентных импульсных полей СНЧ-СДВ диапазонов

При создании универсального аналого-цифрового комплекса была поставлена задача высокоскоростного трехкомпонентного анализа импульсных полей СНЧ-СДВ диапазонов. Известный анализатор спектра СК4-72, обеспечивает параллельный спектральный анализ сигналов в полосе частот от 0 до 20 кГц, при этом разрешение по частоте в диапазоне 100 Гц - 20 кГц равно 100 Гц. СК4-72 обеспечивает достаточно высокое быстродействие и широкие возможности по обработке сигналов, например: различные виды усреднения спектров и сигналов, определение их параметров, возможность сопряжения с электронно-вычислительной машиной. Однако использование этого прибора для одновременного анализа нескольких компонент поля исключено, поскольку связано с необходимостью установки отдельного комплекта для каждой компоненты. В последнее время стали доступны персональные ЭВМ, обладающие высоким быстродействием, такие, как “Электроника –85” ~PDP-11`, IBM PC XT/AT, а также высокоскоростные аналого-цифровые преобразователи. В связи с этим оказалось возможным создание мобильной аппаратуры для регистрации и цифрового анализа электрических сигналов в диапазоне частот вплоть до десятков и сотен килогерц.

В данном параграфе описан комплекс аппаратуры, предназначенный для приема, регистрации, ввода в ЭВМ и цифровой обработки сигналов вертикальной электрической и двух горизонтальных магнитных компонент импульсного электромагнитного поля СНЧ-СДВ диапазонов по трем каналам одновременно. Функциональная схема комплекса представлена на Рис. 1.8. В состав аппаратно-программного комплекса входят:

1. вертикальная электрическая антенна\*
2. две магнитные экранированные воздушные рамочные антенны\*
3. широкополосные антенные усилители для каждой из антенн;
4. трехканальный тракт полосовых фильтров; в состав каждого канала входят:
5. фильтр Баттерворта верхних частот 6-го порядка с крутизной затухания за пределами полосы пропускания 36 дБ/окт.;
6. фильтр Баттерворта нижних частот 6-го порядка, с крутизной затухания за пределами полосы пропускания 36 дБ/окт.;
7. масштабирующий усилитель со ступенчатой регулировкой коэффициента усиления\*
8. двенадцатиразрядный АЦП типа Ф4223 в каждом канале\*
9. цифровое буферное устройство , служащее для запоминания трех компонент сигнала в виде последовательности цифровых отсчетов, визуального контроля их временной формы на экране осциллографа и передачи цифровых реализаций через последовательный или параллельный порт в ЭВМ\*
10. ПЭВМ @ Электроника - 85 @ \*
11. комплекс программ, написанных на Ассемблере и Фортране, обеспечивающих ввод данных и их обработку в ЭВМ в реальном времени.

Технические и эксплуатационные характеристики комплекса следующие:

1. полоса частот принимаемых сигналов: 0.3 - 13.0 кГц\*
2. пределы ступенчатой регулировки усиления одновременно по трем каналам: 0 - 48 дБ с дискретностью 6 дБ\*
3. динамический диапазон во всех каналах: не хуже 66 дБ\*
4. различия в АЧХ и ФЧХ между каналами не превышают соответственно 2 дБ и 3 градусов (см. ниже).
5. частота дискретизации % 100 кГц\*
6. длительность запоминаемой цифровой реализации по каждому каналу % 40.96 мсек;

Режим работы комплекса - ждущий. Запись информации происходит при превышении сигналом в канале электрической компоненты заданного порога . После записи в память буферного устройства временные формы трех компонент принятого сигнала контролируются одновременно с помощью осциллографа. После принятия решения оператором сигнал или стирается, или передается в память ЭВМ. Предусмотрен также автоматический режим, при котором каждый принятый сигнал передается в ЭВМ без предварительной визуальной оценки. Информация в виде файлов, содержащих цифровые реализации трех компонент импульса или результаты обработки накапливается на гибких магнитных дисках или на жестком магнитном диске типа @ Винчестер @.

Измерение фазо-частотных характеристик проводилось с помощью фигур Лиссажу в два этапа. Сначала с помощью имитаторов поля были получены фазовые характеристики каждой из антенн вместе с антенными усилителями (для магнитных антенн применялся соленоидальный излучатель, а для электрической антенны - электрический излучатель). Поскольку частота среза электрической антенны лежит вблизи 80 Гц, а магнитной - около 200 Гц, в рабочем диапазоне частот приемника заметные фазовые искажения не наблюдались. Затем производились измерения разности фаз между отдельными каналами приемника. Оказалось, что взаимные отклонения сосредоточены вблизи частот среза ФВЧ и ФНЧ, достигая 3 (между Е - и Н - каналами в окрестности 10 кГц, где максимальны отличия и в АЧХ, см. рис 1.9).

Фазовые невязки каналов могут сыграть заметную роль при проведении узкополосных измерений, если же используется широкополосная методика, то их влияние существенно ослабляется. В настоящей диссертации (см. Гл.3) компоненты E- и H-полей применяются попарно при вычислении интегральных проекций вектора Умова-Пойнтинга P = E K H (пеленгование источников). Очевидно, что фазовые невязки Dv(f) обусловят относительную погрешность измерения проекций вектора P , равную на фиксированной частоте:

,

где - разность фаз между каналами E и H. Поскольку в предложенной нами широкополосной методике измерений проводится интегрирование по частоте, результирующая погрешность составит:

,

Эта погрешность оценивается сверху при = = const величиной

На самом деле фазы отличаются в узких полосах вблизи частот среза приемника, поэтому справедлива более реалистичная оценка:

где F - полная полоса рабочих частот приемного тракта, а dF - область частот, где наблюдаются фазовые искажения.

Таким образом, измеренное значение = 3, дает верхнюю оценку относительной погрешности 0.13 %, (порядка погрешности квантования по амплитуде), а более реалистическая оценка с учетом полосы частот оказывается на порядок меньшей.

Приведенные оценки позволяют в дальнейшем исключить из рассмотрения влияние фазовых невязок широкополосных каналов.

Основным предназначением цифровой части приемного устройства является преобразование выделенных аналоговых сигналов в последовательность цифровых отсчетов, обеспечение визуального контроля временных форм зарегистрированных импульсов и ввод в ЭВМ, где производится их обработка.

При разработке функциональной схемы цифровой части приемника принимались во внимание параметры исследуемых сигналов, условия, накладываемые на частоту дискретизации и быстродействие портов ввода-вывода ЭВМ @Электроника-85@. Поскольку частота квантования была выбрана равной 100 кГц, а число каналов, по которым ведется одновременная регистрация равно трем, суммарная скорость ввода информации в ЭВМ должна превышать 300 кГц. Это оценка минимального быстродействия, т.к. мы не учли, что кроме ввода необходимо в реальном времени проводить простейшую обработку ~сравнение текущего отсчета с пороговым значением и т. п.`. Такое быстродействие не обеспечивается стандартными каналами ввода-вывода использовавшейся ЭВМ @Электроника-85@. Чтобы согласовать по быстродействию выходные сигналы АЦП и порты ввода-вывода, была выбрана схема с буферизацией входного потока цифровых данных. Буферное устройство выполняет следующие функции:

1. - вырабатывает импульсы запуска АЦП\*
2. - после срабатывания компаратора запоминает во внутренней памяти в цифровом виде три временные реализации длиной 4096 12-тиразрядных отсчетов в двоично-дополнительном коде\*
3. - обеспечивает сохранение "предыстории" импульсов\* длительность которой регулируется в пределах от 0 до 15/16Т, где Т- длительность всей реализации\*
4. - обеспечивает вывод записанных в памяти сигналов на экран осциллографа с целью их визуального контроля\*
5. - обеспечивает передачу информации в ЭВМ по стандартным параллельному ~ИРПР` или последовательному ~RS-232` интерфейсам\*
6. - с помощью встроенных часов - календаря фиксирует полную информацию о времени с точностью до десятков миллисекунд и дате в момент прихода импульса, которая служит для идентификации каждого атмосферика;
7. - в режиме визуального контроля, после принятия решения оператором по виду временных реализаций, которые непрерывно выводятся на экран осциллографа, информация или передается в ЭВМ, или стирается из буферной памяти, после чего устройство переходит в режим ожидания прихода следующего импульса;
8. - в автоматическом режиме обеспечивает передачу в ЭВМ каждого импульса, по которому произошло срабатывание компаратора.

1.7 Основные результаты и выводы главы

1. Выбраны типы и параметры антенн ~емкостной электрический зонд и магнитная воздушная рамка), схемы антенных усилителей и приемных устройств, обеспечивающих :
2. полосу 0.3 - 13 кГц,
3. усиление до 50 дБ,
4. неравномерность АЧХ не более 2 дБ,
5. различие между фазовыми характеристиками каналов не более 3 градусов.
6. Оригинальная методика оценки эффективной площади магнитных антенн с ферромагнитным сердечником, учитывающая реальные конструкции антенн и позволила выработать рекомендации по выбору типа сердечника антенны (ферромагнитный или воздушный).
7. Была предложена и реализована простая схема антенного усилителя, обеспечивающего действительный коэффициент передачи приемного устройства по магнитному полю, что позволило исключить фазовые и частотные искажения, присущие индукционным магнитным антеннам, в широкой полосе частот.
8. Разработанные комплексы аппаратуры были изготовлены, настроены и откалиброваны в полевых условиях. Они показали высокую работоспособность и использовались в сухопутных и длительных непрерывных морских измерениях, предварительном анализе и записи для последующей обработки трех (вертикального электрического и двух взаимно перпендикулярных магнитных ) компонент естественных атмосферных электромагнитных импульсных полей СНЧ-СДВ диапазона.

ГЛАВА 2. Обнаружение и экспериментальное исследование поперечных резонансов волновода земля-ионосфера

Существование поперечных резонансов ~ПР` полости Земля- ионосфера обсуждалось ранее в ряде теоретических [67, 7, 26] и экспериментальных [71, 3] работ. В работе [67] приведено решение задачи о возбуждении волновода Земля-ионосфера падающей из космоса плоской электромагнитной волной. Полученные спектры имели резонансные максимумы, частоты которых определялись высотой промежутка, параметрами верхней стенки и углом падения волны.

В экспериментальной работе [71] приземной волновод возбуждался токами, порожденными в нижней ионосфере мощным модулированным коротковолновым излучением наземного передатчика за счет нелинейных процессов в плазме. Частота модуляции сканировалась в пределах от 1 до 7 кГц, при этом спектры принимаемого на Земле поля имели характерные максимумы на частотах 2, 4, 6 кГц, которые интерпретировались авторами как поперечные резонансы.

Одним из методов исследования распространения радиоволн СДВ диапазона в полости Земля-ионосфера является использование естественных широкополосных источников излучения, (грозовых разрядов), порождающих атмосферики. В настоящей работе атмосферики, распространяющиеся под ионосферой, применяются для экспериментального изучения ПР, а также поляризации электромагнитного поля, формируемого в волноводе излучением молний. Расчеты спектров ПР, возбуждаемых вертикальными и горизонтальными источниками, находящимися внутри волновода, проводились в работах [26, 32]. Как показали эти расчеты, спектры вынужденных колебаний, создаваемых точечным импульсным источником в плоском промежутке Земля-ионосфера, имеют сложный вид, в частности, тонкая структура спектральных максимумов зависит от расстояния молния - наблюдатель. Одним из возможных способов выделения ПР может служить накопление энергетических спектров процесса, которое является регуляризирующей процедурой, приводящей их к некоторым средним значениям. Данная методика используется в настоящей работе.

Как проявление ПР в спектре отдельного атмосферика, в [24] обсуждался "твик" - квазисинусоидальный сигнал, которому предшествует отражательный атмосферик, длительностью от нескольких десятков до ста миллисекунд и выше. Твики наблюдаются только ночью, или при солнечных затмениях [70]. Обычно измерения твиков проводились с помощью аналоговых сонографов с целью изучения их дисперсии [80], определения затухания волн в волноводе [61]. В работе [24] были оценены параметры нижней ионосферы в предположении о резонансной природе твиков. Поляризационные особенности электромагнитного поля твиков исследовались в работе [12], в которой по результатам измерений вертикальной электрической и двух взаимно ортогональных горизонтальных магнитных компонент в северном полушарии был сделан вывод о левой эллиптической поляризации хвостовой части твиков. Этот результат свидетельствует о существенной гиротропии ионосферной стенки волновода. Попытки объяснить особенности твиков были сделаны в ряде теоретических работ. Расчеты проводились как без учета магнитного поля Земли, так и в упрощенной модели с вертикальным магнитным полем Земли [79,12]. В работе [16] приводятся результаты численного расчета коэффициентов распространения и затухания волноводных мод ночных атмосфериков, возбуждаемых вертикальным молниевым разрядом. Учитывалось наклонное постоянное магнитное поле Земли (случай приэкваториального распространения) и было показано, что затухание ТЕ-волн больше чем ТМ-волн при распространении с запада на восток и меньше - в противоположном направлении.

В настоящей главе будут представлены результаты экспериментальных исследований ПР, наблюдавшихся в средних и единичных спектрах атмосфериков. Рассмотрены также поляризационные свойства атмосфериков. Полученные экспериментальные данные позволяют указать оптимальные способы обработки атмосфериков и сформулировать подходы к решению обратной задачи электродинамики.

2.1 Резонансные свойства полости Земля - ионосфера

Впервые сферическая полость, образованная поверхностью Земли и нижней кромкой ионосферы, была рассмотрена в качестве резонансной системы в работе [72]. Были получены резонансные частоты, связанные с интерференцией волн, обежавших вокруг Земли, и лежащие в диапазоне единиц - десятков герц. Соответствующие "продольные" резонансы, названные впоследствии глобальными или шумановскими, были обнаружены в спектрах естественных СНЧ полей, возбуждаемых в полости Земля-ионосфера разрядами молний [40].

В работе [7] была высказана идея о наблюдении поперечных резонансов (ПР), которые в отличие от шумановских обусловлены последовательными отражениями волн от верхней и нижней границ полости и поэтому определяются ее высотой h . Значения собственных частот ПР лежат в области единиц килогерц.

В предположении об идеально проводящей Земле радиуса a и изотропной ионосфере радиуса d , характеризующейся поверхностным импедансом d , в [20] получено следующее дисперсионное соотношение, определяющее собственную частоту резонансных колебаний TM-типа для n-й зональной гармоники: экспоненциальными асимптотиками. В этом случае (2.1.1) примет вид, совпадающий с дисперсионным уравнением для плоской системы [33]:

Различие между плоской и сферической системами состоит в том, что в сферической системе существует дискретный набор углов q , определяемый номером зональной гармоники, в то время, как в плоской системе угол падения волн Бриллюэна на границы может принимать произвольные значения. Собственные частоты поперечного резонанса определяются: высотой ионосферы h, количеством вариаций поля p вдоль высоты, углом падения волн q на границу, поверхностным импедансом ионосферы d (Землю можно считать идеально проводящей).

Решение уравнения (2.1.2) дает частоты ПР в сферической полости Земля - ионосфера, совпадающие с собственными частотами плоской системы при соответствующих углах падения q [34] :

В случае небольших углов падения данные решения описывают и сферическую систему. Малость углов q означает небольшие номера зональных гармоник ( n+[-]<< ka \_ 200). Для этого случая и при условии малости d ( d<<cosq )

Возбуждение полости Земля - ионосфера точечным источником было рассмотрено в [34]. В этой работе приведены разложения полей от элементарных электрического и магнитного диполей горизонтальной и вертикальной ориентации, полученные методом нормальных волн в моделях плоской и сферической полости при учете анизотропии ионосферы.

Временная форма сигнала наглядно интерпретируются лучевой или отражательной моделью отклика промежутка Земля - ионосфера на возбуждение точечным импульсным источником (см. напр. [80]). В плоском волноводе с идеально проводящими стенками последовательные отражения излученного импульса от границ можно представить набором синфазно излучающих виртуальных (отраженных) источников как показано на Рис. 2.1. Расстояние между m - тым источником и наблюдателем L определяет дискретный набор углов прихода q и взаимных задержек импульсов, формирующих временную форму сигнала в точке наблюдения.

Оценим зависимость мгновенной частоты принимаемого сигнала от времени. Эта зависимость напоминает гиперболу при малых t и асимптотически приближается к частоте отсечки волновода при стремлении t к бесконечности. Выражение (2.1.14) широко используется для интерпретации дисперсионных свойств "твиков" ~см. напр. [80]` и достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Из рассмотренной модели видно, что при достаточно больших задержках относительно начала атмосферика мгновенная частота сигнала стремится к частоте отсечки волновода или к собственной частоте поперечного резонанса. Следовательно, отбрасывая начальную часть сигнала, формируемого в полости Земля ионосфера прямой волной, идущей от молнии параллельно границам, мы можем считать, что "хвостовая" часть сигнала характеризует поперечный резонанс, соответствующий многократному отражению волн от земли и ионосферы ~q стремится к 0 в формуле 2.1.6`. В этом случае, измеряя спектр хвостовой части импульса, можно оценить добротность поперечного резонанса (по отношению резонансной частоты к ширине резонансного пика) и эффективные параметры нижней ионосферы. При этом нужно принять во внимание особенности возбуждения резонансной системы, обсуждаемые ниже.

Поскольку в рассматриваемой нами модели используются точечные источники, при определении добротности необходимо учитывать геометрическую расходимость формируемых волн, а также диаграммы направленности излучения виртуальных источников. Отсекая начальную часть сигнала, мы рассматриваем волны, пришедшие от виртуальных источников высокого порядка. Из этого предположения следует:

1. Если волны от всех источников приходят под углами близкими к вертикали, то углы в диаграмме направленности элементарного электрического диполя почти не изменяются, а амплитуда приходящих волн остается практически постоянной (исключение составляет вертикальный электрический диполь, но такой источник не возбуждает ПР, см. [34]);
2. затухание, вызванное расходимостью, является малым, кроме того его можно учесть при оценке добротности.

Пусть амплитуда резонансного колебания имеет следующую зависимость от времени и расстояния до источника:

Отмеченные особенности не учитывались в работе [24], где анализ проводился по полной реализации твика, поэтому описанная выше методика оценки добротности, представляется более обоснованной.

2.2 Результаты наблюдений поперечных резонансов в средних спектрах атмосфериков

За период с 1985 по 1989 гг. было проведено несколько серий измерений, целью которых было получение спектральных характеристик атмосфериков в разное время суток. В эксперименте применялся комплекс для измерения спектральных характеристик СДВ-атмосфериков, описание которого приведено в главе

1. Временные реализации естественного радиосигнала СДВ диапазона записывались на ленту магнитографа НО-62. Исходные магнитные записи обрабатывались с помощью спектроанализатора СК4-72/2, работавшего в полосе частот 0-20 кГц с разрешением 100 Гц и затем накапливались с помощью блока интегратора ЯЧС - 76. В обработку включались атмосферики, амплитуда которых превышала пороговый уровень, выбранный несколько выше величины помехи, формируемой излучением гармоник силовой сети. Поскольку наш интегратор не позволяет оценивать дисперсию усредняемого процесса, эту оценку можно получить, предположив, что измеряется эргодический стационарный процесс, для которого случайная ошибка равна [5]:

e = 1 / r N ,

где N - количество усредняемых реализаций. Эта оценка погрешности использовалась при получении средних спектров и составляла = 10 % при N = 100. Паспортная погрешность измерения амплитуды спектроанализатором составляет при этом 10 %.

В результате обработки были получены средние спектры двух типов: гладкие, имеющие широкий максимум в диапазоне 4-8 кГц, и содержащие характерные максимумы вблизи частот 2, 4 кГц. На Рис.2.1 представлены спектры вертикального электрического поля атмосфериков, полученные в результате усреднений по ансамблям, состоявшим из 80 и 84 спектров отдельных импульсов. Здесь по вертикальной оси в логарифмическом масштабе отложена средняя амплитуда спектральных составляющих поля и ее разброс, пропорциональный r N . По горизонтали отложена частота в кГц. Для набора одного ансамбля требовалось от 10 до 45 минут в зависимости от сезона и времени суток. Резонансная структура средних спектров сохранялась в нескольких подряд идущих сериях измерений. Время жизни резонансной структуры составляет от нескольких десятков минут до единиц часов, что согласуется с временем существования локальных грозовых очагов [36].

Таким образом, результаты наблюдений позволили заключить, что эффект поперечного резонанса проявляется в средних спектрах, если во время записей существовал достаточно мощный компактный грозовой очаг. В этом случае процедура усреднения сглаживает тонкую структуру пиков спектров отдельных атмосфериков, выделяя резонансные максимумы. Если же во время наблюдений грозовая активность была обусловлена несколькими источниками, распределенными в широких пределах по дистанции, процесс усреднения приводит к "замыванию" как тонкой структуры спектров, так и самих резонансных максимумов. Следовательно, ПР должны проявляться более ярко при спектральной обработке индивидуальных атмосфериков.

2.3 Результаты наблюдений ПР в спектрах отдельных атмосфериков

Записи вертикальной электрической и двух взаимно ортогональных компонент горизонтального магнитного поля атмосфериков в полосе частот от 0.3 до 13 кГц были сделаны в течение 42-го рейса НИС "Академик Вернадский" в 1991 г. Временные реализации компонент длительностью 40 мсек. регистрировались и накапливались в цифровом виде на дискетах с помощью аналого-цифрового комплекса (Гл. 1.) Электрическая и магнитные антенны были сориентированы и сфазированы таким образом, что ось z была направлена вертикально вверх, ось y совпадала с курсом судна, а ось x была направлена в сторону правого борта, образуя правую декартову систему координат.

Всего было зарегистрировано около 300 импульсов в акваториях Индийского и Атлантического океанов в южном полушарии. Для записи отбирались импульсы характерной "отражательной" формы (в классификации, предложенной в [47]), которые наблюдались в ночное время суток. Моменты локальных закатов и восходов Солнца в течение рейса представлены в Табл.3.2.1. Дальнейшая обработка полученных записей проводилась с помощью ЭВМ типа IBM PC AT.

Чтобы выделить поперечную и продольную компоненты горизонтального магнитного поля, с помощью методики, описанной в Главе 3, определялся пеленг на источник атмосферика, а затем составляющие магнитного поля преобразовывались к системе координат, в которой ось 0r направлена на источник, а ось 0v перпендикулярно ей, по следующим формулам:

H (t) = -H (t)sina + H (t)cosa ;

где H (t), H (t) соответственно поперечная и продольная компоненты магнитного поля по отношению к направлению на источник, a - азимутальный угол вектора Умова-Пойнтинга в судовой системе координат. На Рис. 2.3, 2.4 приведены временные реализации и амплитудные спектры трех компонент поля типичного ночного "отражательного" атмосферика.

В спектрах ночных отражательных атмосфериков, взятых по полной реализации, формируется сложная интерференционная картина, из-за чего затруднено определение резонансных частот. Из временных форм компонент поля видно, что интервалы между последовательными отражениями монотонно увеличиваются, становясь практически эквидистантными к концу атмосферика. Этим обстоятельством мы воспользуемся для выделения поперечного резонанса, соответствующего углам падения волн близким к нормальному к границам (более подробно см. п. 2.1.)

На Рис.2.5 представлен спектр продольной магнитной компоненты хвостовой части атмосферика, записанного 21.1.91г. в Гвинейском заливе. В обработку взята реализация длительностью 30.72 мсек, начало которой отстоит от начала атмосферика на 8 мсек. Для снижения дисперсии спектральных оценок применялось временное окно Хэмминга H(k) [31], на которое предварительно умножалась анализируемая временная реализация:

H(k) = { (2.3.2)

где k - номер отсчета, а N - длительность цифровой реализации. Из полученного спектра можно определить частоты резонансов, а также их добротности Q'. Кроме того можно получить оценку частоты отсечки волновода Земля-ионосфера, взяв отсчет частоты там, где резонансный пик спадает к уровню шумов (см. Рис.2.5.) Полученная частота отсечки волновода может быть использована для оценки эффективной высоты отражения от ионосферы по следующей формуле [33] :

Чтобы контролировать ошибки при определении резонансных частот и связанных с поперечными резонансами добротностей, необходимо знать расстояние до молнии. Для определения расстояния мы будем использовать сонограммный метод (см. напр. [80]).

Для более детального изучения свойств поля атмосфериков строились цифровые динамические спектры (цифровые сонограммы) его компонент. При этом положение спектральных максимумов на оси частот определялось по центру тяжести соответствующего спектрального пика, т.е. по точке максимума и двум соседним отсчетам в спектре/

Текущий спектр при вычислении сонограмм получался по алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ) 256 - точечных последовательных реализаций длительностью 2.56 мсек и последующей временной сдвижкой между ними, на 0.4 мсек. С целью уменьшения дисперсии спектральных оценок и подавления краевых эффектов реализация перед выполнением БПФ умножалась на временное окно Хэмминга (2.3.2) . Пример сонограммы приведен на Рис 2.6. Точки на этом графике соответствуют положению максимумов амплитудных спектров в координатах время - частота. Видно, что отсчеты группируются в дисперсионные ветви, спадающие по частоте с удалением от начала импульса и асимптотически приближающиеся к значениям частот отсечки. В сонограммах некоторых атмосфериков наблюдалось до восьми резонансных ветвей Рис.2.6, которые мы в дальнейшем будем называть модами (в терминологии, принятой в теории волноводов, модами обычно называют собственные или нормальные волны). В основной массе атмосфериков можно было выделить не более двух мод, пригодных для анализа.

Оценки частот первых восьми резонансов по сонограмме Рис.2.6, найденные путем усреднения данных в интервале от 7.2 мсек до 13.6 мсек, представлены в таблице 2.3.1. Здесь в первой колонке дан номер моды, во второй - частота резонанса, в третьей - стандартное отклонение значений резонансной частоты. Видно, что оценки резонансных частот, полученные для различных мод, кратны частоте первой моды/

Дальность до источника можно оценить, используя полученные экспериментально зависимости частота-время в рамках модели плоского волновода (см параграф 2.1.) Когда задержка t измеряется между моментами прихода составляющих с частотами f и f (f > f ), из формул (2.1.11 - 2.1.14) можно получить выражение для определения дистанции:

D = ct/(cosecq2 - cosecq1). (2.3.8)

В случае, когда задержка t прихода частотной составляющей измеряется относительно начала импульса данная формула преобразуется к виду:

D = c(t + T /2)/(cosecq-1) (2.3.9)

где T - длительность реализации по которой получается спектр. Значение частоты отсечки f можно получить измеряя спектр хвостовой части атмосферика (см. выше.)

Пример определения дальности до источника и высоты ионосферы приведен на Рис.2.7, где на сонограмме в более подробном масштабе представлены две первые резонансные ветви Рис.2.6. По этим данным для каждой точки определялась дальность с помощью формулы (2.3.9), при этом осуществлялся последовательный подбор частоты отсечки таким образом, чтобы получить минимальный тренд значений дальности. Полученные оценки дистанции до молнии, эффективной высоты отражения и их стандартные отклонения приведены на Рис.2.7.

Комплексные динамические спектры позволяют проследить изменение амплитуды (огибающей) и разности фаз между продольной и поперечной компонентами магнитного поля атмосферика. Необходимо отметить, что при приближении к "хвосту" атмоферика, когда угол падения парциальных волн стремится к вертикали, рассматриваемые параметры соответствуют поляризационным параметрам [41], введенным для плоской волны. При этом мы отходим от строгих определений параметров поляризации, которые справедливы для монохроматических сигналов, обобщая их для случая, когда сигнал имеет конечную полосу частот вследствие ограниченной во времени длительности анализируемой реализации.

На Рис.2.8, 2.9 приведены графики зависимостей текущей частоты, разностей фаз и отношения амплитуд продольной и поперечной компонент горизонтального магнитного поля для первой и второй моды атмосфериков, пришедших с запада (Рис.2.8) и с востока (Рис.2.9). На графиках, представляющих поведение разности фаз компонент магнитного поля, положительные значения угла соответствуют левой (вращение горизонтального магнитного поля - по часовой стрелке, при взгляде вслед падающей на землю волне) отрицательные - правой (вращение - против часовой стрелки), 0 и 180 - линейной поляризации. На графиках, представляющих отношение амплитуд продольной и поперечной компонент магнитного поля, значения больше единицы характеризуют преобладание квази-TE волн, значения меньше единицы - преобладание квази-TM волн [44].

В результате анализа банка данных, содержащего записи волновых форм 217 ночных атмосфериков, зарегистрированных в южном полушарии, были отмечены следующие закономерности их поляризации:

1. поляризация головной части атмосферика близка к линейной;
2. поляризация "хвоста" атмосферика является эллиптической (часто близкой к круговой), причем направление вращения вектора магнитного поля для южного полушария (если в системе координат корабля смотреть навстречу оси 0z) совпадает с направлением вращения часовой стрелки;
3. переход от головной части к хвосту может происходить тремя путями :
4. от линейной к левой;
5. от линейной к правой и затем к левой;
6. от линейной к левой, правой и к левой;
7. наблюдается поляризационная невзаимность распространения восток-запад (В-З) - запад-восток (З-В), которая проявляется в преобладании продольной компоненты магнитного поля ночных атмосфериков при распространении В-З (см. Рис.2.8) и в преобладании поперечной компоненты магнитного поля при распространении З-В (см. Рис.2.9).

2.4 Основные результаты и выводы главы

Проведены экспериментальные исследования явления поперечных резонансов ~ПР` естественного волновода, образованного поверхностью Земли и нижней кромкой ионосферы, в результате которых сделаны следующие выводы.

1. Показано экспериментально, что поперечные резонансы удается наблюдать в средних спектрах атмосфериков.
2. Резонансные максимумы в спектрах отдельных атмосфериков наблюдаются наиболее уверенно, если при обработке используется хвостовая часть импульса.
3. ПР проявляются наиболее ярко в спектрах горизонтальных магнитных компонент поля.
4. Обоснована методика оценки добротности системы Земля-ионосфера на поперечных резонансах.
5. В окрестности резонансных частот э/м поле атмосфериков, зарегистрированных ночью, обладает левой эллиптическойполяризацией независимо от азимута прихода. Это свидетельствует о существенной гиротропии ионосферной стенки волновода и подтверждает вывод о левой поляризации хвостовой части твиков, сделанный в работе [12].
6. Наблюдается преобладание продольной компоненты магнитного поля при распространении ночных атмосфериков с востока на запад и преобладание поперечной компоненты при распространении с запада на восток.

Проведенные исследования могут иметь и практическое значение. Так, описанные эксперименты, позволяют получать геофизическую информацию, например, оценивать высоту нижней границы ионосферы, ее параметры по результатам измерения резонансных максимумов в спектрах СДВ атмосфериков. Кроме того, при проектировании систем СДВ связи и навигации на частотах ниже 10 кГц следует учитывать резонансную структуру радиошумов промежутка Земля-ионосфера, обусловленную явлением ПР.

ГЛАВА 3. Глобальная грозовая активность по результатам пеленгации СДВ атмосфериков

Исследования электромагнитных излучений в диапазоне СНЧ- СДВ, возбуждаемых разрядами молний, дают ценную информацию о свойствах волновода Земля - ионосфера [43, 74, 53, 64], позволяют оценивать пространственное распределение гроз [50, 59, 45, 51, 68, 49], сезонную изменчивость грозовой активности [48, 46, 14]. Основная часть информации о пространственном распределении грозовой активности была накоплена континентальными пунктами наблюдения, расположенными, как правило, в средних широтах и путем сравнения космических и наземных записей [73, 65].

Основные источники земной грозовой активности сосредоточены в тропическом поясе, в так называемых мировых грозовых центрах, расположенных в Африке, Южной Америке, юго-восточной Азии [34]. Сезонные изменения пространственного распределения молний в работе [65] измерялись по спутниковым наблюдениям, при этом моменты измерений и области на поверхности Земли ограничивались параметрами орбиты спутника. Известны также работы, в которых приведены результаты длительных измерений азимутальных распределений атмосфериков в Южной Америке [46] и вариаций направлений на максимум регулярного шума в СДВ диапазоне [9, 10] в Сибири. Тем не менее, приведенные литературные данные не позволяют оценить одновременно динамику и пространственную структуру глобального распределения молний.

В данной главе рассматриваются результаты измерений временных вариаций интенсивности потока и азимутальных распределений атмосфериков, проведенных на борту научно- исследовательского судна (НИС) "Академик Вернадский". Маршрут судна (Рис. 3.1), проходил в тропической зоне Индийского океана между Африканским и Азиатским мировыми грозовыми очагами, а также в Атлантическом океане между Африканским и Американским очагами. Это обстоятельство в обоих случаях позволило наблюдать одновременно два мировых грозовых очага из одного измерительного пункта.

Для пеленгации атмосфериков была предложена и реализована на базе универсального аналого-цифрового комплекса методика, основанная на вычислении компонент среднего вектора Умова-Пойнтинга в широкой полосе частот. Предложенная методика отличается от известных узкополосных и широкополосных способов [4, 15] тем, что позволяет использовать полную энергию импульсных сигналов, а также работать во временной области.

3.1 Методика определения пеленгов

Для пеленгации атмосфериков обычно применяются амплитудный и фазовый методы или их модификации [4, 15]. В амплитудном методе сигналы горизонтальных магнитных компонент поля, принятые ортогональными рамочными антеннами, возбуждают в частотно-избирательном элементе квазисинусоидальные затухающие колебания. Предполагается, что амплитуды сигналов в каждом канале пропорциональны косинусу и синусу угла прихода атмосферика. Эти сигналы после усиления подаются на отклоняющие системы электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), при этом на экране высвечивается эллипс, наклон большой полуоси которого указывает азимут прихода атмосферика. Для устранения неоднозначности метода применяется ненаправленная электрическая антенна, сигнал с которой после фильтрации и усиления подается на управляющий электрод ЭЛТ и гасит ненужную половину эллипса.

В фазовом методе квазисинусоидальные сигналы от рамочных антенн (см. выше) сдвигаются друг относительно друга на 90 , после чего суммируются. Пеленг на источник сигнала получается путем измерения разности фаз между суммарным сигналом и опорным сигналом, полученным из канала ненаправленной электрической антенны.

К недостаткам этих методов, при измерении пеленгов импульсных источников, можно отнести потери в точности, вызванные рядом причин.

1. Оба метода являются узкополосными, вследствие чего неоптимально используется энергия импульса, распределенная в широком спектре частот.
2. Работа приемного устройства в узкой полосе предъявляет достаточно высокие требования к качеству настройки фильтров и стабильности их амплитудных и фазовых характеристик.
3. В обоих методах предполагается, что приходящая волна является плоской и в ней присутствуют только поперечные компоненты поля.

Последнее предположение в действительности часто не выполняется, а появление продольной магнитной компоненты H приводит к так называемым "поляризационным ошибкам" (ПО) пеленгации. Существуют две основные причины возникновения ПО [77, 78, 15]:

1. отклонение излучателя (молнии) от вертикали;
2. наличие в принимаемом сигнале отраженных от анизотропной ионосферы волн.

Чтобы исключить отраженные от ионосферы волны, в [39] был предложен широкополосный амплитудный метод, учитывающий только начальную часть атмосферика, формируемую прямой волной. В настоящее время подобный модифицированный метод [54], дающий точность 2 на дистанциях до 100 км., применяется для пеленгации атмосфериков в американской национальной сети локации молний [66].

Для определения направления прихода свистов (вистлеров) в [57, 63], в узкой полосе вычислялся вектор Умова-Пойнтинга во временном представлении. Такая методика эксплуатирует квазимонохроматиченость приходящих сигналов и не может быть использована непосредственно в случае широкополосных атмосфериков.

В [58] вектор Умова-Пойнтинга строился по спектрам трех компонент поля СНЧ атмосфериков в полосе частот от 5 до 50 Гц и использовался для определения пеленгов источников. В работе [60] применялась широкополосная методика (от 2 до 6 кГц) с использованием спектрального разложения компонент поля для определения углов прихода вистлеров, в которой учитывалась эллиптичность поляризации падающей волны. Основным препятствием для применения таких методик служили большие затраты времени, требующиеся при вычислении спектров всех трех компонент поля и двух компонент вектора Умова-Пойнтинга.

В данной работе был предложен и реализован иной метод определения пеленга импульсных источников излучения, основанный на измерении средних по частотам компонент вектора Умова - Пойнтинга, которые вычисляются во временной области.

Направление распространения энергии монохроматической волны в данной точке пространства описывается средним за период колебаний вектор Умова-Пойнтинга [27]:

P = 1/2 Re(P) = 1/2Re[ E(w)\*H(w) ], (3.1.1)

где E(w) , H(w) -комплексные спектры компонент поля. \* - обозначает комплексное сопряжение. На поверхности идеально проводящей Земли отличны от нуля только три ортогональные компоненты электромагнитного поля - H (w), H (w), E (w). Тогда из (3.1.1) получим выражения для горизонтальных компонент среднего вектора У-П:

P = -1/2 Re (E H ) = -1/2pE ppH pcos(j -j )

P = 1/2 Re (E H ) = 1/2pE ppH pcos( j -j )?

где j ,j ,j - фазы соответствующих спектральных компонент поля.

Направление, противоположное ориентации вектора Умова- Пойнтинга указывает на источник.

Для широкополосного импульсного сигнала введем интегральный вектор Умова-Пойнтинга путем усреднения его компонент по частоте.

G = P (w) dw . (3.1.4)

Здесь пределы интегрирования определяются рабочим диапазоном частот приемного устройства. Величина этого вектора определяет плотность общего потока энергии, а его ориентация указывает усредненное направление распространения потока энергии волн.

Проведем некоторые преобразования выражения (3.1.4). Вследствие действительности временных компонент поля (h(t)=h (t)) справедливы следующие соотношения для прямого и обратного преобразований Фурье комплексно-сопряженных спектральных компонент:

h(t)= H(w)exp(iwt)dw |Z

Запишем выражение для усредненного по частотам вектора УмоваПойнтинга, воспользовавшись обратным преобразованием Фурье для нормальных и комплексно-сопряженных компонент поля (3.1.5):

G = 1/2Re [ E(w)\*H(w) ] dw = dw [ e(t)exp(-iwt)dt \* h(t)exp(iwt)dt ]

Поскольку интегрирование во внутренних интегралах проводится по независимым переменным, произведение интегралов равно интегралу от произведения функций:

G = dw dt dt [ e(t) \* h(t) ]exp(-iw(t-t))

Теперь поменяем порядок интегрирования:

G = dt dt [ e(t) \* h(t)] dw exp(-iw(t-t))

В правой части данного равенства мы получили d-функцию Дирака, следовательно

G = - dt dt[ e(t) \* h(t)] d(t-t)

Учитывая свойства d-функции проинтегрируем правую часть выражения по t. Получаем окончательное выражение для интегрального вектора Умова-Пойнтинга:

G = [ e(t) \* h(t) ] dt . (3.1.6)

Соотношение (3.1.6) соответствуют хорошо известному в анализе равенству Парсеваля (теореме Планшереля) для интегрального преобразования Фурье.

Используя полученное выражение (3.1.6) для случая трех компонент поля, получим значение пеленга, которое определяется прямо из временных форм компонент, при этом исключаются трудоемкие вычисления преобразований Фурье всех трех компонент радиосигнала. Окончательная формула имеет следующий вид:

e (t)h (t)dt

e = arctg[-----------------------] (3.1.7)

e (t)h (t)dt

где t - длительность импульса.

Выражение (3.1.7) легко преобразуется в алгоритм вычисления пеленга с помощью ЭВМ путем перехода от непрерывных величин к дискретным и от интегралов по времени к суммированию временных рядов, составленных из отсчетов сигналов.

Физический смысл измеряемой в предложенном методе характеристики заключается в том, что определяется взвешенное или эффективное направление вектора групповой скорости импульса (цуга волн), т.е. направление распространения энергии импульса.

Имея в своем распоряжении записи реальных атмосфериков, сопоставим различные методики обработки, упоминавшиеся выше. При этом используем также и частотные зависимости пеленгов, определяемых с помощью узкополосного метода вектора Умова- Пойнтинга, т.е. по формулам (3.1.2, 3.1.3). Перед построением обсуждаемых зависимостей определим усредненный азимут прихода e во временной области по предлагаемой широкополосной методике по формуле (3.1.7), а затем приведем компоненты магнитного поля к цилиндрической системе координат (r,v,z) с началом, совпадающим с источником атмосферика, по формулам (2.3.1.)

На Рис.3.2.а (вверху) представлена зависимость пеленга от частоты, определенная по отношению реальных частей спектральных компонент вектора Умова-Пойнтинга Аp(w); на Рис.3.2.б (в центре) - спектры реальной части продольной P (w) и поперечной P (w) составляющих вектора Умова- Пойнтинга; на Рис.3.2.в (внизу) - амплитудные спектры продольной H (w) и поперечной H (w) компонент магнитного поля. Временные формы E (t), H (t) и H (t) этого атмосферика представлены на Рис. 3.3. Импульс был зарегистрирован в Индийском океане 15 февраля 1991г. в 13час. 14мин. 50 сек. московского времени, что соответствует ночным условиям в пункте наблюдения.

Нулевое значение соответствует азимуту, определенному по предложенной широкополосной методике интегрального вектора Умова-Пойнтинга. Видно, что это значение находится в области минимальных отклонений в зависимости, соответствующей узкополосному методу. Можно выделить два поддиапазона: СНЧ - ниже 2 кГц и СДВ - выше 6 кГц, в которых вариации значений пеленгов, полученные узкополосным методом, минимальны. В области 2 - 6 кГц, где существенно влияние поперечных резонансов, отклонения оказываются существенными и достигают 60 и выше. Погрешность определения пеленга также возрастает в минимумах спектральной плотности компонент поля, что легко трактовать как повышение влияния шумов. Поскольку не было возможности локации или пеленгации источников методами, обеспечивающими более высокую точность, такими, как, например, спутниковые наблюдения, было проведено сравнение предложенного метода с широкополосной амплитудной методикой, учитывающей только начальную часть атмосферика [54] длительностью около 100 мксек. Перед определением пеленга по данной методике временные реализации фильтровались в полосе частот от 7 до 13 кГц.

В таблицах 3.1.1 и 3.1.2 приведены результаты пеленгации двух групп атмосфериков. Таблица 3.1.1 содержит данные записей, полученных в Атлантическом океане (9 ю.ш.2 з.д.) в ночь с 9 на 10 апреля 1991г., в то время, как Таблица 3.1.2 - в локальное вечернее время 26 февраля 1991г. вблизи Сингапура (1 с.ш.104 в.д.)

В первой группе представлены сигналы, пришедшие с расстояния 1500 - 3000 км., во второй - от ближней грозы, наблюдавшейся визуально. Колонка "Азимут" содержит азимут атмосферика в градусах в корабельной системе координат, определенный широкополосным методом среднего вектора Умова-Пойнтинга. Следующая колонка содержит отклонения между пеленгами А и А , определенными двумя широкополосными методиками.

Из проведенных сравнений видны достоинства использованной нами методики, состоящие в следующем.

1. Методика является широкополосной и использует все спектральные составляющие сигнала. Из этого следует, что она более универсальна, чем узкополосные методики, поскольку оказывается не критичной к различиям в спектральном составе обрабатываемых атмосфериков.
2. Использование вектора У-П автоматически устраняет двузначность определения пеленга, присущую двухкомпонентным методикам.
3. Использование интегрального вектора Умова-Пойнтинга позволяет уменьшить ошибки за счет суммирования, когда определяющий вклад в результаты измерений угла прихода вносят большие когерентные частотные составляющие поля, а области малых значений полей (а значит и вектора Умова-Пойнтинга) существенной роли не играют.
4. Переход к работе во временной области позволяет существенно повысить скорость вычисления пеленгов и справиться с поставленной задачей в реальном масштабе времени без потерь во входном потоке импульсов.

Таблица 3.1.1. Результаты пеленгации для 14 атмосфериков, зарегистрированных 10 апреля 1991г.

[-------------------------------------------------------------------]

(N g/g Время, Мск. Азимут (А , градус) А -А ,градус)

[-------------------------------------------------------------------]

1 04:21:30 127.3 -1.7

2 04:21:42 -153.7 4.5

4 04:22:27 144.9 3.5

5 04:24:39 143.1 2.1

6 04:24:50 145.4 -2.1

7 04:25:55 160.3 3.3

8 04:26:30 134.6 1.1

9 04:28:55 136.9 2.3

10 04:30:20 140.6 2.6

11 04:30:27 141.2 -11.1

12 04:31:48 135.4 2.1

13 04:32:22 -155.0 -1.7

15 04:32:59 129.1 -4.1

16 04:34:20 -159.3 1.8

Таблица 3.1.2. Результаты пеленгации для 12 атмосфериков, зарегистрированных 26 февраля 1991г.

[-------------------------------------------------------------------]

(N g/g Время, Мск. Азимут (А , градус) А -А ,градус)

[-------------------------------------------------------------------]

1 12:56:19 98.2 1.2

2 12:57:21 -82.1 -5.0

3 12:58:16 94.2 0.8

4 12:59:14 95.9 5.1

5 13:00:16 94.0 -4.6

6 13:01:01 -97.0 -0.4

7 13:01:48 85.6 -1.8

8 13:04:09 68.1 3.1

9 13:05:04 94.2 74.1

10 13:07:56 -93.6 4.5

11 13:09:01 84.6 -0.6

12 13:14:50 179.3 0.8

3.2 Оценка погрешности измерений интенсивности потока атмосфериков

На Земле в среднем за каждую секунду происходит от 30 до 100 вертикальных разрядов молний [14, 69, 34]. Зарегистрировать весь поток порождаемых при этом атмосфериков оказывается невозможным вследствие таких причин, как ограниченные чувствительность и быстродействие аппаратуры, влияние индустриальных помех и т.п. Чтобы исключить срабатывание аппаратуры от помех, создаваемых силовой электросетью, устанавливают конечный пороговый уровень регистрирующей аппаратуры. Таким образом, заведомо вносится погрешность в измерения полного потока атмосфериков. Эта погрешность при фиксированном пороге определяется распределением амплитуд токов в молниях, характеристиками трассы распространения радиоволн в полосе регистрируемых частот, пространственным распределением разрядов молний. Для того, чтобы верно отслеживать вариации интенсивности потока атмосфериков, с одной стороны, необходимо понижать порог срабатывания аппаратуры, чтобы зарегистрировать удаленные разряды. С другой стороны, для уменьшения пропусков импульсов за счет конечного быстродействия аппаратуры, необходимо повышать порог срабатывания. Таким образом, компромиссным решением данной задачи является выбор порога, при котором потери регистрации за счет ограниченного быстродействия будут приемлемыми. Чтобы оценить пространственно-временную изменчивость грозовой активности, вследствие значительного уровня помех и уменьшения пропусков при регистрации, обусловленных ограниченным быстродействием аппаратуры, приходится проводить измерения потока атмосфериков на "хвосте" их амплитудного распределения. Этот порог выбирался экспериментальным путем и составил в наших измерениях E = 15 мВ/м. При этом верхняя оценка пропусков вследствие конечного времени обработки каждого импульса, рассчитанная путем моделирования алгоритма работы регистрирующего комплекса на ЭВМ, составила 32 % при интенсивности регистрируемого потока 2 имп./сек. (см. Табл.3.2.1., c.97).

Чтобы оценить потери, рассмотрим процесс регистрации и обработки импульсов. Атмосферик, амплитуда которого превышает установленный порог, записывается в буферную память. Длительность запоминаемой реализации равна 0.04 сек. Для исключения перезапуска, на время записи и ввода в ЭВМ, которое равно 0.25 сек, вход системы блокируется. Время записи в буферное устройство и ввода в память компьютера составляет Т = 0.25 + 0.04 = 0.29 сек. Эта величина соответствует минимальному "мертвому" времени между двумя последовательно принятыми импульсами, когда в буферном устройстве и в памяти компьютера нет импульсов. После передачи информации в память в компьютере происходит обработка каждого импульса (центрирование, определение азимута прихода и пр.) Это занимает в среднем 0.25 сек. Следовательно, в самом неудачном случае, когда один импульс находится в памяти компьютера перед началом обработки, а второй - в буферном устройстве, "мертвое" время будет равно

Т = 0.25 + 0.04 + 0.25 = 0.54 сек.

Таким образом, в зависимости от предыстории, минимальные интервалы между соседними зарегистрированными импульсами могут лежать в пределах от Т = 0.29 сек до Т = 0.54 сек.

Полученные значения мертвого времени приемника, равное минимум 0.29 сек можно использовать, чтобы сделать вывод о возможности регистрации повторных возвратных разрядов в молнии. Медианные значения времен задержки между последовательными ударами в многократных возвратных разрядах, лежат в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен миллисекунд [76, 52, 44], следовательно, наша система регистрирует молнию, как единичное событие, независимо от количества пробоев в ней.

Известно, что поток естественных электромагнитных импульсов хорошо описывается пуассоновской моделью, имеющей распределение Эрланга для интервалов между моментами прихода соседних импульсов. Следовательно, приведенные выше величины мертвого времени не годятся для прямой оценки процента потерь во входном потоке. Чтобы рассчитать процент потерь, необходимо учитывать случайный характер входного потока импульсов, а также двухступенчатую схему работы регистрирующей аппаратуры (ввод-обработка). В связи со сложностью теоретического анализа такого процесса было проведено моделирование на ЭВМ, при котором логика взаимодействия буферного устройства и компьютера была реализована программным способом. Входным потоком служили предварительно сформированные массивы случайных задержек между импульсами, имеющих экспоненциальное распределение и различные средние значения.

В Табл.3.2.1. приведены результаты модельного эксперимента. Здесь в первой колонке указаны величины выходного потока (т.е. количество зарегистрированных импульсов), во второй колонке - процент потерь, соответствующий пуассоновскому входному потоку атмосфериков.

Приведенные выше результаты численного эксперимента дают оценки количества пропущенных импульсов при регистрации модельного пуассоновского потока с помощью аппаратуры с буферизацией входных импульсов, характеризующейся конечной скоростью обработки каждого импульса. Как правило величины выходных потоков, наблюдавшиеся в эксперименте, составляли от 2000 до 4000 имп/час, что отвечает потерям от 10% до 23%. Учитывая представленные в Табл. 3.2.1 значения систематических погрешностей, можно "достроить" верхнюю границу потока.

Оценим теперь влияние величины выбранного порога на вид суточного хода интенсивности реального потока атмосфериков.

Зависимости регистрируемых потоков импульсов от величины порога срабатывания приемника изучались многими авторами ( см. [44, 52, 28, 35] и литературу к ним). Данные в этих работах представляют собой усредненные интегральные распределения и относятся к различным географическим регионам, разным временам суток и сезонам. К сожалению, литературные данные, как правило, не содержат интересующего нас параметра, здесь обычно используются координаты порог - вероятность превышения сигналом этого порога. Исключение составляет только [35], где проводился подсчет числа принятых импульсов. Однако, прямые сопоставления с нашими данными затруднены из-за того, что в этой работе для измерений применялась аппаратура с различными параметрами (такими, как постоянная времени регистрации dt, полоса частот и т.п.). Например, значения dt составляли 10 мксек, 1 мсек или 10(14) мсек. Эти значения dt, естественно, не гарантируют отсутствие срабатываний от повторных ударов в молнии, средние интервалы между которыми по данным [69] лежат в пределах от 50 до 200 мсек.

Пользуясь упомянутыми литературными данными, очень сложно провести прямое сопоставления соотношений величин потоков и порогов для конкретной обстановки, ожидаемой в акватории Индийского и Атлантического океанов. Поэтому нами в ходе измерений был проведен двухпороговый эксперимент, в результате которого были построены суточные вариации потока атмосфериков при двух различных порогах: Е - стандартном и Е = Е /4 - редуцированном значениях.

Для оценки значений N(t,Е ) применялась методика, исключающая пропуски импульсов, которые возрастают при уменьшении порога. Методика измерений заключалась в следующем. Вначале, в течение десяти минут для каждого сорокаминутного отсчета в суточном ходе строилась гистограмма амплитудного распределения J(Е) атмосфериков при редуцированном пороге срабатывания E . При измерении амплитудного распределения брались максимальные по модулю значения в каждом импульсе. Следующие 30 минут поток измерялся в стандартном режиме, т.е. при Е . При этом предполагалось, что в течение сорокаминутного интервала времени статистические параметры потока атмосфериков остаются неизменными. Оценку ожидаемого уровня потока атмосфериков при редуцированной величине порога срабатывания Е можно получить по следующей формуле:

N(t,E )= N(t,E ) I /I ,

где N(t,E ), N(t,E ) - значения потока для стандартного и редуцированного порогов; I , I - количества атмосфериков, амплитуда которых превышает соответственно E и E . Значения I , I вычисляются с помощью измеренной функции амплитудного распределения J(Е) через определенные интегралы вида :

I = J(Е)dЕ; I = J(Е)dЕ.

Результаты измерений, проведенных 21 апреля 1991 г., полученные вблизи западного побережья Африки, приведены на Рис.3.4. Здесь по оси абсцисс отложено московское время t, по оси ординат - количество импульсов N(t,Е) в логарифмическом масштабе, зарегистрированных за получасовой интервал. Нижняя кривая соответствует реально измеренному потоку при стандартном значении порога Е . Верхняя кривая, обозначенная значками ++, соответствует оценкам значений потока при редуцированном пороге Е . Видно, что по форме полученные зависимости отличаются незначительно. Величина сдвига вдоль ординаты между отсчетами приблизительно постоянна и равна ``= 3, т.е., при уменьшении порога срабатывания в 4 раза оценка ожидаемого потока дает трехкратное увеличение потока. Проведенные модельные эксперименты, подкрепленные результатами измерений реальных потоков импульсов позволили оценить погрешность регистрации потока атмосфериков за счет ограниченного быстродействия регистрирующей аппаратуры. Максимальная погрешность, соответствующая выходному потоку в 6000 имп/час, который достигался в измерениях, не превышала 32 % .

3.3 Постановка эксперимента

Измерения азимутальных распределений и вариаций интенсивности потока СДВ-атмосфериков проводились на борту научно-исследовательского судна (НИС) "Академик Вернадский" в 42-ом рейсе в период с февраля по апрель 1991 г. Вертикальная электрическая антенна была вынесена на верхнюю точку грот-мачты судна. Две ортогональные магнитные экранированные воздушные рамочные антенны, укрепленные на станине высотой 2.5м. были установлены на верхней (пеленгаторной) палубе по правому борту судна и ориентированы соответственно вдоль и перпендикулярно курсу судна. По кабелям длиной около 100 м. сигналы с электрической и магнитных антенн подавались на вход приемника универсального комплекса, установленного в лаборатории.

Измерение пеленгов велось круглосуточно. Зарегистрированные данные обрабатывались с помощью компьютера и по результатам обработки строились гистограммы азимутальных распределений, накопленных в течение часового (с 12 по 17 февраля) или получасового интервала (все остальное время). Всего за сутки получалось 24 или 48 гистограмм азимутальных распределений и столько же отсчетов в зависимости количества принятых атмосфериков. Пеленг определялся с помощью вектора Умова - Пойнтинга по наиболее мощной высокочастотной начальной части зарегистрированного атмосферика длительностью 2.56 мсек в широкой полосе. Разрешение по азимуту при построении гистограмм составляло 5 . Путем подсчета общего количества зарегистрированных импульсов за те же стандартные интервалы времени измерялись вариации интенсивности потока атмосфериков. Полученные гистограммы и значения потока записывались в виде файлов данных на гибкие магнитные диски и использовались для дальнейшей обработки. Информация о курсе и координатах корабля, необходимая для вычисления азимута прихода атмосферика в географической системе координат, поступала от штурманской службы и регистрировалась в лабораторном журнале.

В Табл.3.3.1 приведены основные данные, описывающие условия проведения морских измерений на борту научно-исследовательского судна "Академик Вернадский". В первой колонке приведены даты наблюдений. Две последующие колонки содержат координаты судна на 12 часов московского времени, причем сначала идет широта (градусы и минуты), а затем - долгота точки наблюдения в тех же единицах измерения. В двух последних колонках приведены моменты локальных восходов и заходов солнца над пунктом приема. Временные данные Табл.3.3.1 приведены в московском декретном (а не летнем) времени.

Табл. 3.3.1. Координаты моменты восходов и заходов по маршруту НИС "Академик Вернадский" в 42 рейсе.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Дата (1991г.) | Широта | Долгота | Восход | Заход |
|  | град мин | град мин | час | час |
| 31-12 | 37 33 N | 25 46 E | 8.20 | 18.15 |
| 01-01 | 33 43 N | 28 28 E | 8.21 | 18.17 |
| 02-01 | 31 58 N | 29 22 E | 8.08 | 18.19 |
| 03-01 | 31 58 N | 29 36 E  | 8.07 | 18.18 |
| 06-01  | 33 31 N  | 22 41 E  | 8.60 | 18.42 |
| 07-01  | 35 6 N  | 17 40 E  | 9.00 | 18.90 |
| 08-01  | 37 22 N  | 11 2 E  | 9.54 | 19.26 |
| 09-01  | 37 21 N  | 3 58 E  | 10.00 | 19.75 |
| 10-01  | 36 23 N  | 2 59 W  | 10.43 | 20.27 |
| 11-01  | 33 35 N  | 9 17 W  | 10.73 | 20.82 |
| 12-01  | 28 26 N  | 13 27 W  | 10.82 | 21.30 |
| 13-01  | 23 31 N  | 17 46 W  | 10.95  | 21.76 |
| 14-01  | 17 24 N  | 18 45 W  | 10.83  | 22.02 |
| 15-01  | 11 17 N  | 17 35 W  | 10.59  | 22.12 |
| 16-01  | 5 48 N  | 14 46 W  | 10.29  | 22.08 |
| 17-01  | 1 12 N  | 10 33 W  | 9.86  | 21.92 |
| 18-01  | 3 21 S | 6 35 W  | 9.49  | 21.78 |
| 19-01  | 7 44 S | 2 33 W  | 9.12  | 21.63 |
| 20-01  | 12 15 S  | 1 26 E  | 8.74  | 21.48 |
| 21-01  | 16 42 S  | 5 33 E  | 8.36  | 21.33 |
| 22-01  | 21 7 S | 9 45 E  | 7.96  | 21.17 |
| 23-01  | 22 10 S | 12 30 E  | 7.76  | 21.01 |
|  24-01  | 22 56 S  | 14 14 E  | 7.63  | 20.92 |
|  26-01  | 26 42 S  | 14 43 E  | 7.51  | 20.99 |
|  27-01  | 31 47 S  | 16 48 E  | 7.23  | 21.00 |
|  28-01  | 34 48 S  | 20 58 E  | 6.86  | 20.82 |
|  29-01  | 34 0 S  | 27 32 E  | 6.47  | 20.34 |
|  30-01  | 31 31 S  | 33 12 E  | 6.19  | 19.87 |
|  31-01  | 29 10 S  | 38 47 E  | 5.90  | 19.42 |
|  01-02  | 27 12 S  | 42 54 E  | 5.69  | 19.09 |
|  02-02  | 25 1 S  | 47 1 E  | 5.49  | 18.75 |
|  06-02  | 24 15 S  | 51 22 E  | 5.26  | 18.41 |
|  07-02  | 23 16 S  | 56 34 E  | 4.95  | 18.03 |
|  08-02  | 22 0 S  | 62 33 E  | 4.59  | 17.59 |
|  09-02  | 21 25 S  | 65 12 E  | 4.44  | 17.40 |
|  10-02  | 19 39 S  | 71 58 E  | 4.06  | 16.92 |
|  11-02  | 19 6 S  | 73 57 E  | 3.92  | 16.75 |
|  12-02  | 17 33 S  | 78 27 E  | 3.66  | 16.41 |
| 13-02  | 15 16 S  | 84 27 E  | 3.31  | 15.96 |
|  14-02  | 13 29 S  | 88 53 E  | 3.05  | 15.62 |
|  15-02  | 11 9 S  | 94 0 E  | 2.75  | 15.24 |
|  16-02  | 8 57 S  | 99 0 E  | 2.46  | 14.86 |
|  17-02  | 7 29 S  | 101 59 E  | 2.29  | 14.64 |
|  18-02  | 6 30 S  | 106 0 E  | 2.04  | 14.35 |
|  23-02  | 1 32 S  | 106 38 E  | 2.06  | 14.22 |
|  24-02  | 0 6 S  | 105 38 E  | 2.15  | 14.26 |
|  25-02  | 1 14 N  | 103 55 E  | 2.27  | 14.36 |
|  06-03  | 2 50 N  | 101 0 E  | 2.43  | 14.51 |
|  07-03  | 5 40 N  | 93 18 E  | 2.96  | 15.00 |
|  08-03  | 4 25 N  | 89 45 E  | 3.18  | 15.24 |
|  09-03  | 3 8 N  | 86 18 E  | 3.40  | 15.48 |
|  10-03  | 1 30 N  | 81 54 E  | 3.68  | 15.77 |
|  11-03  | 0 32 N  | 76 12 E  | 4.04  | 16.16 |
|  12-03  | 1 20 S  | 74 13 E  | 4.16  | 16.29 |
|  13-03  | 2 0 S  | 72 0 E  | 4.31  | 16.43 |
|  14-03  | 2 14 S  | 67 23 E  | 4.61  | 16.74 |
|  15-03  | 2 14 S  | 65 48 E  | 4.71  | 16.83 |
|  16-03  | 2 30 S  | 62 0 E  | 4.96  | 17.08 |
|  17-03  | 3 6 S  | 59 9 E  | 5.14  | 17.27 |
|  18-03  | 4 38 S  | 55 26 E  | 5.38  | 17.51 |
|  21-03  | 7 46 S  | 59 15 E  | 5.12  | 17.23 |
|  22-03  | 8 20 S  | 60 8 E  | 5.06  | 17.15 |
|  24-03  | 9 49 S  | 54 31 E  | 5.43  | 17.51 |
|  25-03  | 11 3 S  | 48 31 E  | 5.83  | 17.90 |
|  26-03  | 12 15 S  | 46 10 E  | 5.78  | 17.82 |
|  29-03  | 14 5 S  | 46 10 E  | 6.00  | 18.00 |
|  30-03  | 17 0 S  | 41 0 E  | 6.36  | 18.31 |
|  31-03  | 21 30 S  | 39 0 E  | 6.52  | 18.42 |
|  01-04  | 26 0 S  | 36 0 E  | 6.74  | 18.58 |
|  02-04  | 31 51 S  | 29 54 E  | 7.20  | 18.93 |
|  03-04  | 34 0 S  | 26 30 E  | 7.45  | 19.12 |
|  04-04  | 33 50 S  | 17 0 E  | 8.10  | 19.73 |
| 05-04  | 29 0 S  | 12 0 E  | 8.40  | 20.08 |
|  06-04  | 24 33 S  | 8 3 E  | 8.63  | 20.37 |
|  07-04  | 20 30 S  | 4 2 E  | 8.87  | 20.65 |
|  08-04  | 14 54 S  | 1 54 E  | 8.98  | 20.82 |
|  09-04  | 11 28 S  | 0 2 E  | 9.06  | 20.97 |
|  10-04  | 8 0 S  | 3 36 W  | 9.27  | 21.24 |
|  11-04  | 5 43 S  | 6 18 W  | 9.43  | 21.43 |
|  12-04  | 4 22 S  | 8 14 W  | 9.54  | 21.57 |
|  13-04  | 2 0 S  | 10 30 W  | 9.66  | 21.74 |
|  14-04  | 1 10 N  | 12 0 W  | 9.72  | 21.86 |
|  15-04  | 5 0 N  | 13 0 W  | 9.74  | 21.97 |
|  16-04  | 9 25 N  | 13 44 W  | 9.73  | 22.07 |
|  19-04  | 11 33 N  | 17 24 W  | 9.92  | 22.35 |
|  20-04  | 17 22 N  | 18 2 W  | 9.86  | 22.48 |
|  21-04  | 22 0 N  | 17 30 W  | 9.74  | 22.52 |
|  22-04  | 24 0 N  | 16 30 W  | 9.62  | 22.49 |
|  24-04  | 28 0 N  | 15 0 W  | 9.40  | 22.50 |
|  27-04  | 30 30 N  | 12 30 W  | 9.15  | 22.14 |
|  28-04  | 34 30 N  | 9 0 W  | 8.80  | 22.28 |
|  29-04  | 35 30 N  | 3 0 W  | 8.35  | 21.92 |
|  30-04  | 37 0 N  | 6 0 E  | 7.69  | 21.38 |
|  01-05  | 35 0 N  | 13 0 E  | 7.25  | 20.88 |

3.4 Результаты измерений вариаций плотности потока СДВ-атмосфериков

На Рис.3.5.а, приведен пример суточного хода интенсивности потока атмосфериков, зарегистрированных в течение 30 и 31 марта 91 г. Здесь вдоль оси х отложено московское время, а по оси y - количество импульсов. Нижняя кривая на графике соответствует реально измеренному потоку, в то время, как верхняя построена с учетом максимальных потерь при регистрации за счет ограниченного быстродействия регистрирующей аппаратуры (см. Табл.3.2.1). Таким образом, истинное значение плотности потока лежит между этими двумя кривыми.

В это время корабль находился в непосредственной близости от юго-восточного побережья Африки и Мадагаскара (см. карту с маршрутом судна, Рис.3.1). В этом фрагменте наблюдаются хорошо выраженные повторяющиеся от суток к суткам максимумы в плотности потока атмосфериков, приходящиеся на 18 часов Мск. Это время согласуется с максимумом активности Африканского мирового грозового центра согласно данным на Рис.3.6, где приведены усредненные по многолетним метеонаблюдениям суточные кривые интенсивности мировых грозовых центров [34]. Временная зависимость потока СДВ импульсов отличается наличием плато, следующего после главного максимума. Положение этого плато совпадает с американским максимумом, тем не менее, как будет показано ниже измерениями азимутов прихода атмосфериков, оно относится к ночной грозовой активности Африки. Минимум активности приходится на период с 6 до 13 часов Мск.

Вариации интенсивности потока атмосфериков, измеренные в другой точке ( вблизи Конакри, Гвинея ) за период 17-19 апреля, приведены на Рис. 3.5.б. По сравнению с графиками на Рис. 3.5.а эти зависимости имеют более сложную структуру, обусловленную влиянием не одного, а двух мировых грозовых центров - Африканского и Американского.

Обзорные графики вариаций интенсивности общего потока атмосфериков за весь период наблюдений приведены на Рис. 3.7 а-ж в верхней части. Цифры между графиками указывают дату измерений. В данных, измеренных за период 12-17 февраля (Рис.3.7.а) наблюдается ограничение уровня потока, вызванное низкой скоростью алгоритма обработки данных. Начиная с марта эта скорость была увеличена почти на порядок, что позволило в дальнейшем достоверно оценивать динамику вариаций потока. Именно для этого случая в п. 3.2 были приведены оценки потерь. На этих же рисунках приведены зависимости парциальных потоков из секторов, охватывающих мировые грозовые центры, а на нижних графиках - суточные зависимости азимутальных центров тяжести потоков из этих секторов. Чтобы не загромождать графики, на них приведены нижние оценки интенсивности потока, т.е. значения, полученные в измерениях.

Из проведенных измерений можно сделать следующий вывод: потоки варьируют в течение суток; эти вариации легко интерпретируются изменением активности континентальных грозовых центров; иных грозовых центров, кроме континентальных не наблюдается.

Известно, что в области сверхнизких частот (СНЧ) ( Шумановские резонансы и выше) уровень шума вследствие малого затухания определяется глобальной грозовой активностью Земли. В связи с этим, представляет интерес сравнить вариации интенсивности потока СДВ атмосфериков с вариациями уровня шума на СНЧ. Такие измерения были проведены 1 и 4 апреля 1991г. на участке маршрута " Академика Вернадского ", охватывающем южную оконечность Африки. Данные по уровням СНЧ шумов были предоставлены П.Г.Фурманом и В.К.Муштаком из исследовательской группы Санкт-Петербургского университета, работавшими по собственной программе одновременно с автором на борту НИС "Академик Вернадский" и любезно согласившимися провести совместные измерения в течение указанных суток.

На Рис.3.8 жирной кривой в относительных единицах представлены графики суточных вариаций амплитуды электрического поля в атмосфере <|E(t)|> вблизи 100 Гц, а тонкой линией интенсивность потока СДВ- атмосфериков N(t) за 1 и 4 апреля 1991г. Отсчеты <|Е(t)|> и N(t) представляют собой усредненные за 24 минуты значения. Время t - московское, которое 1.4.91 совпадает с местным, а 4.4.91 - на 1 час отстает от местного времени.

Из сравнения кривых видно, что в вечерние и утренние часы (период активности Африканских мировых грозовых центров) наблюдается хорошее совпадение хода средней спектральной плотности шума на СНЧ и плотности потока атмосфериков. Для оценки связи были рассчитаны коэффициенты линейной регрессии.

Сравнение коэффициента пропорциональности A между уровнем СНЧ шума и интенсивностью потока СДВ-атмосфериков за разные периоды измерений указывает на стабильность линейной связи от суток к суткам. В то же время, из графиков видно, что эта пропорциональность нарушается в периоды минимальной интенсивности потока атмосфериков. Это нарушение пропорциональности объясняется тем, что за счет малого затухания при распространении в полости Земля - ионосфера уровень регистрируемого шума на СНЧ определяют области грозовой активности, охватывающие всю Землю, в то время , как на СДВ дальность приема ограничена большим затуханием, а также фиксированным уровнем срабатывания входного порогового устройства и ограниченной скоростью регистрации. Таким образом, проведенные сопоставления показывают, что в течение суток существуют периоды в течение которых наблюдается значительная корреляция между интенсивностью потока СДВ атмосфериков и уровнем естественных электромагнитных полей СНЧ диапазона. Это обстоятельство позволяет прогнозировать величину СНЧ шума по измерениям потока СДВ атмосфериков.

По результатам измерений вариаций интенсивности общего потока атмосфериков можно сделать следующие выводы:

1. Интенсивность потока СДВ атмосфериков может варьировать в течение суток от 2 до 10 раз.
2. Максимальные значения интенсивности потока за весь период измерений, с учетом систематической погрешности, находились в пределах от 1100 (открытый океан)до 3800 (Гвинейский залив, Конакри) импульсов за получасовой интервал.
3. Положение пиков интенсивности общего потока в суточных вариациях хорошо привязывается к периодам максимальной активности континентальных мировых грозовых центров.
4. Суточный ход интенсивности потока, формируемого Африканским центром, отличается наличием плато, характеризующего ночную континентальную грозовую активность.

3.5 Вариации пеленгов источников СДВ атмосфериков

Данные о направлениях прихода атмосфериков накапливались в виде гистограмм. Пара гистограмм W(A), которые проясняют вклад в общий поток атмосфериков (Рис. 3.5.б, стр. 108), приходящих с различных направлений, приведена на Рис. 3.9. Моменты времени измерений помечены стрелками (1 и 2) на Рис. 3.5.б. Вдоль оси х на гистограммах отложен географический азимут прихода атмосфериков ( с учетом ориентации судна) и отмечены направления сторон света. По оси y отложено количество импульсов, принятых в каждом из 72 стандартных секторов шириной 5 градусов. Из сопоставления рисунков видно, что утренний пик в зависимости N(t) на Рис.3.5.а (помеченный цифрой 2) порожден американскими грозами, в то время, как вечерний максимум (помеченный цифрой 1) обусловлен источниками африканского континента.

Результаты измерений пеленгов в Индийском океане показали, что постоянно существуют два преобладающих направления прихода атмосфериков, которые согласуются с местоположением континентальных мировых грозовых центров. Этот факт демонстрируется на Рис.3.10, где приведены усредненные за сутки азимутальные распределения в полярной системе координат, построенные по результатам измерений 14-17 февраля и 12-15 марта. Видно, что хотя основная часть потока сосредоточена в достаточно узких секторах, структура азимутальных распределений имеет многомодовый характер. Тем не менее, чтобы оценить пеленги и характерные размеры мировых грозовых центров, определим средние значения и их дисперсии по азимутальным распределениям за указанные интервалы времени. Средние значения пеленгов <A > и дисперсии s для k-го сектора вычислялись из полученных экспериментально гистограмм W(A) по следующим формулам:

Суммирование по i производилось в пределах соответствующего сектора. Полученные результаты усреднения гистограмм азимутальных распределений представлены на Рис.3.11. Стрелками здесь отмечены средние направления на мировые грозовые центры и их угловые размеры, характеризуемые среднеквадратичными отклонениями.

Чтобы проследить динамику угловых распределений направлений прихода атмосфериков в течение суток и более, были построены трехмерные профили азимутальных распределений, показанные на Рис.3.12 и 3.13.

Специфической особенностью этих азимутальных распределений является очень высокая стабильность расположения максимумов W(A) относительно оси направлений. В течение суток могут наблюдаться изменения уровня максимумов и даже их исчезновение, однако, временные изменения в их угловом положении очень малы. Здесь азимутальные распределения за 15 февраля 1991 г. построены в координатах азимут, время и W(A). Направления на север, восток, юг, запад помечены вдоль абсциссы, метки вдоль ординаты соответствуют 6-часовым интервалам времени. Как можно видеть, максимумы в распределениях W(A) занимают одни и те же угловые положения в течение всего дня, в то время как их амплитуда существенно изменяется.

Азимутальная стабильность еще более заметна на длительных интервалах времени,(см. данные с 14 по 17 февраля, приведенные на Рис.3.13). Данные на этом рисунке представлены в том же виде, что и на Рис.3.12., только каждая кривая соответствует азимутальному распределению источников, усредненному за четырехчасовой период. Результаты четырех последовательных суток показаны вместе с датами.

Из приведенных графиков видно, что основная часть потока атмосфериков сосредоточена в секторах, охватывающих континентальные и островные области, а в течение суток происходит перераспределение активности между ними. Чтобы оценить динамику активности мировых грозовых центров, была проведена обработка данных, с помощью которой общий поток был разделен по этим секторам и парциальные значения потока представлены на обзорных графиках 3.7 а-ж наряду с общим потоком (Общий) кривыми, помеченными соответственно Африка, Америка, Азия, Мадагаскар. В нижней части этих рисунков изображены графики вариаций азимутов, указывающих направление на центры тяжести азимутальных распределений, ограниченных соответствующими секторами и их среднеквадратичных отклонений.

3.6 Интерпретация полученных результатов

Результаты морских измерений убедительно показывают, что глобальная грозовая активность порождена источниками, которые располагаются на суше, при этом доминирующая роль в формировании электромагнитного фона в изучаемом диапазоне частот переходит от одного континентального грозового центра к другому, "перепрыгивая" через океаны. Физически эти результаты не соответствуют модели единого движущегося планетарного грозового центра, представление о котором явилось результатом анализа данных по шумановским резонансам [8].

Дополнительная информация об источниках была получена за счет движения приемного пункта. Навигационные данные позволяют вычислить суточные изменения положения судна, которые в совокупности с измерениями азимутов прихода атмосфериков могли бы дать оценку размера площади, где сконцентрированы континентальные грозы.

Результаты такого анализа, которые были выполнены по данным, полученным в окрестности Мыса Доброй Надежды, представлены на Рис.3.14. В течение этого времени от суток к суткам происходило существенное изменение наблюдаемых азимутов прихода атмосфериков, вызванное движением пункта наблюдения. В целом, измеренные профили углов прихода интерпретировать весьма затруднительно. Оказалось, что гораздо проще сравнить вычисленные пеленги Мадагаскарских, Африканских и Американских источников с экспериментальными результатами. Кривые на Рис.3.14. были вычислены с помощью формул сферической тригонометрии [6] для координат компактных грозовых центров, которые взяты из Справочника по геофизике [34] и приведены в Табл.3.6.1. Точки и стрелки представляют собой результаты измерений и демонстрируют хорошее согласие с рассчитанными кривыми.

Табл.3.6.1. Координаты основных грозовых центров из Справочника по геофизике [34].

---------------------------------------

Название Март Апрель

---------------------------------------

Мадагаскар 18 S 48 E 15 S 48 E

Африка 11 S 35 E 8 N 7 W

5 N 6 W 7 N 8 E

1 S 32 E

1 S 55 W

Америка не учитыв. 17 S 57 W

8 S 62 W

---------------------------------------]

Данные, полученные на достаточном удалении от африканского континента оказалось интерпретировать гораздо легче. На участках маршрута судна 14-17 февраля и 12-15 марта, были получены оценки среднего направления на африканский центр грозовой активности (Рис.3.11.) Для февральского периода среднее значение равно А =260 , для марта оно составило А = 265 . Поскольку проекция данных участков на меридиональное сечение континента составила приблизительно 15 , оценка смещения областей грозовой активности с юга на север в Африке за указанный месячный период, охвативший смену сезона, дает величину около 1500 км, что находится в хорошем соответствии с климатологическими данными [34].

3.7 Основные результаты и выводы главы

Результаты измерений и анализа данных, проведенные в настоящей главе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана и апробирована методика определения пеленгов импульсных сигналов, основанная на вычислении средних компонент вектора Умова-Пойнтинга во временном представлении, позволившая провести измерения азимутальных распределений и вариаций интенсивности потока СДВ-атмосфериков с помощью аналого-цифрового комплекса в реальном масштабе времени при интенсивности потока до 6000 событий в час.
2. Длительные непрерывные морские измерения показали, что основной вклад в мировую грозовую активность дают континентальные и островные мировые грозовые центры.
3. Вариации интенсивности потока СДВ-атмосфериков N(t) хорошо коррелируют по времени с максимальной активностью известных мировых грозовых очагов.
4. Азимутальные распределения СДВ-атмосфериков W(A) согласуются с вариациями потока N(t) и интерпретируются той же моделью континентальных источников.
5. По сезонным измерениям пеленгов W(A) отмечен сезонный дрейф африканских грозовых источников с юга на север, что согласуется с геофизическими данными, измерена его величина: 1500 км. за период с февраля по март.
6. Все данные о континентальных грозах хорошо интерпретируются и в том случае, когда смещение приемника относительно источника является существенным.
7. Результаты морских измерений показывают, что глобальная грозовая активность может рассматриваться, как порожденная источниками, расположенными на суше в континентальных грозовых центрах. Доминирующая роль в глобальной грозовой активности переходит от одного грозового центра к другому, "перепрыгивая" через океаны, вслед за движением границы день - ночь (терминатора).
8. Сопоставление суточных вариаций интенсивности потока атмосфериков и уровня шума в СНЧ диапазоне, (по результатам измерений вблизи южной оконечности Африки) указывает на линейную связь между ними. Данное обстоятельство может быть использовано для оценки уровня поля на СНЧ с помощью простой методики счета СДВ-атмосфериков.