

Н. В. БАРУ, И. И. КОНОНОВ, М. Е. СОЛОМОНИК

РАДИОПЕЛЕНГАТОРЫ- ДАЛЬНОМЕРЫ БЛИЖНИХ ГРОЗ

Б-266

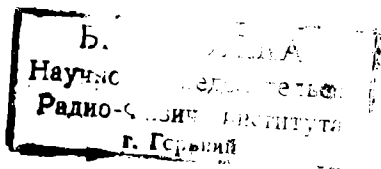
Предлагаемая книга посвящена проблеме создания пеленгационно-дальномерных устройств для оперативного определения местоположения гроз в радиусе нескольких сот километров.

Рассматриваются способы определения направления и расстояния до молниевых разряда. Особое внимание уделяется анализу различных методов дальнометрии гроз, определению их вероятностных точностных характеристик и аппаратурной реализации.

Книга предназначена для широкого круга специалистов, связанных с проблемой предупреждения грозоопасности в различных отраслях народного хозяйства и, в частности, для работников Аэрофлота и Гидрометеослужбы, а также для студентов, аспирантов, слушателей военных академий и преподавателей в качестве пособия при изучении соответствующего раздела курса радиометеорологии.

This book is devoted to the problem of designing bearing and range sets for operative location of thunderstorms in the range of some hundreds kilometers from a single observing station. The methods of range and bearing measurements up to the point of lightning discharges are considered. Special attention is devoted to the analysis of different methods of determining range from thunderstorm. Probabilitic accuracy characteristics are determined as well as hardware implementation.

The book is intended for a broad range of specialists, associated with the problem of thunderstorm danger warning in different branches of national economy, particularly for the staff of Airports and hidrometeorology service. The book is also usefui as a textbook for the students, post-graduates and teachers of high school in the studying the course of radiometeorology.



ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге читателю предлагается систематизированный материал о физических и статистических характеристиках электромагнитного излучения молний и законах их изменения с расстоянием, на основании которых может быть построена аппаратура для оперативного обнаружения гроз. Дается анализ различных методов дальнометрии с оценкой их точностных характеристик. Рассматриваются основы пеленгации гроз и ошибки пеленгования. Описываются аппаратурная реализация устройств пеленгации и дальнометрии и результаты использования их для оперативного определения местоположения грозových очагов.

Авторы пытались осветить состояние проблемы на уровне современных достижений в этой области на сегодняшний день. Изложенные методы наблюдения за грозами только сейчас получают широкое развитие, и в ближайшие годы можно ожидать появления новой аппаратуры с более высокой точностью определения местоположения гроз, с автоматизированной обработкой информации о грозах, с передачей обработанных данных потребителям и в автоматизированные метеорологические комплексы. Поэтому весьма актуальным является ознакомление с рассматриваемой проблемой специалистов-радиометеорологов, занимающихся проектированием новой аппаратуры и эксплуатирующих разработанные устройства. Не меньший интерес книга должна представлять для преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов высших учебных заведений, в которых изучаются вопросы радиометеорологии.

Авторы выражают признательность рецензенту Л. Г. Махоткину, замечания, пожелания и советы которого оказали большую помощь при доработке рукописи и подготовке ее к изданию.

Сознавая, что книга не свободна от недостатков, так как представляет собой попытку дать систематизированный материал о радиотехнических методах наблюдения за грозами, которые в настоящий момент находятся в стадии динамического развития, авторы с благодарностью примут замечания и пожелания.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей книге рассматриваются вопросы, относящиеся к созданию современных грозопеленгаторов и дальномеров, обеспечивающих получение оперативной информации о расположении грозовых очагов в радиусе до 300 км. Такая информация предназначена для авиации и других отраслей народного хозяйства, где требуются оперативные данные о возникновении грозоопасной ситуации.

Решение задачи определения местоположения грозовых очагов из одного пункта требует комплексного рассмотрения целого ряда вопросов. Во-первых, необходимо иметь достаточно четкое представление о характере молниевых разрядов как источников электромагнитного излучения (ЭМИ). Во-вторых, необходимо знать основные особенности трансформации ЭМИ при распространении над земной поверхностью. Большой круг вопросов связан с отысканием конкретных способов обработки регистрируемых сигналов с целью извлечения интересующей нас информации о координатах источника излучения и созданием автономных устройств, обладающих достаточной для практических и исследовательских целей точностью, надежностью, быстродействием, удобством представления информации в виде, пригодном для последующей обработки и хранения.

Вопросам теории атмосферного электричества, физическим процессам, происходящим при разряде молнии, а также изучению свойств сопровождающего разряд ЭМИ посвящено большое число работ. Современные представления об упомянутых выше объектах исследования с достаточной полнотой систематизированы в вышедших в последние годы монографиях [2, 79, 82].

В 1966 г. вышла книга В. Е. Кашпровского «Определение местоположения гроз радиотехническими методами» [40], в которой рассматриваются аспекты инструментальных методов и средств изучения гроз. Большинство из рассмотренных в книге методов определения координат грозовых очагов составляют

многоточковые базисные методы, основанные на регистрации пеленга (угломерные системы) или времени прихода сигнала в пункты наблюдения (гиперболические системы).

В качестве одного из наиболее перспективных направлений развития инструментальных методов наблюдения за грозами в упомянутой книге отмечалась разработка одноpunktных систем определения их местоположения. Такого рода системы основываются на определении направления (пеленга) на источник излучения и дальности до него.

Первые практические результаты по определению направления прихода излучения были получены еще в середине 20-х годов, когда были созданы узкосекторные пеленгаторы [40]. Однако основные успехи техники пеленгации связаны с разработкой катодных пеленгаторов Ватсон-Ваттом в 1926 г. [147]. Дальнейшие усилия при построении различных модификаций пеленгаторов были направлены на уменьшение динамических, поляризационных и инструментальных ошибок.

Из новой аппаратуры для пеленгации гроз можно упомянуть созданный в СССР грозопеленгатор ПАГ-1 [10, 12], предназначенный для совместной работы с метеорологическим радиолокатором (МРЛ) и снабженный для этой цели устройством, ограничивающим его дальность действия в радиусе 300 км, т. е. в радиусе действия МРЛ.

Весьма значительные трудности встретились при создании дальномеров. Для определения удаленности грозовых очагов первоначально использовались наиболее ярко выраженные особенности распространения ЭМИ молниевых разрядов над поверхностью земли: изменение с расстоянием амплитуды первой полуволны атмосферика или отклика узкополосной системы на его воздействие [56, 60, 113], наличие зеркальных отражений от поверхности ионосферы и земли [117, 134], наличие критической частоты, выше которой отражения отсутствуют [91] и т. д.

По мере развития теории распространения электромагнитных сигналов сверхдлинноволнового (СДВ) диапазона, совершенствования методики экспериментальных исследований появлялись методы дальнометрии, учитывающие более тонкие особенности трансформации параметров атмосфериков, такие, как запаздывание его низкочастотного «хвоста» относительно головной части [100, 101], изменение длительности последующих квазиполупериодов [101]. Большое внимание привлекают методы дальнометрии, основанные на использовании дисперсионных свойств волновода земля—ионосфера. К ряду более ранних методов, учитывающих особенности изменения амплитудно-частотного спектра атмосферика [39, 92], добавились методы, основанные на использовании фазового спектра [35, 132]. Сравнительный анализ упомянутых выше методов дальнометрии содержится в появившихся в последние годы монографиях [2, 35].

Однако в большинстве случаев эти методы позволяют с той или иной точностью определять положение далеких грозовых очагов. Для ближней зоны (до 300 км) эти методы не пригодны главным образом по той причине, что основные закономерности распространения, на которых методы базируются, проявляются начиная с расстояний в несколько сот километров.

В то же время решение задачи определения местоположения ближних гроз имеет весьма большое практическое значение. Можно указать следующие области применения автономного грозопеленгатора-дальномера ближнего действия для служб грозового предупреждения.

1. Для метеорологического обеспечения авиации, особенно в тех случаях, когда районы, в которых действует эта авиация, не обслуживаются метеорологическими радиолокаторами. Последнее, в частности, относится к обслуживанию местных воздушных линий.

2. В морских и речных портах, где производится заправка танкеров, для принятия необходимых мер грозозащиты.

3. На крупных танкерах для предупреждения о появлении гроз и развертывания средств грозозащиты или для выполнения необходимого маневра с тем, чтобы избежать встречи с грозой.

4. При строительных и горно-рудных работах, при производстве взрывных работ с целью исключения опасности самоподрыва вследствие воздействия на запальные линии молниевых разрядов.

5. В службе пожарной охраны крупных лесных массивов, где для патрулирования больших площадей используется авиация.

6. В службе охраны ЛЭП для ускорения обнаружения и определения причины аварии, вызванной грозой.

Отсутствие заметного прогресса в разработке новых принципов однопунктовой дальнометрии побуждало вновь и вновь обращаться к методам, уже предложенным ранее, с целью расширения области их использования путем применения более совершенной методики обработки и аппаратурных решений.

К числу таких методов можно прежде всего отнести амплитудный метод, первые упоминания о котором появились 40 лет назад [95].

Простейшей реализацией данного метода, учитывающей зависимость амплитуды атмосферика от расстояния до молниевых разряда и осуществляющей амплитудную селекцию, является грозорегистратор, применяемый в различных странах в качестве одного из оперативных инструментальных средств исследования грозовой активности.

В СССР работы по созданию и практическому использованию грозорегистраторов производились в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) и в ряде других организаций [6, 33, 55]. Эти приборы, используемые в качестве индикаторов ближних гроз, и позволили получить данные о рас-

пределении гроз по территории Советского Союза, о суточных и сезонных вариациях их активности.

В результате исследований [60] была создана экспериментальная установка для определения местоположения ближних грозовых очагов (до 300 км) с градациями расстояния, соответствующими геометрической прогрессии со знаменателем 2 (25, 50, 100, 200 км) [56]. В настоящее время в этом направлении интенсивно ведутся разработки устройств для оперативного обнаружения гроз, использующие новые технологические возможности приборостроения.

К числу методов дальнометрии, к которым периодически обращались исследователи, можно отнести метод, основанный на измерении времени запаздывания ионосферных отражений относительно сигнала, распространяющегося вдоль земной поверхности [117, 134]. Поскольку отдельные усовершенствования аппаратурных разработок метода не принесли желаемых результатов, метод не нашел практического применения.

В последние годы была предпринята попытка перенести нижнюю границу области использования амплитудно-дисперсионного метода, ранее рекомендованного лишь для расстояний 500—более 1000 км [39, 92], в сторону меньших расстояний, 100—200 км [24]. По данным авторов работы [24], минимальное расстояние удалось уменьшить до 100—150 км. Однако точность определения расстояния в этом интервале получается невысокой — около 30%.

В последние годы был предложен метод определения расстояния в ближней зоне, основанный на различной зависимости от расстояния электрической и магнитной составляющих поля ($E-H$ -метод) [45, 76]. Как показывают данные расчетов и результаты полевых испытаний макетов различных модификаций этого метода, он является одним из наиболее точных для измерений расстояния до грозовых очагов в ближней зоне. Однако погрешности оценки расстояния этим методом заметно растут с увеличением расстояния. Верхняя граница его использования с приемлемой для практических целей точностью (10—20%) составляет 80—100 км.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕЛЕНГАЦИИ И ДАЛЬНОМЕТРИИ ГРОЗОВЫХ ОЧАГОВ

1.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Одной из важнейших предпосылок образования гроз является появление в атмосфере условий, благоприятных для развития мощной вертикальной конвекции богатого водяным паром воздуха. Такая конвекция может возникнуть или при сильном нагревании земной поверхности солнцем, или в результате бурного вытеснения вверх теплого воздуха вторгшимся снизу холодным воздухом. В первом случае образуются так называемые внутримассовые, или «тепловые», грозы, во втором — фронтальные грозы.

Фронтальные грозы распространяются на большую территорию и более продолжительны, чем тепловые.

Рассмотрим некоторые особенности грозовой деятельности, которые необходимо учитывать при проектировании систем местоопределения гроз.

Для большинства континентальных районов грозы представляют собой явление теплого времени года. В средних широтах наибольшее количество гроз приходится на лето (июнь—август), а наименьшее — на зиму, когда изредка наблюдаются слабые и кратковременные грозы. В некоторых прибрежных районах, находящихся в зоне влияния теплых морских течений, количество зимних гроз может быть значительно больше. Например, у берегов Норвегии один из максимумов грозовой активности приходится на январь. Много зимних гроз и на побережье Англии, а у берегов Исландии зимние грозы являются преобладающими.

В тропических и субтропических зонах наибольшее количество гроз приходится на дождливый период: в Индии — на апрель—май и сентябрь, в Экваториальной Африке — на декабрь—март. В пустынных районах грозы чрезвычайно редки. В горах интенсивность грозообразования возрастает. Причем

в высокогорных районах грозы характеризуются очень большим количеством разрядов.

В течение суток распределение гроз также весьма неравномерно. Большая часть гроз приходится на послеполуденные часы (с 13 до 24 ч) с максимумом около 15—16 ч. Значительно реже грозы наблюдаются утром (5—7 ч).

На юге и юго-востоке СССР, а также на южном побережье Балтики нередки грозы поздно вечером и ночью, причем эти грозы отличаются большой продолжительностью и интенсивностью по сравнению с другими.

Над морем грозы чаще возникают после полуночи.

Продолжительность гроз в разное время года и в разных местах различна. Больше половины гроз в средних широтах длится час и менее и лишь сравнительно небольшое число гроз продолжается более 4 ч. Продолжительность гроз может быть очень большой в тропических областях, там наблюдались грозы, длившиеся более 13 ч.

При выборе интервалов времени наблюдений и обработки данных необходимо учитывать перемещение гроз.

Как правило, грозы перемещаются с достаточно большой скоростью, в среднем около 40 км/ч [7]. При этом обнаруживаются некоторые общие закономерности. Так, над равниной Европейской территории СССР при перемещении с запада на восток грозы имеют несколько большую скорость, чем при движении в противоположном направлении. Скорость перемещения фронтальных гроз в среднем больше, чем внутримассовых (тепловых). Это объясняется более слабой связью внутримассовых гроз с воздушными потоками верхних слоев атмосферы. В свою очередь скорость движения тепловых гроз утром больше, чем в полдень.

1.2. РАЗВИТИЕ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ. РАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Подъем теплого воздуха, обусловленный прогревом поверхности или вытеснением холодными атмосферными фронтами, служит толчком к развитию конвективных циркуляций. При этом воздушная масса разбивается на конвективные ячейки, в каждой из которых наблюдается восходящее движение в центре и нисходящее движение по периферии. Горизонтальные размеры ячейки составляют 2—8 км, а их число в отдельных грозовых облаках может достигать восьми [7]. Пространство между конвективными ячейками длиной в несколько километров занимают безвихревые зоны. Каждая конвективная ячейка проходит стадию зарождения, зрелости и затухания.

В стадии зарождения преобладают восходящие течения, скорость которых может достигать 20—30 м/с. Стадия зрелости

характеризуется развитием восходящих и нисходящих потоков, наибольшей электрической активностью (разрядами молний) и выпадением осадков. В стадии затухания в ячейке преобладают слабые нисходящие движения, электрическая активность и количество осадков уменьшаются. Полный цикл жизни каждой ячейки составляет около часа, при этом длительность стадии зрелости составляет 15—30 мин, стадии затухания — около 20—30 мин. Более длительная грозовая активность облака связана с деятельностью нескольких грозовых ячеек.

Чаще всего грозовую активность связывают с появлением в облаке частиц твердой фазы (кристаллов льда, крупы). Однако в тропической и субтропической областях наблюдаются грозы и в чисто водяных облаках [80].

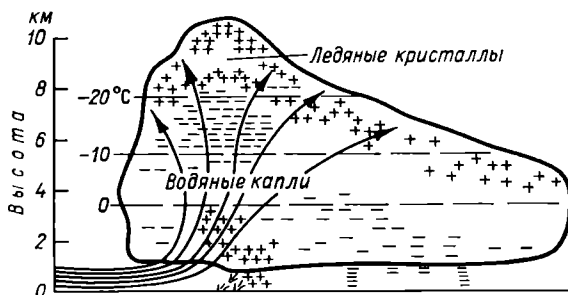


Рис. 1.1. Электрическая структура грозового облака.

Механизм образования зарядов в грозовом облаке пока до конца не выяснен. Поэтому, не останавливаясь на многочисленных гипотезах этого явления, отметим, что большие скорости конвективного подъема воздуха способствуют интенсивному зарядению облачных частиц (водяных капель, града, крупы) и разделению зарядов. В результате действия сил тяжести и конвективного потока воздуха в облаке образуются разноименно заряженные области. По общепринятым представлениям, верх кучевых и ливневых облаков (на высоте 3—9 км) заряжен положительно, в то время как ниже 6 км (с центром вблизи 3 км) облако заряжено отрицательно [82]. Перекрытие областей положительных и отрицательных зарядов объясняется сосуществованием в некоторых частях облака зарядов противоположных знаков до их разделения конвекцией.

Кроме того, в нижней части облака образуется сравнительно небольшая область положительных зарядов. С появлением этой области связывают переход ливневого облака в грозовое.

Упрощенная структура грозового облака, соответствующая описанной выше модели, изображена на рис. 1.1.

Такая структура облака подтверждается как прямыми измерениями знака и величины зарядов в облаке, так и измере-

ниями обусловленных облачными зарядами электростатических полей на различных расстояниях от него.

В результате разделения зарядов, которое происходит в грозовом облаке, создаются сильные электрические поля внутри облака и в окружающем его пространстве. При таких условиях между отдельными частями облака или между облаками и землей могут возникать искровые разряды — молнии.

Молнии различают по их внешнему виду. Наиболее часто из так называемой линейной молнии встречаются зигзагообразная и разветвленная, реже — ленточная и ракетообразная. Кроме этого, наблюдаются молнии, развивающиеся из облака вверх, а также плоская молния, охватывающая и освещающая значительную часть облака [73]. Гораздо реже встречаются шаровые и четочные молнии, имеющие вид шаров небольшого диаметра, располагающихся вдоль пути, проложенного предшествующим разрядом.

Средняя длина видимой части линейной молнии составляет 2—3 км.

Развитие типичной линейной молнии начинается со стадии пробоя серией стримеров промежутка между отрицательно заряженной областью облака и областью положительных зарядов, скопившихся в нижней части облака. Эта стадия длится 2—10 мс.

После пробоя обычно наступает промежуточная стадия относительно слабой разрядной активности продолжительностью 0—400 мс. Вслед за промежуточной стадией из отрицательно заряженной области, которая в результате предшествующего пробоя как бы подтянута к нижней кромке облака, развивается слабо светящийся разряд, направленный вниз и сильно разветвляющийся. Развитие этой стадии, называемой лидерной и представляющей собой отдельные светящиеся ступени длиной 50—60 м, происходит толчками с паузами 50—100 мкс. Когда разряд лидерной стадии достигает земли, по подготовленному им каналу развивается ярко светящийся главный разряд (обратный удар). Большой отрицательный заряд, распределенный вдоль лидерного канала, начинает стекать на землю. Быстрое изменение зарядов распространяется вверх с большой скоростью (до $1,5 \cdot 10^8$ м/с). С электродинамической точки зрения главный разряд эквивалентен волне тока положительных зарядов, двигающейся в вертикальном направлении (именно такая модель принимается обычно при расчетах), хотя действительные процессы в канале связаны с движением отрицательных зарядов. Движущийся фронт обратного удара перекрывает промежуток между землей и облаком за 70—100 мкс. Ток разряда достигает нескольких десятков ампер, а в отдельных случаях может превышать 100 кА. Переносимый при этом заряд колеблется от единиц до нескольких десятков кулонов.

Схематическое изображение описанных выше видимых стадий разряда приведено на рис. 1.2 [73].

Вслед за главным разрядом по тому же каналу из более высоких областей, как правило, следуют повторные обратные удары. Их число может достигать 20. Однако наиболее вероятно в средних широтах 2—3 разряда, причем во фронтальных грозах повторных разрядов больше, чем в тепловых.

Наиболее вероятное значение интервала между последовательными обратными ударами, по данным различных авторов, лежит в пределах 40—70 мкс.

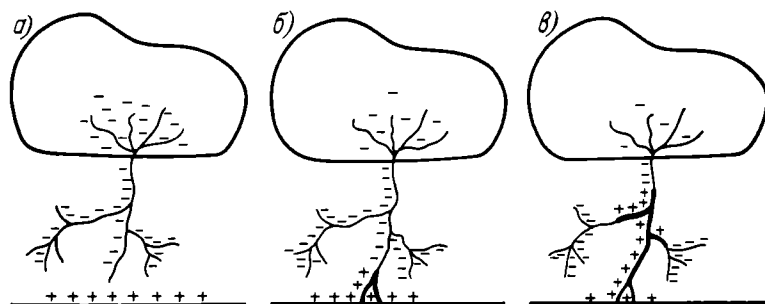


Рис. 1.2. Видимые стадии развития разряда облако—земля.

а — лидерная, *б* — начальная, *в* — промежуточная.

Повторным ударам, как правило, предшествуют так называемые стреловидные лидеры. Развитие стреловидного лидера, в отличие от ступенчатого, происходит непрерывно. Вслед за последним обратным ударом наступает финальная стадия, характеризующаяся протеканием по каналу небольших, но длительных непрерывных токов.

Иногда наблюдается внезапное усиление сплошного свечения канала, сопровождающего обратный удар и называемого *М*-компонентой [122]. Удар, после которого наблюдается такое свечение, длящееся 40 мс и более, называется затяжным. В отличие от затяжных, удары, свечение после которых резко прекращается, называют дискретными.

Таким образом, разряд в целом представляет сложное физическое явление, состоящее из нескольких специфических стадий. Общая длительность разряда в целом составляет 0,5—1,5 с.

1.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

Формирование в грозовом облаке больших разноименно заряженных областей приводит к появлению значительных электростатических полей. Разрядные токи вызывают появление

импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ), которое способно распространяться на большие расстояния и называется атмосфериком.

Сравнительно медленные изменения электростатического поля связаны с перемещением облака и перераспределением зарядов внутри него вследствие разрядных процессов. Измерения, проведенные разными авторами (см., например, [127]), показали, что знак изменения напряженности статического поля может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от расстояния до облака.

В соответствии с описанными выше стадиями развития разряда обусловленное им ЭМИ также подразделяется на ряд

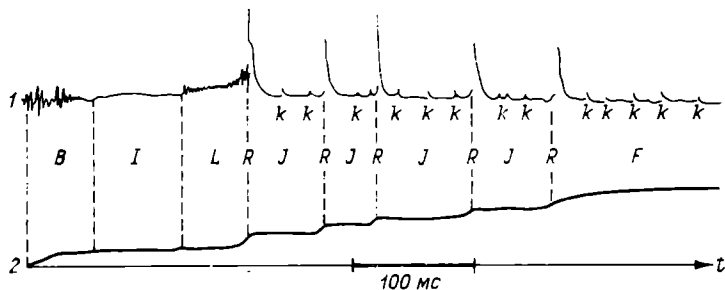


Рис. 1.3. Изменения электрического поля, сопровождающие разряд облако—земля.

1 — ЭМИ в волновой зоне, 2 — электростатическая составляющая.

характерных стадий. На рис. 1.3 представлена общая картина изменения ЭМИ (кривая 1) и электростатического поля (кривая 2) на различных стадиях развития разряда.

Стадия пробоя (*B*) характеризуется сравнительно небольшими изменениями электростатического поля, отрицательными для расстояний, меньших 2 км, переменными по знаку для расстояний от 2 до 5 км и положительными для больших расстояний.

Указанные вариации поля можно приписать или движению положительного заряда вверх, или опусканию отрицательного заряда вниз [90]. Это в свою очередь служит доказательством того, что изменение поля при пробое обусловлено разрядами между областью отрицательного заряда в облаке и областью положительного заряда, локализованного в его нижней части. Электромагнитные излучения на стадии пробоя представляют собой серию коротких импульсов, имеющих широкий частотный спектр.

Промежуточная стадия (*I*) характеризуется незначительными нерегулярными изменениями статического поля и очень низкой активностью ЭМИ.

Так же как и в стадии пробоя, типичные изменения статического поля лидерной стадии (*L*) отрицательны на малых и

положительны на больших расстояниях от разряда, что соответствует переносу отрицательных зарядов из облака к земле. Электромагнитное излучение лидерной стадии представляет собой пуг дипольных (в волновой зоне) импульсов длительностью от 4 до 30 мс [90].

Длительность отдельных импульсов цуга составляет единицы микросекунд, а интервалы между ними (наиболее вероятные значения) лежат в пределах 50—100 мкс, что соответствует ступенчатому характеру развития этой стадии.

Изменения электростатического поля в стадии главного разряда (R) распадаются на две части [133]. Быстро нарастающие изменения R_b длительностью 50—250 мкс соответствуют быстрому движению обратного удара к облаку. За R_b следует более медленное изменение поля R_c , длящееся 70—900 мкс, что приблизительно совпадает с длительностью сплошного свечения в канале обратного удара. Оба эти изменения положительны, что соответствует их связи с уходом отрицательных зарядов из канала лидера и облака на землю.

Изменения статического поля, соответствующие затяжным разрядам, называемые иногда S -изменениями, очень значительны. Переносимый при этом заряд достигает 30 Кл, в то время как дискретным разрядом переносится заряд в несколько единиц кулонов.

Электромагнитное излучение обратных ударов наиболее часто используется для целей пеленгации и дальнометрии гроз. Его временные и спектральные характеристики будут рассмотрены ниже.

Вслед за главным разрядом по тому же каналу, как правило, следуют повторные обратные удары, ЭМИ которых характеризуется взаимным подобием форм. Интервалы между последующими обратными ударами (J -стадия) перекрываются серией малых и быстрых изменений ЭМИ (k -импульсы), следующих через 2—20 мс [148]. Рассматривая изменения статического поля J -стадии, Малан [120] нашел, что J -изменения поля связаны с движением положительных разрядов (стримеров) вверх от конца канала главного разряда в области скопления отрицательных зарядов и подготавливают условия для возникновения стреловидного лидера и повторного обратного удара.

Финальная стадия разряда (F) характеризуется медленными и длительными изменениями поля, перекрывающимися несколькими небольшими изменениями, аналогичными k -импульсам.

На рис. 1.4 в более крупном временном масштабе изображены ЭМИ на стадиях процесса, предшествующих первому обратному удару [108], зарегистрированному на различном удалении от разряда. Из рисунка видны характерные особенности изменения поля с расстоянием. Скачкообразные изменения поля

на малых расстояниях трансформируются по мере удаления в импульсы колебательной формы.

Наряду с разрядами облако—земля наблюдаются внутри- и межоблачные разряды. Электромагнитное излучение, соответствующее этому типу разряда, может быть подразделено на три характерные стадии [115] (рис. 1.5):

а) начальная стадия *I* характеризуется импульсами малой амплитуды. В отличие от лидерной стадии разряда облако—земля ее общая длительность примерно в 2—5 раз больше и может достигать 300 мс. Интервалы между отдельными импульсами лежат в очень широкой области, от нескольких десятков микросекунд до 10 мс;

б) активная стадия *A*, в которую непрерывно переходит начальная стадия развития облачного разряда; она представляет собой последовательность хаотических импульсов, характеризующихся большой нерегулярностью форм и интервалов между ними;

в) финальная стадия облачных разрядов подобна аналогичной стадии развития разряда облако—земля.

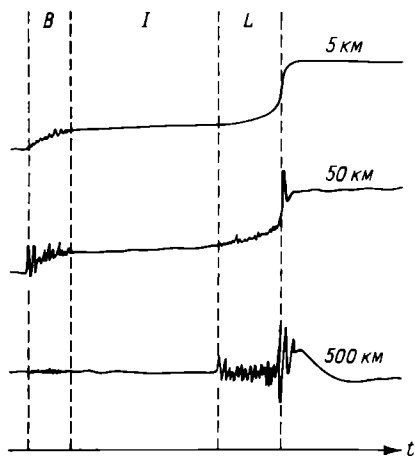


Рис. 1.4. Изменение электрического поля разряда с расстоянием.

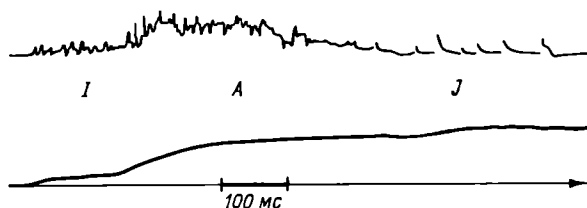


Рис. 1.5. Изменения электрического поля, сопровождающие разряд облако—облако.

Авторами работы [149] были проанализированы изменения электрического поля, обусловленные приблизительно 100 облачными разрядами. Было установлено, что среднее расстояние между зарядами составляет по вертикали 0,6 км, причем положительный заряд находится, как правило, выше отрицательного. Расстояние между зарядами по горизонтали изменяется от 1 до 10 км при среднем значении около 3 км. Позднее

Рейнольдс и Нейл [130] сообщили, что внутриоблачные разряды обычно наклонены к вертикали примерно на 45° .

Средняя высота центра отрицательного заряда, который в 28 случаях из 35 находился ниже положительного, составляет 5,5 км над уровнем земли.

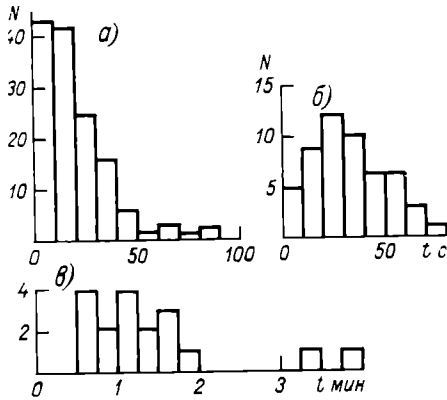


Рис. 1.6. Распределение интервалов между отдельными грозовыми разрядами.

a — гроза большой интенсивности, *б* — гроза средней интенсивности, *а* — гроза слабой интенсивности.

Фотографий молниевых разрядов их можно представить в виде отдельных отрезков, отклонения направлений которых от не-

В работе [139] приведены данные о том, что горизонтальные разряды встречаются на высоте от 6 до 12 км и имеют длину от 2 до 8 км. Лигда [119] сообщил о радиолокационных наблюдениях очень длинных горизонтальных разрядов молний. Эти разряды сильно ветвятся. Самый длинный наблюдавшийся разряд превышал 150 км.

Следует заметить, что главные разряды облако—земля также проходят очень извилистый путь. Как показано в работе [104], на основании анализа нескольких стереоскопических фото-

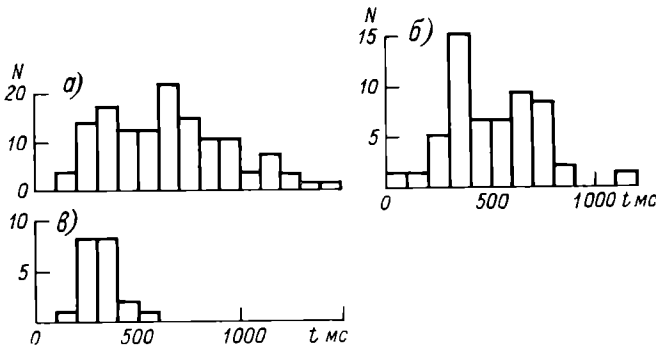


Рис. 1.7. Распределение длительностей молниевых разрядов.

a — гроза большой интенсивности, *б* — гроза средней интенсивности, *а* — гроза слабой интенсивности.

которого среднего пути разряда являются случайными. Причем средняя величина этих отклонений от одного направления составляет 16° и практически не зависит от выбора длины отрезка (в пределах 5—70 м).

Соотношение числа облачных разрядов и числа разрядов на землю изменяется в очень широких пределах от грозы к грозе. Это изменение ряд авторов связывает с фронтальным или тепловым характером гроз. Как правило, внутриоблачных разрядов бывает больше, чем разрядов на землю, причем их соотношение зависит от географической широты места наблюдения. По данным работы [129], количество внутриоблачных разрядов составляет 50—70% общего числа разрядов в средних широтах и достигает 90% в нижних широтах. Соотношение рассматриваемых типов разрядов зависит также и от рельефа. Так, по данным работ [74, 75], в горных районах относительное количество внутриоблачных разрядов значительно больше, чем над равниной.

Длительность разрядов и частота их следования зависит от интенсивности грозы. Соответствующие характеристики иллюстрируются на рис. 1.6 и 1.7 [115], где приведены гистограммы значений числа разрядов N с интервалами между отдельными разрядами 10, 20 с и т. д. для гроз большой и средней интенсивности и с интервалами 15, 30 с и т. д. для гроз слабой интенсивности, а также дается распределение числа разрядов по их длительности для гроз большой, средней и слабой интенсивности.

Для средних широт среднее значение частоты разрядов составляет 60—100 в час на одну грозу [110]. В горных условиях и в тропиках эта цифра может быть значительно больше. В результате экспериментальных исследований, проведенных ГГО в различных условиях, были получены следующие значения среднего количества разрядов за 15 мин [31]:

Воейково (Ленинградская обл.)	16
Душети (Кавказ)	26
Одесса	23

Среди многочисленных параметров, характеризующих атмосферники, нас в первую очередь будут интересовать амплитудные и спектральные соотношения. Вклад различных стадий разряда в электромагнитное излучение существенно меняется с изменением частоты. В диапазоне сверхдлинных волн (3—30 кГц) основными источниками излучения являются лидеры и обратные удары в разрядах облако—земля, а также k -изменения в облачных разрядах. Излучение в этом диапазоне частот, соответствующее пробивной и промежуточным стадиям развития разряда, пренебрежимо мало. С увеличением частоты относительная интенсивность почти непрерывного излучения в пробивной и промежуточной стадиях растет и на частотах 1 МГц и выше уже превышает излучение, соответствующее обратному удару. Более того, на частоте 10 МГц наблюдается уменьшение интенсивности непрерывного излучения, длящееся 2—15 мс после обратного удара. Это изменение интенсивности

высокочастотного излучения (ВЧ) связано с тем, что проникающие стримеры, обуславливающие ВЧ компоненту, вновь появляются после достижения обратным ударом вершины канала, лежащей внутри облака.

По данным работы [88], излучение на частотах 400 и 800 МГц (соответствующих СВЧ диапазону) обусловлено процессами пробоя, лидерными процессами и k -изменениями в облачных разрядах. Излучение во время обратного удара на этих частотах зарегистрировано не было.

Исследуя ВЧ и СВЧ излучение на разных стадиях грозовой активности, авторы работы [150] обнаружили, что рассматриваемое излучение начинало превышать уровень внутренних шумов приемных устройств за 10—15 мин до первой вспышки

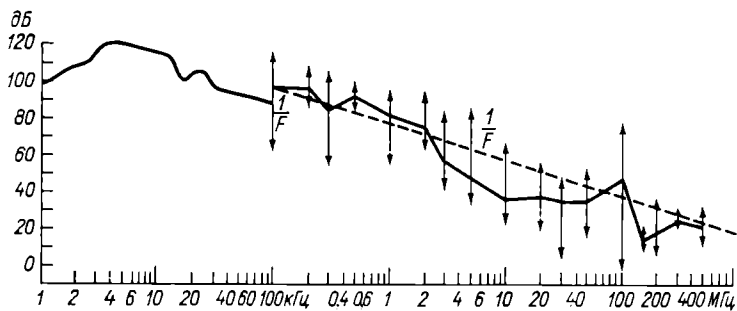


Рис. 1.8. Изменение спектральной плотности атмосфериков, приведенной к полосе частоты 1 кГц и расстоянию 10 км [114].

молнии. Это обстоятельство позволяет в принципе прогнозировать момент перехода облака в стадию, сопровождающуюся появлением главных разрядов. Однако исследования в этом направлении только начинаются и какие-либо практические рекомендации делать еще преждевременно.

На рис. 1.8 воспроизведена кривая изменения относительной спектральной плотности, приведенной к полосе 1 кГц и расстоянию 10 км, в зависимости от частоты, обобщающая данные ряда теоретических и экспериментальных исследований [114].

На рис. 1.9 изображена кривая, характеризующая зависимость от частоты медианных значений пиковых амплитуд E_m электрического поля в полосе 1 Гц, приведенных к расстоянию 10 км [108]. Данная кривая может служить ориентиром при выборе пороговой чувствительности устройств, работающих в различных частотных областях (с учетом полосы пропускания).

Известно, что форма ЭМИ главных разрядов, зависящая от целого ряда факторов, может меняться в очень широких пределах. Вследствие этого был предпринят целый ряд попыток определить спектральную плотность разрядов в соответствии с той или иной их классификацией по типам. Поскольку в на-

стоящее время не существует достаточно обоснованных объективных критериев для разделения ЭМИ разрядов (атмосфериков) на классы, классификации носят довольно субъективный характер. Зачастую классифицируются атмосферерики, пришедшие с различных расстояний, а не соответствующие одному источнику.

Наиболее объективной и обоснованной нам представляется классификация атмосферериков, данная Тэйлором [141]. Признаками классификации служили значения амплитуд и длительности первых двух полувольт, причем классифицировались атмосферерики, зарегистрированные

в волновой зоне, где изменения их формы, связанные с неточным знанием расстояния, незначительны. В соответствии с этой классификацией все атмосферерики можно разбить на пять типов, каждый из которых подразделяется на два подтипа в соответствии со знаком первой полуволны. На рис. 1.10 приведены осциллограммы характерных представителей всех типов. На рис. 1.11 даны соответствующие им спектры, приведенные к расстоянию 1 км. Атмосферерики типов 1 и 2, отличающиеся лишь величиной второй полуволны, образуют наиболее многочисленный класс (86% общего числа) атмосферериков так называемого нормального типа. Длительность первой полуволны атмосферериков нормального типа лежит в пределах 40—70 мкс, а знак в 94% случаев положителен. Атмосферерики типов 3—5 более короткие и преимущественно с отрицательной первой полуволной. Как видно из кривых спектральной плотности (рис. 1.11), спектры атмосферериков нормального типа имеют максимум в пределах 5—10 кГц. Спектры атмосферериков типов 3—4 очень похожи и имеют существенно большую, чем первые два типа, дисперсию. Тип 5 имеет спектральный пик в области 9—18 кГц. На частотах свыше 20 кГц спектры всех типов ведут себя подобным образом, меняясь приблизительно обратно пропорционально частоте. В последующем, учитывая, что атмосферерики типов 3—5 в совокупности составляют не более 14% общего числа разрядов, мы будем придерживаться менее детализированной классификации, подразделяя все атмосферерики на два класса: первый класс—атмосферерики нормального типа и второй — атмосферерики типов 3—5.

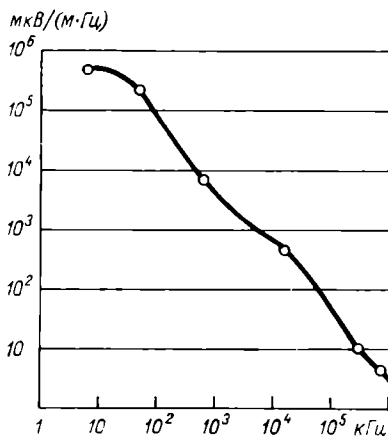


Рис. 1.9. Частотная зависимость пиковых значений электрического поля (в полосе частоты 1 Гц), приведенная к расстоянию 10 км [108].

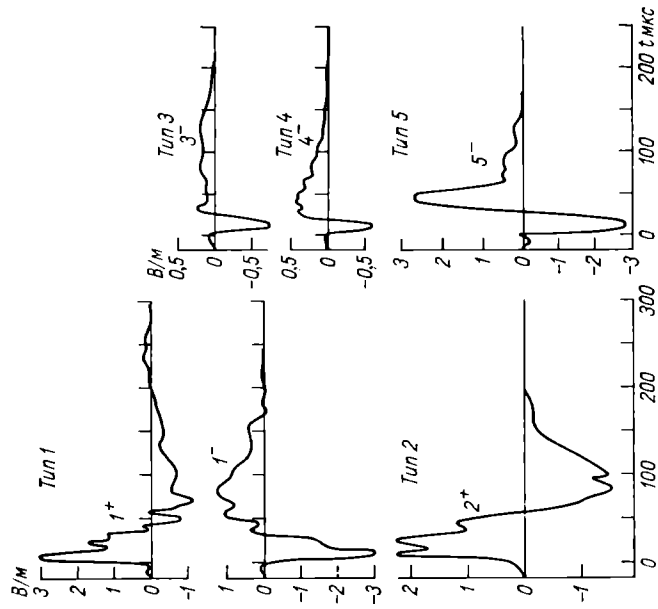


Рис. 1.10. Типы атмосферных спектров по Тэйлору [141].

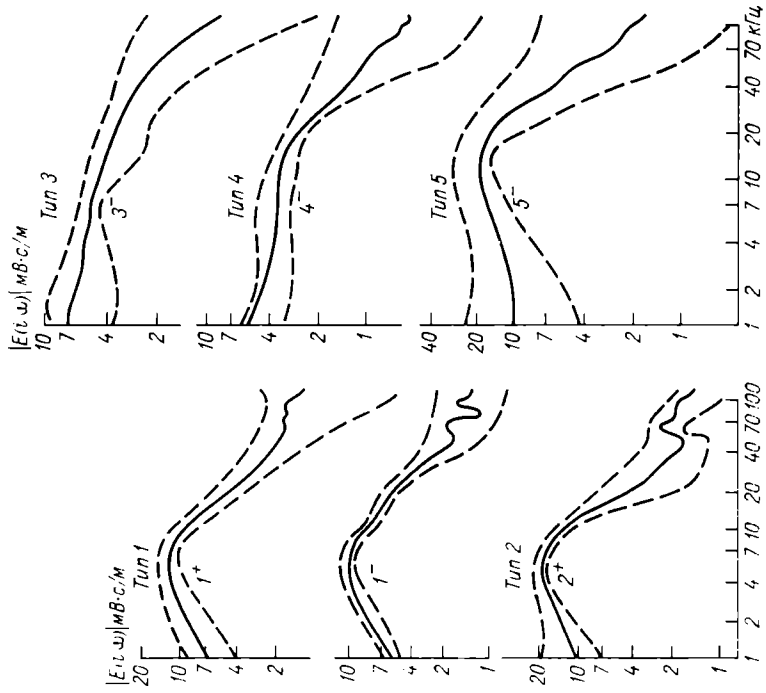


Рис. 1.11. Спектры типов атмосферных спектров по Тэйлору [141].

Распределение амплитуд разрядов, обусловленных отдельной грозой, по данным большинства авторов, подчиняется нормально-логарифмическому закону:

$$f(U) = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-U^2/2\sigma^2}, \quad (1.1)$$

где $U = \ln E_0$, E_0 — напряженность электрического поля, нормированная к модальному значению. У разных авторов наблюдается лишь расхождение в значениях параметра этого закона (σ), которые меняются от 4 до 12 дБ. Характер распределения (1.1) не зависит от частоты, на которой регистрируются сигналы, и ширины полосы пропускания. В табл. 1.1 [108] приведены значения среднего квадратического отклонения σ для различных спектральных составляющих атмосфериков.

Таблица 1.1

Статистические данные, характеризующие величину оценки σ нормально-логарифмического закона распределения амплитуд атмосфериков в различных частотных областях

Частота	Число		σ дБ		
	гроз	атмосфериков	область изменений	медiana	наивероятнейшее значение
6 кГц	11	120	2,7—9,2	4,8	6,5
8	3	36	5,1—6,7	6,2	5,5
10	10	112	3,3—8,5	5,2	5,4
40	3	38	5,2—7,1	6,7	6,7
550	5	43	1,6—7,8	4,2	4,4
11 МГц	10	108	2,3—8,9	4,4	4,6

На основании данных таблицы трудно сделать какие-либо определенные выводы относительно зависимости величины σ от частоты. Нормально-логарифмическому закону распределения подчиняются также амплитуды токов разрядов [121, 124, 145].

1.4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

Электромагнитное излучение молниевых разрядов в целом характеризуется рядом параметров. Некоторые из них — амплитуды и длительность импульсных пачек, соответствующих различным стадиям развития разряда, характеристики отдельных импульсов внутри пачек, межразрядные интервалы — описываются статистическими распределениями. О некоторых распределениях этих параметров речь шла выше.

Проследить за характерными особенностями трансформации отдельных импульсов при распространении над земной поверхностью с целью извлечения интересующей нас информации об азимуте и дальности источника излучения можем, воспользовавшись моделями средних разрядов.

Обычная методика расчета компонент поля, обусловленных молниевыми разрядами (как правило, интересуются вертикальной компонентой электрического E_z и горизонтальной компонентой магнитного H_φ полей), без учета влияния ионосферы основывается на использовании выражений, справедливых в рамках применимости плоской модели Земли с бесконечной проводимостью:

$$E_z(j\omega) = \frac{k^2}{2\pi\epsilon_0} \left[1 - \frac{1}{jkR} + \frac{1}{(jkR)^2} \right] \frac{e^{jkR}}{R} P(j\omega) e^{-j\omega t};$$

$$H_\varphi = -\frac{k^2 c}{2\pi} \left[1 - \frac{1}{jkR} \right] \frac{e^{jkR}}{R} P(j\omega) e^{-j\omega t}, \quad (1.2)$$

где R — расстояние до излучателя; $P(j\omega)$ — дипольный момент источника; $\epsilon_0 = (1/36\pi) \cdot 10^{-6}$ Ф/м; $k = \omega/c$; c — скорость света в пустоте.

Указанная методика расчетов предполагает, во-первых, возможность представления излучателя в виде диполя и, во-вторых, знание временной зависимости дипольного (или токового) момента, которая может быть получена либо на основании той или иной модели излучателя, либо в результате непосредственного эксперимента.

Впервые гипотеза о дипольности молниевых разрядов была высказана еще в 1927 г. [118] и в последующем без достаточных обоснований широко использовалась для расчетов соответствующего ему электромагнитного поля.

Для конкретных расчетов компонент поля была принята модель главного разряда облако—земля в виде волны тока, характеризующейся в его основании временной зависимостью

$$J(t) = J_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1.3)$$

и распространяющейся в вертикальном направлении с переменной скоростью [89]

$$v(t) = v_0 e^{-\gamma t}. \quad (1.4)$$

Приведенные в работе [89] параметры $J_0 = 28,4$ кА, $\alpha = 4,4 \times 10^4$ 1/с, $\beta = 4,6 \cdot 10^5$ 1/с, $v_0 = 8 \cdot 10^7$ м/с, $\gamma = 3 \cdot 10^4$ 1/с были получены по результатам прямых измерений токов в основании разрядов, проведенных авторами, и по фотографиям развития разряда [133].

В дальнейшем варьированием параметров в выражениях (1.3) и (1.4) удалось описать временные и спектральные харак-

теристики большинства встречающихся на практике как первых, так и повторных обратных ударов [87, 103, 123, 124, 136].

Основной особенностью повторных обратных ударов является то, что, по данным Шонланда [133], параметр $\gamma = 0$.

Для описания особенностей ЭМИ главных разрядов в диапазоне 300 Гц — 3 кГц в выражение для тока (1.3) в работе [100] введены дополнительные экспоненциальные слагаемые, в результате чего выражение для аппроксимации тока может быть представлено в более общем виде:

$$J(t) = \sum J_m e^{-\alpha_m t}. \quad (1.5)$$

Конкретные значения параметров, входящих в выражение (1.5), полученные различными авторами [84, 87, 89, 100], сведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения параметров отдельных слагаемых (m) аппроксимации тока разрядов в виде функции (1.5)

Автор	Параметр	Единица измерения	m			
			1	2	3	4
Брюс, Голд [89]	J_m	кА	28,4	-28,4	—	—
	α_m	1/с	$4,4 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^5$	—	—
Хелбурн [100]	J_m	кА	20	-25	5	—
	α_m	1/с	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^2$	—
Бергер [87]	первый удар	J_m	30	-30	—	—
		α_m	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	—	—
	последний удар	J_m	10	-10	—	—
		α_m	1/с	$1,4 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^6$	—
Арнольд, Пирс [84]	k -импульсы	J_m	16	-16	5,3	-5,3
		α_m	1/с	$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^3$

На рис. 1.12 приведены в различных масштабах начала (рис. 1.12 а) и «хвосты» (рис. 1.12 б) токов, соответствующих значениям параметров табл. 1.2.

Однако в большинстве перечисленных работ предполагалось, что распределение зарядов вдоль молниевоего канала равномерное и со временем меняется мгновенно вдоль всей его длины. При этом предположении входящий в выражение (1.2) дипольный момент нетрудно связать с параметрами, входящими в соотношения (1.3) и (1.4):

$$P(t) = J(t) \int_0^t v(\tau) d\tau. \quad (1.6)$$

Для расчета формы тока разряда иногда пользуются простейшей эквивалентной схемой в виде цепи, изображенной на рис. 1.13.

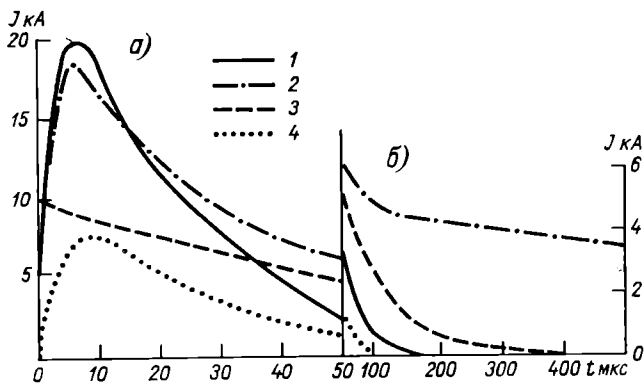


Рис. 1.12. Временные формы токов молниевых разрядов по данным различных авторов.

1 — Брюс, Голд [89], 2 — Хелбурн [100], 3 — Бергер [87], 4 — Арнольд, Пирс [84].

Решение относительно тока в данной цепи имеет вид выражения (1.3), причем параметры J_0 , α , β имеют простую связь с параметрами схемы:

$$\begin{aligned}\alpha &= \gamma_0 - (\gamma_0^2 - \omega_0^2)^{1/2}; \\ \beta &= \gamma_0 + (\gamma_0^2 - \omega_0^2)^{1/2}; \\ J_0 &= \omega_0 c V_0 / 2 (\gamma_0^2 - \omega_0^2)^{1/2},\end{aligned}\quad (1.7)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$; $\gamma_0 = r/2L$.

Более детальная модель разряда, не требующая неестественного допущения о мгновенности изменения зарядов вдоль всей длины, приведена в работе [93]. Авторы предположили, что ток за волновым фронтом описывается выражением

$$J(t) = J_0 [e^{-\alpha(t-z'/v_1)} - e^{-\beta(t-z'/v_1)}], \quad (1.8)$$

где v_1 — постоянная, направленная вверх скорость изменения волны тока; z' — текущая координата, отсчитываемая от основания разряда.

В качестве модели разряда, соответствующей данной схеме, можно использовать заряженную к моменту начала разряда длинную линию с потерями (рис. 1.14). Представление тока разряда в виде (1.3) является исходным для отыскания параметров, характеризующих линию. Поэтому данная модель не дает чего-

либо нового по сравнению с ранее рассмотренными моделями разрядов.

При $v_1 = \infty$ соотношение (1.8) принимает форму (1.3). В упомянутой выше работе [93] расчеты составляющих поля проводились для трех значений v_1 : $v_1 = v_0$ ($v_0 = 8 \cdot 10^7$ м/с); $v_1 = c$ ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с) и $v_1 = \infty$. В конечной модели было предложено использовать значение $v_1 = c$.

В последующих расчетах [142] было учтено также возможное резкое изменение скорости продвижения фронта разряда в точках его ветвления, сопровождающееся наблюдаемым изменением светимости канала [133]. Аппроксимация вида (1.8) используется также для расчетов ЭМИ, сопровождающего отдельные «ступени» лидерной стадии [143].

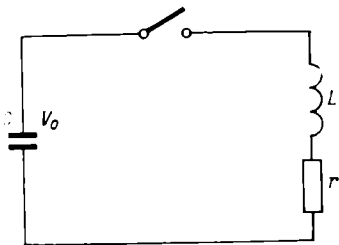


Рис. 1.13. Упрощенная эквивалентная схема разряда.

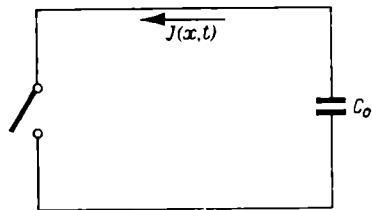


Рис. 1.14. Эквивалентная схема разряда в виде длинной линии.

Таким образом, моделью разряда облако—земля (как лидерного, так и главного), учитывающей как временные, так и пространственные изменения, может служить неоднородная волна тока, распространяющаяся с переменной скоростью вдоль тонкого вертикального или, в более общем случае, наклонного канала.

Данная модель разряда, учитывающая его основные пространственно-временные соотношения, дает возможность оценить его «дипольность». Такого рода оценки, приведенные в работе [47], показывают, что разница между компонентами поля, вычисленными в рамках строгой модели разряда [48], и компонентами, соответствующими его дипольному приближению, не превышает 1—2% с расстояний 1—2 км для лидеров и 25—30 км для главных разрядов. С уменьшением последнего предела различие растёт и в 10 км от основания разряда достигает 8—10%.

При последующем рассмотрении особенностей трансформации ЭМИ разрядов при его распространении над земной поверхностью мы будем исходить из представления их в виде диполя.

Рассмотрим теперь вопрос о способах получения эквивалентных дипольных моментов молниевых разрядов. В рамках справедливости выражения (1.2) поведение E_z компоненты поля определяется перераспределением влияния на нее трех слагаемых:

волнового, индукционного и статического. Если говорить об амплитуде и фазе отдельных спектральных составляющих сигналов, то границы, очерчивающие зоны преобладающего влияния того или иного члена, зависят от конкретных значений частоты. Для грубой оценки указанных границ могут служить неравенства:

$$\lambda/2\pi \gg R > l \quad (1.9a)$$

для статической зоны, где доминирует статический член (l — длина излучателя, а λ — длина волны);

$$R > \lambda/2\pi \quad (1.9b)$$

для волновой зоны.

На расстояниях $R < l$ амплитуда поля ведет себя по закону, описываемому выражением [146]

$$|E_z| \simeq \frac{1}{2\pi\epsilon_0} |P(j\omega)| \ln(2\pi R/\lambda). \quad (1.10)$$

Если рассматривать импульсы, регистрируемые в диапазоне сверхдлинных волн (СДВ), то на расстояниях до 10 км доминирующую роль играют статический и индукционный члены. Первый пропорционален дипольному моменту, а второй — его производной. На расстояниях 10—30 км основное влияние на поле оказывают индукционный и волновой члены. Волновой член, пропорциональный второй производной дипольного момента, становится доминирующим начиная с 40—50 км. Простая связь поля с источником (дипольным моментом) для сигналов, регистрируемых в зоне 50—120 км (для однородных хорошо проводящих трасс), позволяет использовать для расчетов ЭМИ разрядов над произвольными по параметрам и протяженности трассам и формы этих сигналов или их аналитическую аппроксимацию. Для частот менее 3—5 кГц в соответствии с требованием $R > \lambda/2\pi$, определяющим нижнюю границу волновой зоны, необходимо регистрировать поля на расстояниях свыше 150—200 км и иметь время развертки осциллографа T_p , определяемое из приближенного соотношения $T_p \simeq 1/f_n$. Здесь f_n — нижняя граница восстанавливаемых путем гармонического анализа осциллограмм атмосфериков спектров. Погрешность вычисленного спектра при этом не превышает 10%. Однако при указанных условиях уже нельзя пренебрегать влиянием ионосферы. Связь поля в рассматриваемом диапазоне частот с соответствующими характеристиками источника (токовым или дипольным моментом) становится значительно сложнее, чем рассмотренная ранее. В этих условиях для восстановления свойств излучателя необходимо использовать данные непосредственной регистрации токов молниевых разрядов в высотные сооружения или линии электропередачи.

Неплохие результаты дает также методика непосредственного восстановления дипольных моментов с помощью специальных

фильтров — антитрасс, настроенных на определенные расстояния [81]. Путем использования такой методики были получены выражения, аппроксимирующие дипольные моменты в виде функции

$$P(t) = P_0 [(a_2 t)^3 e^{-a_2 t} + b_2 (a_3 t)^3 e^{-a_3 t}]. \quad (1.11)$$

Средние значения параметров выражения (1.11), соответствующие типам 1 и 2 классификации [141], даны в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Значения параметров аппроксимации
дипольного момента

Тип	a_2 1/с	b_2	a_3 1/с
1	$3 \cdot 10^4$	1,8	$0,75 \cdot 10^4$
2	$4 \cdot 10^4$	2,5	$0,93 \cdot 10^4$

1.5. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АТМОСФЕРИКОВ НАД ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Как отмечалось ранее, немаловажное значение при разработке принципов однопунктовой дальнометрии имеет знание характеристик особенностей трансформации форм атмосфериков или их спектральных составляющих при распространении над земной поверхностью.

Поскольку молниевый разряд начиная с некоторых расстояний (25—30 км) ведет себя как электрический диполь, основные закономерности распространения атмосфериков рассматриваются в рамках дипольных представлений излучателя.

В соответствии с принятой в литературе методикой расчетов при исследовании характера изменения атмосфериков или их спектральных составляющих при распространении над земной поверхностью целесообразно трассу распространения ЭМИ разбить на ряд участков (зон), в пределах которых можно использовать наиболее экономичную (в отношении вычислений) и удобную модель.

Обычно разбивают трассы на три зоны: ближнюю, среднюю и дальнюю. Все особенности ЭМИ в интересующем нас интервале расстояний (до 300 км) могут быть объяснены в рамках двух моделей трассы, соответствующих ближней зоне (от 0 до 150 км) и начальному участку средней зоны (от 150 до 300 км). Следует заметить, что любое разбиение на зоны весьма условно. Более или менее четкие границы можно указать только для фиксированной частоты. Приведенные выше границы зон справедливы в среднем для частот диапазона 5—100 кГц, наиболее

существенного для использования в дальномерных и пеленгаторных устройствах.

Как показывают оценки, приведенные в работе [122], в ближней зоне применимы формулы для плоской модели Земли. Компоненты поля в этой зоне могут быть представлены либо в виде строгих формул, требующих проведения трудоемких численных расчетов [49, 68], либо в виде формул с использованием функции ослабления [57]. Последний путь является более предпочтительным, так как он проще и физически нагляднее первого и в большинстве случаев имеет вполне достаточную точность [63].

Выражения для основных с точки зрения пеленгации и дальнометрии компонент поля в ближней зоне имеют вид:

$$E_z(j\omega) = \frac{k^2}{2\pi\epsilon_0} \cos^2 \beta \left[W(sR) - \frac{1 - 2 \operatorname{tg}^2 \beta}{jkR} + \frac{1 - 2 \operatorname{tg}^2 \beta}{(jkR)^2} \right] \frac{e^{jkR}}{R} P(j\omega); \quad (1.12)$$

$$H_\varphi(j\omega) = - \frac{k^2 c}{2\pi} \cos \beta \left[W(sR) - \frac{1}{jkR} \right] \frac{e^{jkR}}{R} P(j\omega). \quad (1.13)$$

Здесь $W(sR)$ — функция ослабления; β — угол, под которым виден излучатель из точки наблюдения; c — скорость света в пустоте, σ — проводимость земли (См/м),

$$s = \frac{jk}{2(\epsilon'_m + 1)}; \quad \epsilon'_m = \epsilon_m + j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}; \quad \epsilon_m = \frac{\epsilon}{\epsilon_0};$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-6} \text{Ф/м}; \quad k = \frac{\omega}{c}. \quad (1.14)$$

Не раскрывая явного вида функции ослабления, отметим, что для расстояний, не превышающих 150 км, $|sR| \ll 1$ и для большинства встречающихся на практике почв $W(sR) \simeq 1$. Если к тому же излучатель и приемник расположены на поверхности земли, то выражения для E_z и H_φ компонент поля еще более упрощаются и принимают вид выражений (1.2).

На рис. 1.15 приведены графики, характеризующие изменение с расстоянием нормированной $E_{\text{нн}}$ (к значению на 10 км без учета статического и индукционного членов) амплитуды электрической компоненты земной волны для различных частот и проводимости земли, равной 1 См/м (кривые 1) и 10^{-4} См/м (кривые 2). Указанные значения проводимостей ограничивают область проводимостей для всех возможных однородных трасс от моря до сухого песка.

Как показано в работе [67], трассу с точки зрения частотных искажений сигнала можно уподобить двойному интегрирующему

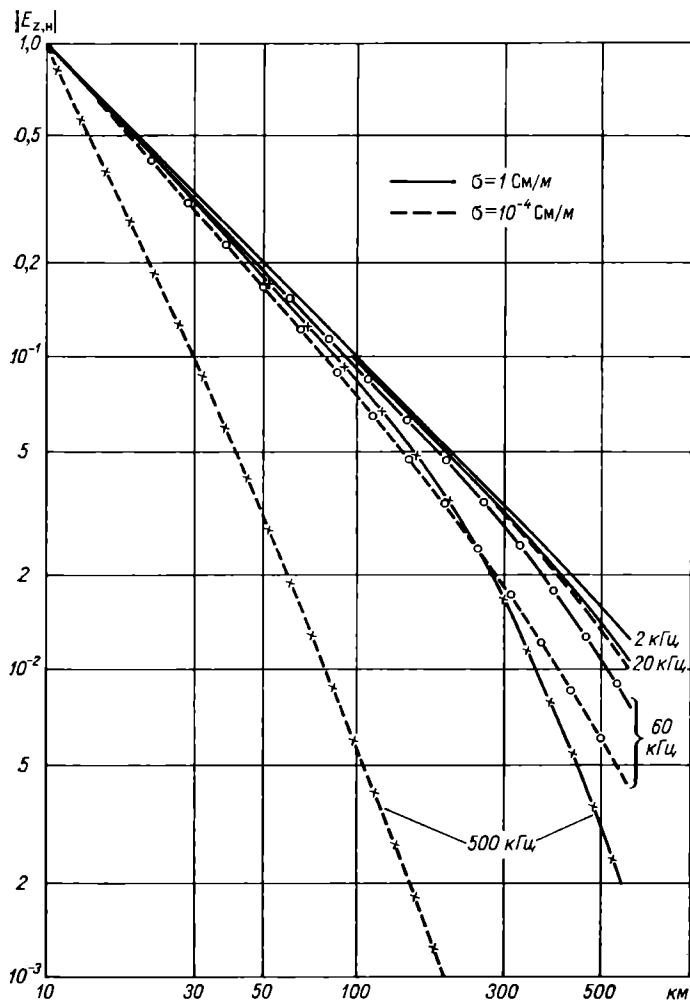


Рис. 1.15. Зависимость от расстояния нормированной (к полю на 10 км) амплитуды $E_{zн}$ компоненты (волновой член): для морской воды ($\sigma = 1 \text{ См/м}$) и для сухого песка ($\sigma = 10^{-4} \text{ См/м}$).

звену с частотой среза $f_{\text{ср}}$, зависящей от расстояния и равной

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi c}{\epsilon_0 R}}. \quad (1.15)$$

Для проводимости, меняющейся от 1 до 10^{-4} См/м, и расстояния $R = 200$ км частота среза, соответствующая величине $|\Psi| = 0,7$, принимает значения от 2,9 МГц до 29 кГц.

На частотах, не превышающих 10 кГц, влияние кривизны и проводимости земли на поле незначительно вплоть до расстояния 300—400 км. На более высоких частотах затухание поля с расстоянием происходит значительно сильнее. Изменение функции ослабления с расстоянием для частоты выше 20 кГц можно аппроксимировать зависимостью $e^{-\delta R}$. Причем при изменении частоты от 20 до 100 кГц δ ($1/100$ км) меняется от 0,058 до 0,14 для $\sigma = 10^{-2}$ См/м и от 0,06 до 0,39 для $\sigma = 10^{-4}$ См/м.

В средней зоне (свыше 150 км) не менее значительное влияние на характер поведения поля, чем кривизна и конечная проводимость земли, оказывает наличие ионосферы.

Моделью трассы, учитывающей все перечисленные выше факторы, служит сферический волновод, образованный поверхностью Земли и ионосферой.

Как известно, строгое решение задачи о распространении радиоволн в сферическом волноводе может быть представлено либо в виде суммы дифракционной волны, распространяющейся вдоль земной поверхности, и волн, отраженных от земли и ионосферы, которые также могут иметь частично дифракционный характер [28, 112], либо в виде суммы нормальных волн (мод), соответствующих различным типам колебаний в волноводном канале [4, 66, 146].

Рассмотрим поведение радиальной компоненты электрического поля E_r , являющейся в сферической системе координат, связанной с центром Земли, аналогом ранее рассмотренной (для плоской модели Земли) вертикальной компоненты E_z .

Используемые в дальнейшем обозначения ясны из рис. 1.16.

В первом случае выражение для компоненты поля E_r может быть представлено в виде

$$E_r(j\omega, R) = E_0(j\omega, R) W(j\omega, R). \quad (1.16)$$

Здесь

$$E_0(j\omega, R) = \frac{\mu_0 \omega^2 P(j\omega) e^{j\omega R}}{2\pi R}$$

— поле над бесконечно проводящей плоской Землей;

$$W(j\omega, R) = W_0(j\omega, R) + \sum_n W_n(j\omega, R), \quad (1.17)$$

где $W_0(j\omega)$ — функция ослабления земной волны, $W_n(j\omega)$ — функция ослабления «скачков».

При выполнении условий

$$\cos \varphi_n \gg \frac{1}{\sqrt{ka}}; \quad \cos \varphi_n \gg \frac{1}{kh} \quad (1.18)$$

(здесь a — радиус Земли, h — высота волновода Земля—ионосфера) выражения для функций ослабления W_n принимают наи-

более простой и наглядный вид

$$W_n = \sin^2 \varphi_n \sqrt{\frac{\cos \psi_n}{\cos \varphi_n}} [1 + R_z^2] R_z^{n-1} R_{\text{и}}^n. \quad (1.19)$$

Здесь φ_n и ψ_n — углы падения n -го луча на землю и ионосферу, R_z и $R_{\text{и}}$ — коэффициенты отражения от земли и ионосферы.

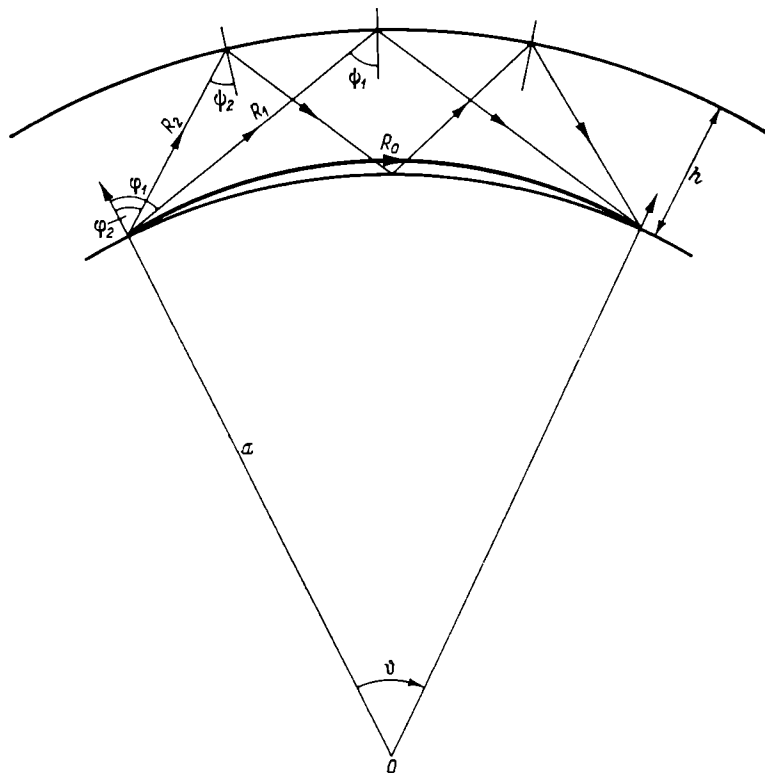


Рис. 1.16. Траектории земного луча и лучей, отраженных от ионосферы и земли.

Во втором случае компонента E_r имеет вид (излучатель и приемник находятся на поверхности Земли)

$$E_r = - \frac{P(j\omega)}{4a^2 \epsilon'_m} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\nu_n (\nu_n + 1)}{N_{\nu_n}^0} \frac{P_{\nu_n}(-\cos v)}{\sin \nu_n \pi}, \quad (1.20)$$

где $N_{\nu_n}^0$ — нормирующий множитель, зависящий от частоты, $P_{\nu_n}(x)$ — полиномы Лежандра, ν_n — собственные значения поперечного оператора.

При выполнении условий

$$|\nu_n \sin \vartheta| \gg 1 \text{ и } |\nu_n \sin(\pi - \vartheta)| \gg 1 \quad (1.21)$$

функцию $P_{\nu_n}(-\cos \vartheta)/\sin \nu_n \pi$ можно заменить асимптотическим представлением

$$\frac{P_{\nu_n}(-\cos \vartheta)}{\sin \nu_n \pi} \approx -\sqrt{\frac{2}{\pi \left(\nu_n + \frac{1}{2}\right) \sin \vartheta}} \exp \left\{ j \left[\left(\nu_n + \frac{1}{2}\right) \vartheta + \frac{\pi}{4} \right] \right\}.$$

Выражение для компоненты E_r можно представить в виде

$$E_r = \frac{\omega^2 \mu_0}{2h} \sqrt{\frac{2}{\pi k a}} \sqrt{\frac{\vartheta}{\sin \vartheta}} e^{j \frac{\pi}{4}} \sum_{n=0}^{\infty} \Lambda_n e^{j \left(\nu_n + \frac{1}{2}\right) \vartheta}, \quad (1.22)$$

где Λ_n — коэффициенты возбуждения моды n , которые для сверхнизкочастотного диапазона почти не зависят от частоты.

Особенно простая связь поля с расстоянием существует в тех случаях, когда можно ограничиться одним членом разложения (1.22).

Вещественные и мнимые части собственных значений ν_n , отыскание которых представляет сложную задачу при расчете СДВ полей, имеют простую связь с физическими характеристиками отдельных мод: их фазовыми скоростями v_n и затуханием α_n , а именно:

$$\nu_n = \frac{a \omega}{\text{Re} v_n}; \quad \alpha_n = \frac{\text{Im} \nu_n}{a}. \quad (1.23)$$

Обычно используют значения α_n в децибелах на 1 тыс. км,
 $\alpha_n \approx 1,363 \text{ Im } \nu_n \text{ дБ}/1000 \text{ км}.$

Оба рассмотренные выше метода решения при строгой постановке совершенно адекватны. Однако их эффективность при численных расчетах зависит от конкретных значений частот и расстояний. Как показано в работе [5], для частот выше 5 кГц и для расстояний до 1—2 тыс. км целесообразно использовать первый, «лучевой» метод решения. При расчетах по этому методу достаточно учитывать 2—3 скачка. Метод мод в этом диапазоне частот лучше применять начиная с 2—3 тыс. км.

На рис. 1.17 приведены кривые, характеризующие поведение модулей функций ослабления для земного луча и первого ионосферного отражения. Рисунок 1.18 иллюстрирует изменение амплитуды компоненты E_r суммарного поля с расстоянием. Как видно из приведенных рисунков, ионосфера оказывает существенное влияние на поведение поля начиная с 150—200 км. Интерференция земной волны и волн, отраженных от ионосферы (на расстояниях до 400—500 км необходимо учитывать лишь первое отражение), приводит к появлению осцилляций амплитуды, глубина которых растет по мере увеличения расстояния.

Начиная с частоты 50 кГц и выше амплитуда осцилляций в рассматриваемом диапазоне расстояний вновь уменьшается. Это связано с тем обстоятельством, что из-за увеличивающегося

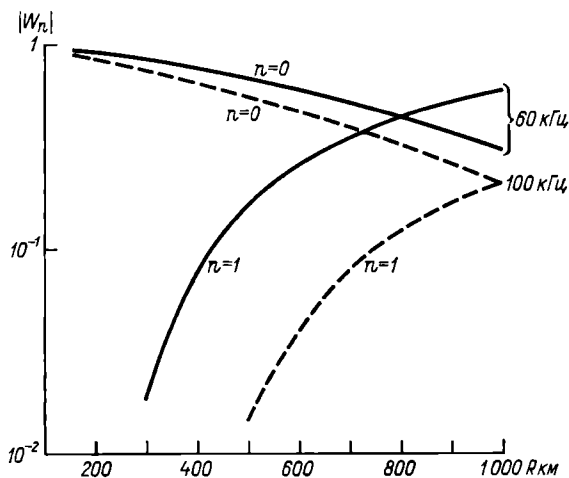


Рис. 1.17. Зависимость от расстояния модулей функции ослабления земного луча ($n=0$) и луча, однократно отраженного от ионосферы ($n=1$).

с ростом частоты просачивания через ионосферу падающей на нее электромагнитной волны доля отраженного сигнала уменьшается.

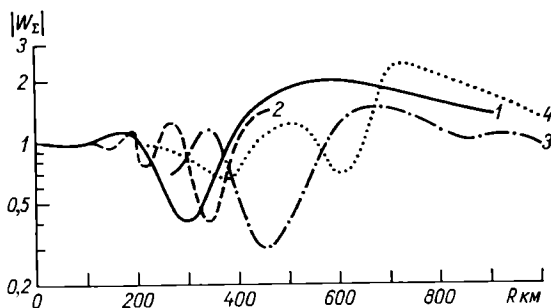


Рис. 1.18. Изменение с расстоянием суммарной функции ослабления.

1 — 10 кГц, 2 — 20 кГц, 3 — 30 кГц, 4 — 60 кГц.

В сверхнизкочастотном (СНЧ) диапазоне волн (ниже 3 кГц) начиная с расстояния 150—200 км более эффективен для расчетов поля метод разложения по нормальным волнам.

Количество мод, которое необходимо учитывать при расчетах, падает с увеличением расстояния. Так, на частоте 1 кГц при расстоянии до излучателя 25 км необходимо учитывать не менее 10 мод, с расстояния же 200 км основной вклад в поле вносит только одна нулевая мода. Характер изменения амплитуды поля с изменением расстояния зависит от конкретного значения частоты. Для частот, удовлетворяющих условию $kh \leq 1$, т. е. до 0,5—1 кГц, изменение амплитуды компоненты E_r характеризу-

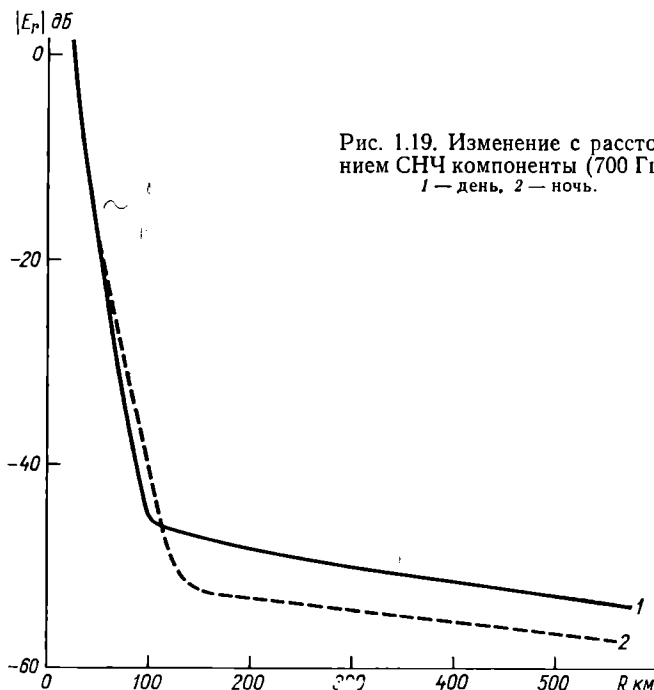


Рис. 1.19. Изменение с расстоянием СНЧ компоненты (700 Гц).
1 — день, 2 — ночь.

ется монотонной функцией с заметным перегибом в области расстояний 50—100 км (рис. 1.19) [146]. До указанной области амплитуда меняется обратно пропорционально кубу расстояния. После 100 км ее изменения близки к единице и даже меньше. Такой характер изменения амплитуды поля обусловлен тем, что мнимая часть собственного числа, определяющая затухание поля, становится малой. На частотах выше 1 кГц характер изменения амплитуды поля меняется. Начиная с 50—100 км изменение амплитуды принимает осциллирующий характер, тем более ярко выраженный, чем выше частота. Однако амплитуда осцилляций в интересующем нас диапазоне расстояний для частот выше 50—100 кГц вновь уменьшается за счет большего

просачивания волн через ионосферу, в результате чего амплитуда отраженного сигнала, интерферирующего с земной волной, уменьшается.

Указанный выше характер поведения амплитуды спектральных составляющих сигнала необходимо учитывать при выборе рабочих частот пеленгатора и амплитудного дальномера, описанных в гл. 2 и 3. В частности, для пеленгатора, работа которого не должна зависеть от удаленности излучателя, рабочие частоты необходимо выбирать в области 3—10 кГц. Данные частоты, с одной стороны, соответствуют максимуму спектральной плотности большинства главных разрядов и, с другой стороны, характеризуются небольшим затуханием в пределах интересующего нас диапазона расстояний (степень убывания амплитуды обратно пропорциональна первой степени расстояния) и относительно слабым влиянием вариаций параметров трассы распространения атмосфериков.

Для амплитудного дальномера желательно выбирать частоты выше 50 кГц, характеризуемые, с одной стороны, заметным затуханием и, с другой стороны, меньшими осцилляциями за счет ионосферных отражений.

Рассмотрим теперь основные особенности трансформации формы импульсов ЭМИ молниевых разрядов, регистрируемых в сравнительно широкой полосе частот (3—100 кГц).

Для того чтобы описать E_z и H_ϕ компоненты поля в ближней зоне до единиц процентов, можно полагать проводимость земли $\sigma = \infty$. Изменения формы импульса, регистрируемого в СДВ диапазоне (3—30 кГц), непосредственно в окрестности источника (до 30 км) наиболее значительны и определяются главным образом перераспределением влияния на нее отдельных членов выражения (1.2). В этой зоне наблюдается и наибольшее различие между компонентами E_z и H_ϕ . Начиная с 30—35 км преобладающую роль в их изменении играют волновой и индукционный члены. Изменения формы импульса в целом вплоть до 100 км незначительны и определяются главным образом вариациями проводимости земли. Конкретные расчеты форм импульсов, произведенные для атмосфериков типов 1 и 2 (рассмотренной выше классификации) с использованием выражений для реакции трассы на воздействие «стандартного излучателя» — безразмерного тока типа единичного толчка [29], показывают, что с увеличением расстояния до излучателя сигнал как бы расплывается, причем тем значительнее, чем более высокочастотен сигнал и меньше проводимость земли. Так, в интервале расстояний 100—500 км длительность первой полуволны монотонно возрастает в среднем на 2 и 3,3% соответственно для σ , равного 10^{-2} и 10^{-3} См/м для сигналов типа 1 и на 6 и 8% для сигналов типа 2 на каждые 100 км приращения дальности. Еще более значительны изменения длительности фронта. Закон изменения амплитуды первой (максимальной) полуволны может быть

аппроксимирован функцией $1/R^k$, причем k лежит в пределах 1,1—1,25 для сигналов типа 1 и 1,15—1,4 для сигналов типа 2.

Влияние ионосферы на поведение первой полуволны практически не проявляется вплоть до 400—500 км днем и до 800—900 км ночью. Однако на характер изменения формы сигнала в целом на расстояниях свыше 100 км ионосфера влияет значительно сильнее, чем любой другой фактор. Детальный анализ изменения формы атмосферика с изменением расстояния начиная со 100 км произведен в работе [32].

На рис. 1.20 воспроизведены земной, однократно отраженный от ионосферы, а также суммарный сигналы для дневного состояния ионосферы [32]. Оказывается, что до 500 км суммарный, или полный, сигнал формируется земным и однократно отраженным от ионосферы сигналами. При этом отраженный сигнал не является подобием земного, а претерпевает значительную трансформацию.

На расстоянии 100 км первая полуволна отраженного сигнала, противоположная по знаку первой полуволне земного луча, настолько мала, что заметить ее на фоне «хвоста» земного сигнала практически невозможно. Поэтому может показаться, что отраженный сигнал имеет ту же полярность, что и земной. При увеличении расстояния относительная амплитуда первой полуволны отраженного сигнала увеличивается. Происходит как бы изменение полярности отраженного сигнала относительно земного. Кажущееся изменение полярности отражения наблюдается независимо от типа атмосферика и профиля электронной концентрации ионосферы. Для ночного состояния ионосферы это изменение также происходит с увеличением расстояния.

Амплитуда отраженного от ионосферы сигнала меньше амплитуды земного вплоть до 400—450 км. С двукратно отраженным от ионосферы сигналом можно на этих расстояниях практически не считаться.

Из параметров, характеризующих ионосферу, наиболее заметное влияние на форму полного сигнала оказывает эффективная высота ионосферы. Так, в ночных условиях, когда эффективная высота составляет 85—90 км (днем 64—65 км), земной и ионосферный сигналы четко разделяются на расстояниях от 100 до 600—700 км практически для всех типов атмосфериков. В то же время в дневных условиях в этом диапазоне расстояний наблюдается заметное разделение лишь сравнительно коротких сигналов типа 2. Изменение формы атмосфериков нормального типа носит сложный характер: амплитуда и длительность отдельных полуволн (кроме первой) меняются немонотонно, возможно появление «ложных» полуволн [32]. Такой характер изменения формы атмосферика затрудняет реализацию методов, основанных на анализе положения и величины ионосферных отражений.

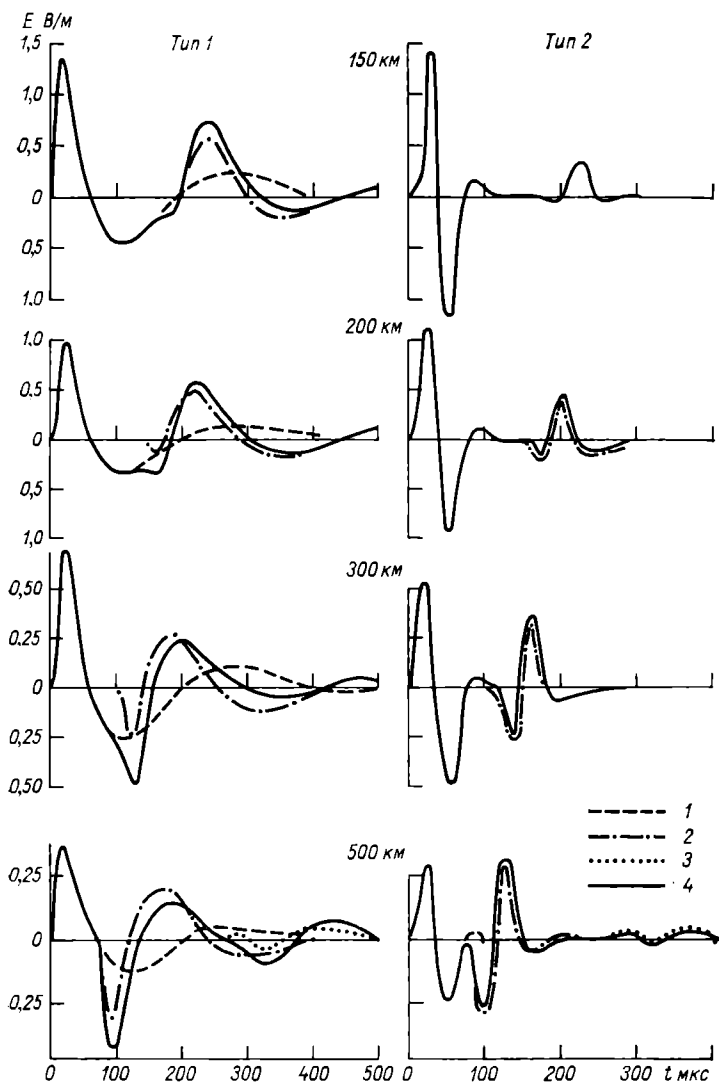


Рис. 1.20. Изменение с расстоянием форм дневных атмосферников типа 1 и 2.

1 — земной луч, 2 — однократно отраженный луч, 3 — двукратно отраженный луч, 4 — суммарный импульс.

1.6. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ОДНОПУНКТОВЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ

Выяснив характерные особенности изменения ЭМИ молниевом разряда при его распространении над земной поверхностью, дадим краткий обзор конкретных методов дальнометрии, основанных на применении этих особенностей.

В основе построения большинства дальномеров лежит зависимость от дальности тех или иных параметров (спектральных или временных) атмосфериков.

Одним из такого рода простейших параметров, который получил широкое использование в технике однопунктовой дальнометрии, является амплитуда максимальной полуволны атмосферика или амплитудное значение отклика узкополосного приемника на его воздействие.

Возникнув почти в начале века, амплитудный метод в течение последующих десятилетий неоднократно привлекал внимание исследователей. Различные модификации устройств для реализации этого метода, начиная с грозорегистраторов и ограничителей дальности [10, 33, 95] и кончая дальномерными устройствами, работающими в различных частотных диапазонах [11, 56, 60, 116, 131] нашли наиболее широкое практическое применение.

В основе построения различных модификаций амплитудного метода дальнометрии лежит знание, во-первых, величины поля в источнике или на некотором фиксированном расстоянии от него и, во-вторых, закона изменения амплитуды поля с изменением расстояния.

Как отмечалось ранее, распределение амплитуд атмосфериков, регистрируемых на некотором удалении от грозового очага, независимо от частоты настройки и полосы пропускания приемного устройства подчиняется нормально-логарифмическому закону распределения.

Максимальной полуволной атмосферика, регистрируемого в широкой полосе частот, для расстояний до 400 км является первая полуволна, не затронутая еще влиянием ионосферных отражений. Закон изменения ее амплитуды можно аппроксимировать монотонной функцией $1/R^k$, причем степень k зависит от типа атмосферика и от проводимости подстилающей поверхности (раздел 1.5).

Закон убывания спектральных составляющих сигнала зависит от расстояния и конкретного значения частоты.

Поскольку стандартное отклонение σ , характеризующее разброс величины сигнала относительно среднего значения, практически не зависит от частоты и, по данным большинства исследований, составляет 5—9 дБ, шкала разбиения дальностей на градации зависит от степени убывания амплитуды с расстоянием. С этой точки зрения представляется целесообразным выбирать

или сверхнизкие частоты (30—300 Гц), изменение амплитуды которых в ближней зоне обратно пропорционально кубу расстояния, или высокие частоты (свыше 0,5—1,0 МГц), когда убывание амплитуды носит экспоненциальный характер. Однако в первом случае рабочий диапазон расстояний ограничивается 50—100 км (из-за влияния на точность измерения амплитуды сетевых наводок и изменения характера убывания амплитуды сигнала, см. рис. 1.19). На высоких же частотах очень большое влияние на поведение амплитуды оказывают возможные вариации проводимости земли. Так, если на частоте 500 кГц над морем нормированная (к 10 км) амплитуда составляет на 100 км 0,09, то над песчаными трассами — всего 0,005, т. е. уменьшается в 18 раз. На больших расстояниях возможные изменения амплитуды поля вследствие вариаций проводимости земли еще более значительны.

Более целесообразно использовать для целей амплитудной дальнометрии частоты 50—100 кГц. С одной стороны, для расстояний (до 300 км), интересующих нас на этих частотах, еще не проявляются заметным образом осцилляции амплитуды за счет ионосферных отражений. С другой стороны, затухание поля на этих частотах в 1,5—2 раза больше, чем, например, на частотах 5—7 кГц, соответствующих максимуму спектральной плотности атмосфериков нормального типа. Как будет показано в гл. 3, амплитудный дальномер позволяет определять расстояния до грозových очагов в радиусе до 300 км.

Следует отметить, что попытка использования амплитудного метода для определения местоположения более удаленных грозových очагов [102] в силу наличия глубоких осцилляций амплитуды (с расстоянием), а также ряда других причин, отмеченных в работе [36], оказалась неудачной.

Большей точностью в ближней зоне по сравнению с амплитудным характеризуются методы, основанные на использовании различной зависимости от дальности E_z и H_ϕ составляющих поля (E — H -метод), описываемых в ближней зоне выражениями (1.2). Основное преимущество метода состоит в исключении явной зависимости результата оценки дальности от вариаций свойств источника. Возможна реализация нескольких модификаций E — H -метода: амплитудная, фазовая и импульсная. Смысл и границы применимости амплитудной и фазовой модификаций ясны из рис. 1.21, где построены функции, характеризующие изменение с расстоянием отношения модулей $V = |H_\phi| / |E_z|$ и разностей фаз $\Delta\Phi_{H, E} = -\arctg \frac{1}{(kR)^3}$ горизонтальной магнитной H_ϕ и вертикальной электрической E_z составляющих поля. Как видно из рисунков, расстояние, для измерения которого используется метод, увеличивается с понижением рабочей частоты. Импульсная модификация E — H -метода, основанная

на соответствующей обработке электрического и магнитного сигналов, более подробно описана в гл. 3.

Область расстояний, в которой применим $E-H$ -метод, ограничивается 100—120 км. На больших расстояниях различие ме-

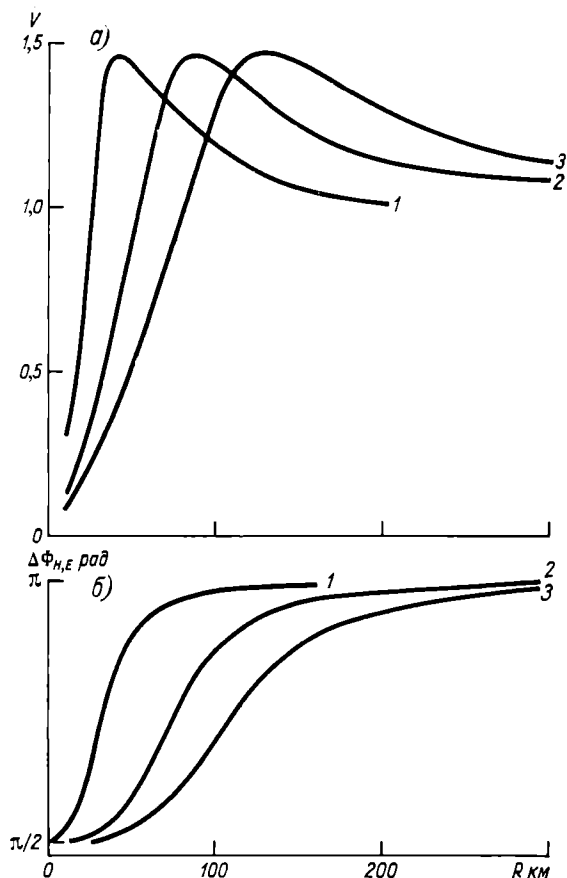


Рис. 1.21. Изменение с расстоянием отношения модулей (а) и разностей фаз (б) горизонтальной магнитной H_ϕ и вертикальной электрической E_z составляющих поля диполя.

1) $f=1500$ Гц, 2) $f=600$ Гц, 3) $f=400$ Гц.

жду E_z и H_ϕ компонентами настолько нивелируется, что выделить разностный сигнал на фоне внешних (атмосферных) и внутренних (аппаратурных) шумов оказывается практически невозможно.

Рассмотрим другие известные методы дальнометрии гроз. В соответствии с приведенными ранее оценками наиболее значительному изменению с расстоянием в пределах первой полу-

волны сигнала, кроме амплитуды, подвержена крутизна ее фронта. Однако, как показывают результаты экспериментальных исследований [96], изменение крутизны фронта, обусловленное изменением расстояния в диапазоне 5—300 км, полностью перекрывается вариациями источника. В силу этого измерения расстояния до излучателя по данному признаку оказываются невозможными.

Одним из наиболее ранних был метод дальнометрии, в котором используется «скачковый» механизм распространения радиоволн в волноводе Земля—ионосфера [134]. Однако алгоритм дальнометрии строился в рамках элементарной геометрической картины распространения. Уже результаты первых экспериментальных проверок метода [109] показали, что возможность интерпретации форм атмосферика в виде отдельных скачков исчерпывается очень небольшим процентом от общего количества регистрируемых сигналов: до 3% днем и до 5% ночью. Причем ошибки измерения расстояния до 300 км могут составлять 20—30%.

По мере развития теории распространения СДВ сигналов, а также совершенствования методики экспериментальных исследований появились методы дальнометрии, учитывающие более тонкие особенности трансформации параметров атмосфериков с расстоянием. Среди них прежде всего можно отметить методы, основанные на использовании частотной селективности волновода Земля—ионосфера. Предложен целый ряд принципов определения расстояния, учитывающих особенности изменения амплитудного [39, 92] или фазового [35, 132, 144] спектра атмосфериков. Что касается фазовых методов, то они в основном используются для больших расстояний (свыше 1 тыс. км). Даже лучшая их модификация [35] характеризуется абсолютной погрешностью определения расстояния до излучателя 200—300 км. При этом погрешность почти не зависит от расстояния. Очевидно, что в интересующем нас интервале расстояний эта погрешность слишком велика.

Амплитудно-спектральный дисперсионный метод [39, 92] первоначально использовался для определения расстояния свыше 1 тыс. км. Однако в последние годы путем соответствующего подбора рабочих частот в диапазоне СНЧ область использования метода расширена до 100—200 км [24]. Амплитудно-спектральный метод основан на различном затухании с расстоянием амплитуд спектральных составляющих атмосферика, обусловленном особенностями распространения волн в волноводном канале Земля—ионосфера.

На рис. 1.22 приведена осредненная кривая затухания нулевой моды α в зависимости от частоты f для дневного состояния ионосферы. Как видно из этого рисунка, наибольшая разница между значениями затухания на соседних частотах отмечается на скатах кривой в областях ниже 2, 3—10 и свыше 30 кГц.

Первоначально использовался диапазон от 3 до 10 кГц [39, 92]. Однако в этом диапазоне частот одномодовый характер изменения поля начинается с расстояний свыше 1000 км. В работе [24] используются частоты ниже 2 кГц, что позволяет расширить возможности метода в область меньших расстояний.

Основные погрешности амплитудно-спектрального метода связаны с модами первого и более высоких порядков, а также с вариациями отношения спектральных составляющих в самом источнике излучения. Как показывают теоретические оценки, в диапазоне частот 1—3 кГц на расстояниях свыше 100 км приходится в основном учитывать две первые моды. При этом не-

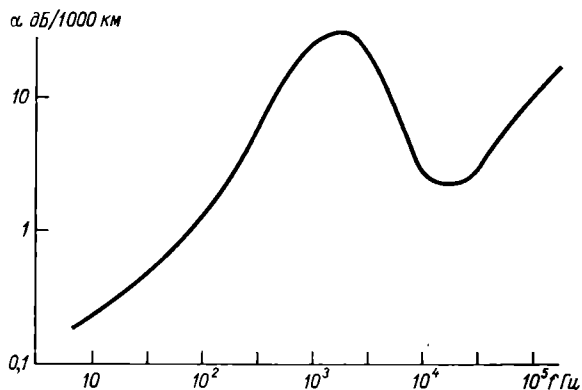


Рис. 1.22. Кривая зависимости затухания нулевой моды от частоты (день).

обходимо выбирать более низкие частоты. Так, если в качестве рабочих частот выбирать пару 1 и 3 кГц, то возможно появление неоднозначности в оценке расстояния, при которой погрешность оценки дальности на малых расстояниях (100—200 км) может достигнуть 100%. При выборе рабочих частот ниже 2 кГц погрешность за счет влияния мод более высоких порядков существенно уменьшается. Например, на частотах 1 и 2 кГц погрешность оценки расстояния в области 100—200 км уже не превышает 20%. Однако существенную роль и на этой паре частот играют вариации отношения спектральных составляющих в источнике. Как показывают данные экспериментальных исследований, проведенных нами с помощью спектральных анализаторов С4-44 на частотах 1 и 2 кГц, эти вариации приводят к погрешностям оценки расстояний, достигающим 20% на 200 км. Таким образом, суммарное влияние обоих источников погрешностей приводит к неточности определения расстояния в области 100—200 км, достигающей 25—30%.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НА ИСТОЧНИК МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА

Радиопеленгатор — основное аппаратное средство, используемое для определения местоположения гроз. Основная трудность развития грозопеленгации заключалась в отсутствии индикатора, способного регистрировать и хотя бы кратковременно «запоминать» пеленг на источник грозового разряда. Это обстоятельство, по-видимому, определило то, что первоначально для регистрации гроз использовались узкосекторные пеленгаторы [40], в которых регистрация принимаемых из определенного сектора импульсов производилась самописцем, счетчиком или другим электромеханическим прибором. С появлением электронно-лучевого осциллоскопа, который был использован Ватсон-Ваттом в качестве индикатора в пеленгаторе молниевых вспышек, грозопеленгаторы получили широкое развитие. Возможность мгновенной регистрации пеленга атмосферика, пришедшего с любого направления, позволила создать пеленгационные сети, в которых местоположение молниевых разряда определялось по совокупности пеленгов, одновременно зарегистрированных несколькими разнесенными пеленгаторными станциями. Пеленгационные сети использовались для службы погоды, климатологических исследований, изучения вопросов распространения сверхдлинных волн и других проблем, связанных с изучением атмосферного электричества. Все эти вопросы весьма обстоятельно изложены в книге В. Е. Кашировского [40].

Известные грозопеленгаторы представляют собой моноимпульсные двухканальные пеленгаторы с рамочными антеннами, в большинстве случаев настроенными на низкую частоту в пределах максимума энергетического спектра грозового разряда (обратного удара) [40, 50, 56]. Антенны ориентированы в направ-

лениях северо-юг и запад-восток и соединены с идентичными каналами усиления.

Под воздействием импульсного сигнала излучения молнии в рамочных антеннах получают затухающие колебания, пропорциональные по амплитуде синусу и косинусу угла прихода сигнала (соответственно в каналах З—В и С—Ю), которые после усиления подаются на отклоняющие системы электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) индикатора. Под воздействием этих напряжений на ЭЛТ получается узкий эллипс, ориентированный по диаметру экрана. В некоторых пеленгаторах для исключения двусмысленности показаний применяется ненаправленная электрическая антенна. В случае использования настроенных рамочных антенн в цепь ненаправленной антенны включается резонансный контур, настроенный на ту же частоту. После усиления сигнал ненаправленной антенны подается на управляющий электрод ЭЛТ. Таким образом гасится половина эллипса и на экране остается радиальная световая дорожка, идущая от центра экрана.

Известны предложения [40] о создании грозопеленгатора фазометрического типа, в котором квазисинусоидальные сигналы от рамочных антенн сдвигаются друг относительно друга по фазе на 90° и затем суммируются. Пеленг на источник сигнала определяется путем измерения разности фаз суммарного сигнала и опорного напряжения, в качестве которого используется сигнал в канале ненаправленной антенны.

2.1. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРОВ

Развитие воздушного транспорта выдвинуло настоятельное требование оперативного обнаружения гроз и определения их местоположения. Во введении указывались и другие отрасли народного хозяйства, в которых требуется оперативная информация о грозах. Эта информация должна поступать непрерывно для использования ее в оперативной работе диспетчерской и метеорологической служб.

Основные требования к радиопеленгаторам гроз, предназначенным для совместного использования с дальномерными устройствами с целью оперативного обнаружения и определения местоположения грозовых очагов, следующие:

— пеленгаторы должны быть моноимпульсными, т. е. практически безынерционными;

— пеленгационная информация должна иметь форму, наиболее пригодную для совмещения ее с дальномерной информацией;

— пеленгование должно быть однозначным, исключается наличие ошибок за счет перегрузки приемных трактов;

— чувствительность грозопеленгатора должна быть не меньше чувствительности дальномерного устройства, поскольку

анализ распределения амплитуд, спектра импульсов и других характеристик ЭМИ, принятого из грозового очага, производится дальномерным устройством; иначе характеристики пеленгационного канала могут внести искажения в этот анализ;

— информация грозопеленгаторов (или грозопеленгаторов-дальномеров) должна индексироваться в максимально удобном для быстрого восприятия виде и «запоминаться» на достаточный промежуток времени с тем, чтобы между сеансами оперативных наблюдений (через $1/2$ — 1 ч) оператору не требовалось производить какие-либо операции.

Из приведенных требований следует, что пеленгаторы должны быть автоматическими, трехканальными [50], со специаль-

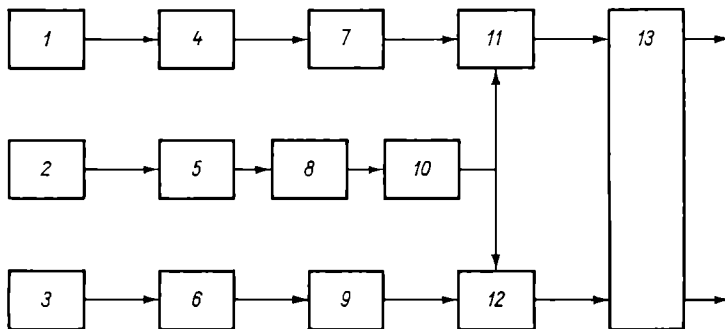


Рис. 2.1. Структурная схема амплитудного пеленгатора.

1, 3 — направленные рамочные антенны, 2 — ненаправленная антенна, 4, 5, 6 — фильтры, 7, 9 — усилительные тракты, 8 — фазовращатель, 10 — усилитель-ограничитель, 11, 12 — синхронные детекторы, 13 — схема формирования сигнала.

ной обработкой и преобразованием сигналов, со схемами мгновенной автоматической регулировки усиления (МАРУ) или другими устройствами, предотвращающими динамические ошибки. Последняя задача является следствием необходимости обработки сигнала в пеленгационных трактах.

Остановимся на структурных схемах амплитудного и фазового пеленгаторов, обеспечивающих однонаправленное пеленгование и преобразование сигналов [10, 19, 50].

На рис. 2.1 приведена структурная схема амплитудного пеленгатора. Направленные антенны 1 и 3 ориентированы в направлениях запад—восток и север—юг и имеют соответственно диаграммы направленности в азимутальной плоскости $\sin \varphi$ и $\cos \varphi$, где φ — угол относительно направления на север. Узкополосные фильтры 4 и 6 настроены на рабочую частоту пеленгатора f_p . В настроенных рамочных антеннах оба элемента антенна и фильтр — совмещены. Под воздействием атмосферика на выходе антенн и узкополосных фильтров появляются сигналы

в виде затухающих колебаний, которые могут быть представлены следующими выражениями:

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_1(t) \sin \varphi \sin \omega t; \\ U_2 &= Z_2(t) \cos \varphi \sin \omega t, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $\omega = 2\pi f_p$, $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$ — огибающие процессов, φ — направление на источник ЭМИ.

При этом предполагается, что процесс достаточно узкополосен, в результате чего огибающая процесса является медленно меняющейся функцией по сравнению с ее заполнением.

После прохождения усилительных трактов 7 и 9 на входы синхронных детекторов 11 и 12 поступают сигналы:

$$\begin{aligned} U_{1\text{вых}} &= \dot{K}_1 Z_1(t) \sin \varphi \sin \omega t; \\ U_{2\text{вых}} &= \dot{K}_2 Z_2(t) \cos \varphi \sin \omega t, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $\dot{K}_{1,2} = K_{1,2} e^{j\Phi_{1,2}}$ — комплексные коэффициенты усиления приемных трактов.

Ненаправленная антенна 2 используется как источник опорного напряжения. После ненаправленной антенны включен фильтр 5, настроенный также на f_p .

Поскольку фаза сигналов в направленных (рамочных) и ненаправленной антеннах разнятся на 90° [50], то в канал последней вводится фазовращатель 8, устраняющий это расхождение. На выходе усилителя-ограничителя 10 получается сигнал вида

$$U_3 = A(t) \sin(\omega t + \Phi_3), \quad (2.3)$$

где $A(t)$ — огибающая пачки синусоидальных колебаний, Φ_3 — изменение фазы в приемном тракте третьей антенны.

На выходе балансных синхронных детекторов после н. ч. фильтров формируются сигналы:

$$\begin{aligned} U_{1\pm} &= K_1 Z_1(t) \sin \varphi \cos(\Phi_3 - \Phi_1); \\ U_{2\pm} &= K_2 Z_2(t) \cos \varphi \cos(\Phi_3 - \Phi_2), \end{aligned} \quad (2.4)$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты усиления 1-го и 2-го приемных трактов с учетом изменения уровня сигналов при детектировании.

На выходе синхронных детекторов возникают напряжения, форма которых имеет вид колокола — искаженная огибающая сигналов, а амплитуда и полярность определяются соответственно значениями $\sin \varphi$ и $\cos \varphi$. Отношение этих сигналов позволяет определить пеленг под углом

$$\varphi + \Delta\varphi = \arctg \frac{U_{1\pm}}{U_{2\pm}} = \arctg \frac{K_1 Z_1(t) \cos(\Phi_3 - \Phi_1) \sin \varphi}{K_2 Z_2(t) \cos(\Phi_3 - \Phi_2) \cos \varphi}. \quad (2.5)$$

Для устранения так называемых квадрантных ошибок в амплитудном пеленгаторе ($\Delta\varphi=0$) требуется обеспечить выполнение условий $K_1=K_2$; $Z_1(t)=Z_2(t)$ и $\Phi_1=\Phi_2$.

Схема формирования 13 служит для преобразования огибающей, например, в прямоугольные импульсы длительностью в несколько десятков микросекунд [40, 50].

На рис. 2.2 приведена структурная схема фазового пеленгатора. Принятые настроенными рамочными антеннами 1, 2 сигналы (2.1), прошедшие через фильтры 4 и 5, сдвигаются друг

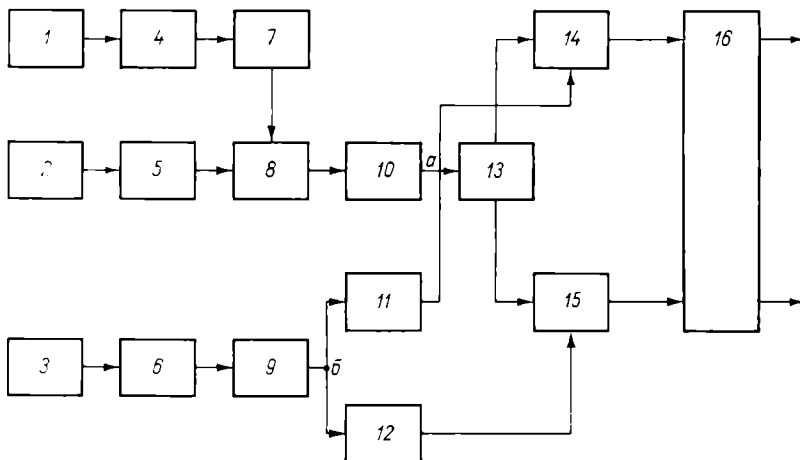


Рис. 2.2. Структурная схема фазового пеленгатора.

1, 2 — направленные рамочные антенны, 3 — ненаправленная антенна, 4, 5, 6 — фильтры, 7 — фазовращатель, 8 — сумматор, 9, 10 — усилители-ограничители, 11, 12 — фазовращатели, 13 — фильтр, 14, 15 — фазовые детекторы, 16 — схема формирования сигнала.

относительно друга в устройстве 7 на 90° (на частоте настройки антенн) и суммируются в устройстве 8. При одинаковых огибающих $Z_1(t)=Z_2(t)$ и точном выполнении фазовых соотношений получается суммарный сигнал

$$U_{\Sigma} = Z(t) \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.6)$$

После усилителя-ограничителя — формирователя пачки 10 и фильтра 13, получим пачку синусоидальных колебаний с прямоугольной огибающей

$$U_{\Sigma_{\text{вых}}} = A_{\Sigma}(t) \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.7)$$

где $A_{\Sigma}(t)$ — огибающая пачки синусоидальных колебаний.

Можно показать, что при не идеальных условиях, когда $Z_1(t) \neq Z_2(t)$ и $\Phi_1 \neq \Phi_2$, фаза суммарного сигнала будет

$$\Phi_{\Sigma} = \omega t + \arctg \frac{Z_1(t) \sin \varphi \cos \Phi_1 + Z_2(t) \cos \varphi \sin \Phi_2}{Z_1(t) \sin \varphi \sin \Phi_1 + Z_2(t) \cos \varphi \cos \Phi_2}. \quad (2.8)$$

Ошибка определится выражением

$$\Delta\varphi = \Phi_2 - \omega t - \varphi. \quad (2.9)$$

В этом случае выражение (2.7) примет вид

$$U_{\text{вых}} = A_2(t) \sin(\omega t + \varphi + \Delta\varphi). \quad (2.10)$$

С выхода фильтра напряжение (2.10) поступает на два фазовых детектора 14, 15, на которые соответственно подаются квадратурные (сдвинутые друг относительно друга по фазе на 90°) опорные напряжения, сформированные из напряжения в канале ненаправленной антенны (2.3) в устройствах (3, 6, 9, 11, 12). На выходах фазовых детекторов возникнут напряжения:

$$\begin{aligned} U_{1=} &= K_1 A(t) \sin(\varphi + \Delta\varphi + \Delta\Phi_{1,3}); \\ U_{2=} &= K_2 A(t) \cos(\varphi + \Delta\varphi + \Delta\Phi_{2,3}), \end{aligned} \quad (2.11)$$

где $K_{1,2}$ — коэффициент передачи 1-го и 2-го каналов, $\Delta\Phi_{1,2}$ и $\Delta\Phi_{2,3}$ — разность фаз между сигналами в ненаправленной антенне и соответственно в рамочных антеннах 1 и 2 (рис. 2.2).

Отношение сигналов (2.11) определяет значение пеленга в фазовом пеленгаторе

$$\varphi + \Delta\varphi_\phi = \arctg \frac{U_{1=}}{U_{2=}} = \arctg \frac{K_1 \sin(\varphi + \Delta\varphi + \Delta\Phi_{1,3})}{K_2 \cos(\varphi + \Delta\varphi + \Delta\Phi_{2,3})}. \quad (2.12)$$

Сопоставим выражения для ошибок амплитудного (2.5) и фазового пеленгаторов (2.8) и (2.12).

При создании аппаратуры сравнительно легко можно обеспечить равенство огибающих процессов в направленных антеннах, $Z_1 = Z_2$. Значительно труднее выполнить условие равенства фаз в каналах $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3$. При этом следует иметь в виду, что, кроме инструментальных погрешностей, на разности фаз между сигналами в направленных и ненаправленных антеннах сказываются условия распространения.

Если обозначить разность фаз между сигналами в каналах направленных антенн через $\Delta\Phi_{1,2}$, то максимальная ошибка в амплитудном пеленгаторе будет

$$|\Delta\varphi_a|_{\text{макс}} = \arctg \frac{\cos \Delta\Phi_{1,3}}{\cos(\Delta\Phi_{1,3} + \Delta\Phi_{1,2})} - 45^\circ. \quad (2.13)$$

В табл. 2.1 дан пример расчета максимальных ошибок.

Как следует из приведенного примера расчета, фазовые расхождения в каналах амплитудного пеленгатора могут вызвать незначительные ошибки.

В фазовом пеленгаторе при равенстве огибающих процессов в направленных антеннах даже небольшие фазовые расхождения в каналах создают сдвиг фазы суммарного напряжения и, следовательно, ошибку, примерно равную разности фаз

$$\Delta\varphi_\phi \simeq \Phi_1 - \Phi_2.$$

Таблица 2.1

Максимальное значение ошибки в амплитудном пеленгаторе

$\Delta\Phi_{1,2}^{\circ}$	$\Delta\Phi_{1,3}^{\circ}$		
	0	10	20
5	5'	40'	50'
10	25'	1° 20'	2° 10'

При этом предполагается, что некоторое среднее значение фазы суммарного сигнала может быть компенсировано или учтено в индикаторном устройстве. Остается фазовая ошибка, обусловленная расхождением фаз вследствие изменения параметров схемы под влиянием температуры и других дестабилизирующих факторов.

Остановимся на ошибках, связанных с изменениями фаз электрического и магнитного полей с расстоянием. На близких расстояниях до источника ЭМИ фазы электрического и магнитного полей расходятся. Соответственно будет зависеть от расстояния разность фаз в направленных (магнитных) и ненаправленной (электрической) антеннах.

Обратившись к формулам (1.2) для фаз электрического и магнитного полей, можем написать:

$$\Phi_E = \arctg \frac{c}{R\omega} \cdot \frac{1}{\frac{c^2}{R^2\omega^2} - 1};$$

$$\Phi_H = -\arctg \frac{c}{R\omega}. \quad (2.14)$$

Соответственно ошибка в определении пеленга в фазовом пеленгаторе, вызванная расхождением фаз сигналов в ненаправленной и направленной антеннах, будет

$$\Delta\Phi_{1(2),3} = \Phi_E - \Phi_H = \arctg \left[-\left(\frac{c}{R\omega}\right)^3 \right]. \quad (2.15)$$

В качестве примера ниже приведены значения ошибки фазового пеленгатора, определенные по формуле (2.15) для частоты 7000 Гц:

Расстояние до источника, км	10	15	20	30	50
Ошибка	17° 20'	6°	2° 10'	0° 50'	0° 10'

Примечание. При необходимости более точного учета фаз можно воспользоваться выражениями (1.12).

Как видим, фазовые пеленгаторы дают значительно большие ошибки, чем амплитудные, особенно на близких расстояниях. Следует отметить, что в непосредственной близости от источника разность фаз электрического и магнитного полей достигает 90° и пеленгование трехканальным амплитудным пеленгатором становится невозможным, так как теряется свойство однозначности и ошибка достигает 180° . В то же время фазовые пеленгаторы обладают и определенными преимуществами. Изменение уровня сигнала в весьма широких пределах не вызывает ошибок в фазовом пеленгаторе. В амплитудном пеленгаторе создаются ошибки, обусловленные перегрузкой усилительных трактов и имеющие октантальный характер. Для предотвращения этих ошибок приходится вводить в него специальные схемы МАРУ (см. гл. 4).

У В. Е. Кашпровского [40] упоминается о возможности сочетания фазометрической и амплитудной схем с целью удобства передачи данных. Подобная схема построения может быть использована для устранения динамических ошибок. Сначала сигналы от направленных антенн складываются в квадратуре, получается суммарное напряжение, величина которого равна модулю. Затем сигналы от направленных антенн делятся на модуль. В результате на входе усилительных каналов амплитудного пеленгатора получаются сигналы, уровень которых не зависит от величины приходящего сигнала. Аналитически эта операция может быть представлена в следующем виде. Пусть э. д. с. в рамочных антеннах с учетом сдвига их фаз друг относительно друга на 90° равны:

$$\begin{aligned} e_1 &= k_p E \cos \varphi \cos \omega t; \\ e_2 &= k_p E \sin \varphi \sin \omega t. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Произведем раздельно сложение и вычитание этих сигналов с последующим их ограничением по амплитуде величиной A . В результате получаются два напряжения:

$$\begin{aligned} U_+ &= A \cos(\omega t - \varphi); \\ U_- &= A \cos(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (2.17)$$

Повторное суммирование и вычитание дают напряжения:

$$\begin{aligned} U_1 &= 2A \cos \varphi \cos \omega t; \\ U_2 &= 2A \sin \varphi \sin \omega t, \end{aligned} \quad (2.18)$$

которые не зависят от уровня приходящего сигнала E и дальше могут быть использованы в схеме амплитудного пеленгатора.

Однако все описанные выше операции с точки зрения инструментальных ошибок так же критичны к фазам сигналов, как и в рассмотренном случае фазового пеленгатора (2.10), но влияние разности фаз электрического и магнитного полей (в ближней зоне) на такой пеленгатор будет таким же, как и на амплитудный пеленгатор.

Фазометрический принцип определения пеленга позволяет значительно проще решать целый ряд задач, связанных с созданием аппаратуры. Например, легко осуществить индикацию пеленга в виде линейной развертки и соответственно данные пеленгатора-дальномера представить в декартовой системе координат [70].

В этом варианте фазового пеленгатора суммарный сигнал направленных антенн (выход *a* на рис. 2.2) и сигнал ненаправленной антенны (выход *b* на рис. 2.2) подаются на фиксаторы нулевых переходов (ФНП), вырабатывающие короткие импульсы, соответствующие началу положительных полупериодов. Временной интервал между импульсами в этих каналах $\Delta t = (\alpha/2\pi)T$ соответствует разности фаз α и определяет пеленг на источник молниевых разрядов. Импульс в канале опорного напряжения (ненаправленной антенны) используется для запуска горизонтальной развертки ЭЛТ индикатора, а импульс в канале суммарного напряжения подается на модулятор электронно-лучевой трубки для управления яркостью («подсвет»). Таким образом, получается индикация пеленга в виде линейной развертки. Если одновременно с пеленгатором используется дальномер, причем расстояние до излучателя задается в виде напряжения, то при подаче этого напряжения в канал вертикальной развертки индикатора координаты источника разряда будут представлены в прямоугольной системе координат с осями: азимут и обратная величина расстояния. В рассмотренном варианте фазового пеленгатора легко получить пеленг в цифровом виде, для чего нужно использовать схемы измерения временного интервала в цифровой форме. Цифровую индикацию пеленга целесообразно применять совместно с цифропечатающим устройством для автоматической регистрации грозовой активности и грозových очагов.

Для визуальных наблюдений требуется индикация, позволяющая оценить распределение отметок за определенный срок наблюдений (15—30 мин). В этом отношении бесспорное преимущество имеет индикатор на потенциалоскопической ЭЛТ, способной сохранять отметки («запоминать») более чем 30 мин.

В заключение следует упомянуть, так называемый узкосекторный пеленгатор [40, 50]. Этот пеленгатор не отвечает требованиям, сформулированным в начале главы, в отношении быстроты обзора пространства, в связи с чем возможны пропуски разрядов, т. е. потеря информации. Поэтому мы полагаем, что его можно не рассматривать.

2.2. АНТЕННЫ ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРОВ

В предыдущем разделе указывалось, что в грозопеленгаторах применяются направленные и ненаправленные антенны.

Ненаправленная антенна. В ненаправленной антенне амплитуда и фаза сигнала не должны зависеть от направления пеленгуемого источника ЭМИ в азимутальной плоскости.

Простейшей антенной является вертикальный провод (штырь).

Остановимся кратко на основных свойствах вертикальной антенны (вибратора). В практике находят применение симметричные и несимметричные вибраторы.

Вибратор можно приближенно рассматривать как длинную линию с потерями, но поскольку в диапазоне сверхдлинных волн длина вибратора всегда значительно меньше длины волны, то входное сопротивление антенны определяется емкостью линии

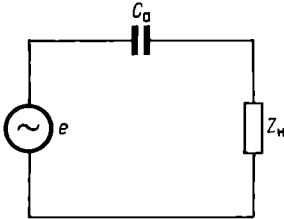


Рис. 2.3. Эквивалентная схема антенной цепи.

$$Z_{\text{вх}} = \frac{1}{j\omega c_a}. \quad (2.19)$$

Емкость симметричного вибратора [1]

$$c_a = \frac{1,1l}{4 \left(\ln \frac{l}{a} - 0,69 \right)} \text{ пФ.} \quad (2.20)$$

Емкость несимметричного вибратора

$$c_a = \frac{1,1l}{2 \left(\ln \frac{l}{a} - 0,69 \right)} \text{ пФ,} \quad (2.21)$$

где l — длина несимметричного вибратора в сантиметрах (для симметричного вибратора общая длина равна $2l$); a — радиус вибратора в сантиметрах.

Эквивалентная схема антенной цепи приведена на рис. 2.3.

Напряжение на сопротивлении нагрузки Z_n будет

$$U_{\text{вх}} = e \frac{Z_n}{Z_n + \frac{1}{j\omega c_a}}, \quad (2.22)$$

где e — ЭДС в антенне.

Если нагрузкой служит резонансный контур с эквивалентным сопротивлением $R_0 = Q/\omega c_k$, то модуль коэффициента передачи входной цепи будет определяться выражением

$$|K| = \frac{U_{\text{вх}}}{e} = \frac{\frac{c_a}{c_k} Q}{\sqrt{\left(\frac{c_a}{c_k} Q \right)^2 + 1}}, \quad (2.23)$$

где c_k — емкость контура, Q — добротность контура.

Определим коэффициент передачи симметричного вибратора длиной $2l=200$ см и диаметром $2a=2$ см, соединенного с входным контуром кабелем длиной 20 м с погонной емкостью 50 пФ/м,

$$c_a = \frac{1,1 \cdot 100}{4 \left(\ln \frac{100}{1} - 0,69 \right)} = 7 \text{ пФ},$$

$c_k = 20 \cdot 50 = 1000$ пФ (если контур настраивается только емкостью кабеля). Добротность контура Q примем равной 20, тогда

$$|K| = \frac{\frac{z}{1000} 20}{\sqrt{\left(\frac{z}{1000} 20 \right)^2 + 1}} = \frac{1}{7}.$$

Как следует из приведенного примера, коэффициент передачи входной цепи получается достаточно низким и практически может быть определен приближенным выражением

$$|K| = \frac{c_a}{c_k} Q. \quad (2.24)$$

Действующая высота симметричного вибратора, определенная для тока в середине вибратора [50],

$$h_e = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{kl}{2}}{k} \quad (2.25)$$

(здесь $k = \frac{2\pi}{\lambda}$) при $l \ll \lambda$ будет $h_e = l$. Таким образом, эквивалентная действующая высота симметричного вибратора, определенная как $h_3 = h_e \cdot K$, получается равной

$$h_3 = \frac{c_a}{c_k} Ql. \quad (2.26)$$

Действующая высота несимметричного вибратора $h_e = l/2$. Эквивалентная действующая высота несимметричного вибратора с учетом того, что его емкость в 2 раза больше, будет такой же, как в случае симметричного вибратора.

Рамочные антенны. В диапазоне сверхдлинных волн в качестве направленной антенны принимается рамочная антенна, в простейшем виде представляющая собой замкнутый плоский виток провода. Такой виток эквивалентен магнитному диполю. Магнитный поток, пронизывающий виток площадью S , который находится в магнитном поле с напряженностью H , имеет величину

$$\Phi = (Hn_1) \mu S = H \mu S \cos \varphi,$$

где \mathbf{n}_1 — единичный вектор нормали к рамке, φ — угол между единичным вектором и вектором напряженности магнитного поля; μ — относительная магнитная проницаемость внутри рамки.

Электродвижущая сила, наведенная в рамке, будет

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\left(\frac{d\mathbf{H}}{dt} \mathbf{n}_1\right) \mu S. \quad (2.27)$$

При изменении магнитного поля по гармоническому закону формула принимает вид

$$e = -j\omega S \mu H \cos \varphi. \quad (2.28)$$

Если прием атмосфериков производится в дальней зоне (зона излучения) молнии, то справедливо соотношение $H = E/120\pi$. Учитывая значение магнитной проницаемости воздуха $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м, напишем

$$e = -jE \frac{2\pi S}{\lambda} \cos \varphi. \quad (2.29)$$

Из выражения (2.29) следует, что э. д. с. в рамке на 90° отстает от напряженности электрического поля.

Действующая высота рамки (одного витка)

$$h_e = \frac{e_{\max}}{E} = \frac{2\pi S}{\lambda}. \quad (2.30)$$

Изменение э. д. с. в зависимости от направления прихода электромагнитного поля определяется углом φ между нормалью к плоскости витка (осью) и направлением приходящей волны. В общем случае при вертикальном витке, угле прихода сигнала в азимутальной плоскости по отношению к оси витка φ , угле падения β и угле поляризации γ э. д. с. в витке будет [50]

$$e = -j \frac{2\pi S}{\lambda} E (\sin \varphi \cos \gamma - \sin \beta \sin \gamma \cos \varphi \cdot e^{j\psi_a}), \quad (2.31)$$

где ψ_a — сдвиг фаз между нормально и ненормально поляризованными полями.

Искажения восьмерочной диаграммы рамки $\sin \varphi$ отмечаются только тогда, когда угол падения и угол поляризации не равны нулю ($\beta \neq 0$ и $\gamma \neq 0$).

При ненормально, но линейно поляризованной волне ($\psi_a = 0$), падающей с некоторым наклоном, диаграмма направленности сохраняет форму восьмерки, но возникает ошибка на угол $\Delta\varphi = \text{arctg}(\text{tg } \gamma \sin \beta)$.

Для увеличения э. д. с. антенны применяются многovitковые рамки. Результирующая э. д. с. будет равна сумме э. д. с., наводимых в отдельных витках,

$$e = -j \frac{2\pi}{\lambda} E \sin \varphi \sum_{k=1}^N S_k = -j \frac{2\pi S_{\text{ср}} N}{\lambda} E \sin \varphi, \quad (2.32)$$

где S_k — площадь k -го витка, $S_{cp} = \sum_{k=1}^N S_k / N$ — средняя площадь витка, N — число витков.

Действующая высота рамочной антенны $h_e = 2\pi S_{cp} N / \lambda$ получается в N раз больше действующей высоты одного витка.

В случае когда все витки наматываются на цилиндрическую поверхность, они располагаются не в одной плоскости. Такая рамка называется пространственной.

В пространственной рамке провод обмотки образует один полный виток в плоскости, перпендикулярной к плоскости основных витков рамки. Электродвижущая сила, наводимая в этом перпендикулярном витке, охватывающем площадь S_H , будет

$$e_H = -j \frac{2\pi S_H E}{\lambda} \cos \varphi.$$

Суммарная э. д. с. будет

$$e_{\Sigma} = e + e_H = -jE \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(NS)^2 + S_H^2} \sin(\varphi + \Delta\varphi). \quad (2.33)$$

Ошибка в этом случае определяется выражением

$$\operatorname{tg} \Delta\varphi = \frac{S_H}{NS}. \quad (2.34)$$

Обычно S_H много меньше NS и погрешностью, вносимой перпендикулярным витком, можно пренебречь.

Для уменьшения габаритов рамочных антенн при одновременном обеспечении необходимой действующей высоты применяют рамки с сердечниками из материала с высокой магнитной проницаемостью.

Наиболее широкое распространение для этой цели нашли ферриты, обладающие малыми потерями и высокой магнитной проницаемостью. Эффективная магнитная проницаемость сердечника отличается от начальной паспортной магнитной проницаемости, которая обычно приводится в справочных материалах и характеризует относительную магнитную проницаемость μ_0 тороидальных сердечников [15, 78]. Сердечники ферритовых антенн имеют вытянутую форму, т. е. длина их значительно превосходит толщину, ширину или диаметр, между концами сердечника имеется воздушный зазор. Магнитная проницаемость таких сердечников зависит от соотношения площади поперечного сечения и длины.

В ферромагнитных материалах под воздействием внешнего магнитного поля ферромагнитные частицы ориентируются по

направлению силовых линий поля и в свою очередь создают магнитное поле, противодействующее внешнему. Чем короче тело по сравнению с его поперечными размерами, тем сильнее действие этого встречного поля. Достаточно строгая формула, учитывающая это действие, имеется для эллипсоидального сердечника:

$$\mu_l = \frac{\mu_0}{1 + \frac{N}{4\pi} (\mu_0 - 1)}. \quad (2.35)$$

Однако практическое применение находят сердечники, имеющие форму цилиндра, параллелепипеда, призмы. Для таких сердечников существуют экспериментальные кривые, таблицы или

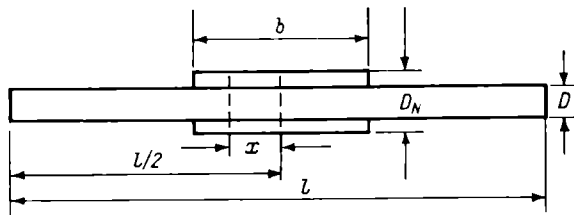


Рис. 2.4. Расположение катушки на сердечнике рамочной антенны.

эмпирические формулы, позволяющие определить зависимость μ_l от их формы. В частности, для цилиндрического сердечника рекомендуется формула

$$\mu_l = \frac{\mu_0}{1 + 0,84 \left(\frac{D}{l} \right)^{1,7} (\mu_0 - 1)}, \quad (2.36)$$

где D — диаметр цилиндрического сердечника, l — его длина.

Так, например, стержень диаметром 10 мм и длиной 200 мм, выполненный из феррита с магнитной проницаемостью $\mu_0 = 700$, будет иметь эффективную магнитную проницаемость $\mu_l = 150$. Форма поперечного сечения сердечника играет значительно меньшую роль по сравнению с соотношением его продольных и поперечных размеров.

Эффективная магнитная проницаемость в произвольной точке сердечника будет [78] $\mu_x = k_x \mu_l$, где $K_x = 1 - 0,9 \left(\frac{2x}{l} \right)^2$ — коэффициент, учитывающий расположение катушки на сердечнике (рис. 2.4), x — расстояние центра катушки от середины сердечника, l — длина сердечника. Формула позволяет определить эффективную магнитную проницаемость при условии, что длина катушки $b \leq 0,1l$.

Если $b > 0,1l$, то

$$\mu_{l_{cp}} = \mu_l k_N = \mu_l \left[1 - 0,3 \left(\frac{b}{l} \right)^2 \right],$$

где k_N — коэффициент, зависящий от соотношения длин катушки и сердечника.

Кроме того, μ зависит от соотношения диаметра катушки D_N и диаметра сердечника D . Последнее учитывается коэффициентом $k_s = \left(\frac{D}{D_N} \right)^2$. Желательно, чтобы антенная катушка отстояла от сердечника не более чем на толщину катушки. При этом $k_N = 0,85 \div 0,90$. Таким образом, эффективная магнитная проницаемость, которая может быть использована при расчете ферритовой рамочной антенны, будет

$$\mu_{эф} = \mu_l k_x k_N k_s. \quad (2.37)$$

Индуктивность рамочной антенны определяется формулой

$$L_p = \Phi N^2 D_{cp} \mu_k \cdot 10^{-3} \text{ мкГ}, \quad (2.38)$$

где Φ — поправочный коэффициент, который определяется по формуле

$$\Phi = \frac{10}{\frac{b}{D_{cp}} + 0,44},$$

D_{cp} — средний диаметр катушки в сантиметрах, μ_k — магнитная проницаемость катушки (показывает во сколько раз увеличивается индуктивность катушки с сердечником по отношению к индуктивности катушки без сердечника),

$$\mu_k = \mu_{эф} \frac{b}{l}.$$

Формулу (2.38) можно представить в несколько другой форме

$$L_p = \frac{23N^2 D_{cp}^2 \mu_k}{\left(2,3 + \frac{D_{cp}}{b} \right) b} \cdot 10^{-3} \text{ мкГ}. \quad (2.39)$$

Действующая высота рамки с ферромагнитным сердечником возрастает в $\mu_{эф}$ раз и получается равной

$$h_l = \frac{2\pi SN}{\lambda} \mu_{эф}. \quad (2.40)$$

Иногда используют понятие эффективного диаметра рамки $D_{pe} = \sqrt{\mu_{эф}} D_{cp}$. В гронопеленгаторах, как уже указывалось, антенная катушка часто используется в качестве индуктивности входного контура, который обычно подключается ко входу приемного канала.

Для контура с потерями (или шунтированного входным сопротивлением приемника) для напряжения на входе приемника можем написать

$$U_{\text{вх}} = eQ_{\text{эк}},$$

где

$$Q_{\text{эк}} = \frac{R_{\text{эк}}}{\rho}; \quad \rho = \frac{1}{\omega L_p} = \frac{1}{\omega c_k};$$

$R_{\text{эк}}$ — эквивалентное сопротивление контура.

Эффективность настроенной рамки, т. е. отношение напряжения на входе приемного тракта $U_{\text{вх}}$ к напряженности поля, будет

$$h_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{вх}}}{E} = h_e Q_{\text{эк}} = \frac{2\pi SN}{\lambda} \mu_{\text{эк}} Q_{\text{эк}} \text{ м}, \quad (2.41)$$

где S — площадь витка рамки в м^2 , λ — длина волны в метрах.

С точки зрения увеличения эффективной действующей высоты рамочной антенны желательнее было бы увеличить число витков N , однако при этом будет увеличиваться индуктивность рамки пропорционально N^2 . Величина индуктивности обычно оказывается заданной, так как, с одной стороны, приходится задавать добротность контура $Q_{\text{эк}}$, а с другой стороны, — сопротивление, шунтирующее контур.

При выборе величины $Q_{\text{эк}}$ приходится учитывать два обстоятельства, которые не позволяют выбрать очень высокую добротность контура: чем уже полоса приемного устройства, тем меньше энергии удастся извлечь из принимаемого импульса электромагнитного излучения молнии и тем труднее обеспечить амплитудную и фазовую идентичность приемных трактов (север—юг и запад—восток).

Для увеличения числа витков катушки заданную индуктивность можно разбить на две секции таким образом, чтобы при их последовательном соединении общая индуктивность осталась прежней. Тогда общее число витков катушки

$$2N_1 = \sqrt{\frac{2}{1+k}} N,$$

где N_1 — число витков каждой секции, N — число витков эквивалентной катушки, k — коэффициент связи.

Оптимальный сдвиг между секциями равен 0,25*l*. Большой эффективности можно добиться, если секции располагать на отдельных сердечниках, разнесенных параллельно друг другу на расстояние $D_{\text{ср}} \sqrt{\mu_l}$ и больше. При $k=0$ для двух катушек число витков и действующая высота увеличатся в $\sqrt{2}$ раз. Если магнитная антенна состоит из n катушек и стержней, то ее действующая высота соответственно увеличится в \sqrt{n} раз.

2.3. ПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

Грозопеленгатор с радиусом действия до 300—400 км не так критичен к выбору диапазона волн, как пеленгатор с радиусом действия в несколько тысяч километров [40]. Однако требования о возможно меньшей зависимости показаний пеленгатора от условий распространения волн сохраняются. Обращаясь к рис. 1.10—1.13, видим, что почти для всех типов (по формам) атмосфериков максимум излучения приходится на область 5—10 кГц; причем частоты 7—10 кГц претерпевают наименьшее затухание при распространении в волноводе земля—ионосфера. При этом для сверхдлинных волн почти не ощущаются замирания, обусловленные отражениями от ионосферных неоднородностей. Размер встречающихся неоднородностей в ионосфере в подавляющем большинстве случаев заметно меньше, чем длины волн данного диапазона, что приводит к относительно постоянству напряженности поля и его поляризации. Зависимость поля от условий распространения волн, в частности от электрических и геометрических свойств подстилающей поверхности, состояния ионосферы наименьшая для больших расстояний в диапазоне частот 7—8 кГц. Именно эти частоты рекомендуются для пеленгования атмосфериков на больших расстояниях [40]. Нет оснований отказываться от этой рекомендации и для расстояний 300—400 км, так как высокий уровень сигнала обеспечивает надежное пеленгование, а прием дальних атмосфериков исключен благодаря применению дальномерных устройств.

Для определения чувствительности приемника, предназначенного для приема ЭМИ в заданном радиусе действия пеленгатора $R_{\text{макс}}$, можно воспользоваться графиком зависимости напряженности поля от расстояния (см. рис. 1.15).

Для обнаружения грозового очага совершенно не обязательно осуществлять прием и пеленгацию большинства генерируемых грозой разрядов. Достаточно с высокой вероятностью принять хотя бы один разряд из всей совокупности. Вероятность обнаружения грозы по одному разряду и более при n разрядах в грозе будет

$$P_{\text{обн}} = 1 - (1 - p)^n, \quad (2.42)$$

где p — вероятность того, что при известном распределении амплитуд атмосфериков, величина импульса, создаваемого отдельным разрядом, превысит пороговую чувствительность приемника; $(1 - p)$ — вероятность того, что атмосферик не будет принят.

Поскольку гроза представляет собой поток случайных независимых событий (разрядов) то, рассматривая множество грозовых процессов, можно с достаточным основанием полагать, что число разрядов, генерируемых грозой, описывается законом Пуассона

$$P_n = \frac{N^n}{n!} e^{-N},$$

где N — среднее количество разрядов в грозе за фиксированное время наблюдения.

Вероятность появления не менее m разрядов определяется кумулятивной вероятностью

$$P\{n \geq m\} = \sum_{n=m}^{\infty} \frac{N^n}{n!} e^{-N} = 1 - \sum_{m=0}^{n-1} \frac{N^n}{n!} e^{-N}.$$

Так, для среднего количества разрядов, генерируемых грозой за 30-минутный срок наблюдения $N=50$, с вероятностью 0,999 будет появляться не менее 30 разрядов.

Из формулы (2.42) может быть определена вероятность, соответствующая пороговой чувствительности

$$p = 1 - (1 - P_{\text{обн}})^{1/n}. \quad (2.43)$$

Задавшись вероятностью обнаружения грозы, определяем величину p и по таблицам интеграла вероятности для нормального закона находим нормированное отклонение от медианного значения x (в долях среднего квадратического отклонения σ). Чувствительность приемника, определенная для $R_{\text{макс}}$ может быть загрублена на $x\sigma$ дБ.

Так, например, для $P_{\text{обн}}=0,95$ и $\sigma=8$ дБ находим $p=0,095$ и $x=1,31$ и соответственно получаем, что чувствительность должна быть снижена на $x\sigma=10,5$ дБ, или в 3,4 раза. Если при распространении волн напряженность поля уменьшится в k раз по отношению к приведенному для расстояния 10 км значению, то предельная чувствительность будет равна

$$E_{\text{мин}} = \frac{E_{(10)}}{k} \cdot 10^{x\sigma/20}, \quad (2.44)$$

где $E_{(10)}$ — медианное значение напряженности поля в 10 км от излучателя.

Для расстояния, например, 300 км получим $k=300/10=30$ и при $E_{(10)}=4\text{В}/(\text{м}\cdot\text{кГц})$ чувствительность по полю составит $E_{\text{мин}}=4 \cdot 10^{10,5/20}/30=0,45\text{В}/(\text{м}\cdot\text{кГц})$. Однако для предельной дальности не следует задаваться столь высокой вероятностью обнаружения.

2.4. ОШИБКИ ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ УСЛОВИЯМИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН

Созданное источником электромагнитное поле при распространении волн встречает на своем пути различные образования — ионосферу, земную поверхность, которые искажают структуру поля и приводят к ошибкам пеленгования.

На практике приходится считаться с поляризационными ошибками, вызываемыми изменением поляризации поля в точке

приема (некоторые авторы [50, 71] относят поляризационные ошибки к инструментальным, так как при использовании разнесенных антенн можно существенно снизить эти ошибки. Однако в грозопеленгации подобного рода антенны не находят применения вследствие их малой эффективности на сверхдлинных волнах), а также с ошибками, обусловленными искажением, вызванным неоднородностями подстилающей поверхности (состав и проводимость почв); искажением направления прихода волн, вызванным неровностями земной поверхности; искажением ориентировки фазового фронта волны вследствие интерференции с волнами, отраженными от местных предметов.

Поляризационные ошибки. Выше рассматривалась работа пеленгатора гроз при приеме линейно поляризованного в вертикальной плоскости поля. При малых расстояниях до источника излучения поляризация волны в точке приема будет зависеть от наклона молниевоего канала. На больших расстояниях в ночное время во время возмущений в ионосфере также может отмечаться изменение поляризации. Однако до расстояния 300—400 км поляризация волн будет в основном определяться поляризацией поверхностной волны.

Рассмотрим случай пеленгования электромагнитной волны с углом наклона большой оси эллипса поляризации γ , углом падения в вертикальной плоскости β , приходящей от источника, находящегося под углом φ в азимутальной плоскости. Индицируемый угол пеленга будет [1, 8].

$$\varphi + \Delta\varphi = \arctg \frac{\sin \varphi \cos \gamma + \cos \varphi \sin \beta \sin \gamma}{\cos \varphi \cos \gamma + \sin \varphi \sin \beta \sin \gamma}. \quad (2.45)$$

где $\Delta\varphi$ — ошибка пеленгования.

Формула (2.45) справедлива для амплитудных и фазовых пеленгаторов. Ошибки будут в том случае, если угол поляризации, а также угол падения не равны нулю. Наибольшая ошибка возникает при углах $\varphi = n\pi/2$, где $n = 0, 1, 2, \dots$

При средней высоте источника излучения 3 км поляризационные ошибки, превышающие 5° , могут возникать на расстоянии от источника меньше 15 км при углах поляризации, превышающих 30° . Однако значения максимальных поляризационных ошибок не определяют в полной мере точность пеленгования ближних грозовых очагов.

Гроза — сложный процесс, в результате которого образуется совокупность большого количества разрядов, пространственная ориентировка и поляризационные характеристики которых подчиняются случайному закону распределения. Специальным экспериментальным исследованием [8] точности пеленгования амплитудного трехканального пеленгатора в ближней зоне (от 1 до 20 км) было установлено, что в 75% случаев поляризационные ошибки не превышают $\pm 10^\circ$, а в 50% они лежат в пределах

$\pm 5^\circ$. Для сравнения укажем, что средняя квадратическая ошибка грозопеленгатора ПАГ-1 [10, 19], рассчитанного на работу в радиусе 300—400 км, составляет $3,0^\circ$, а максимальная $\pm 7^\circ$. Если учесть при этом угловые размеры грозовых очагов в ближней зоне (гл. 1), то приведенные данные по ухудшению точности пеленгования в ближней зоне нельзя считать неприемлемыми.

Ошибки, вызываемые неоднородностями подстилающей поверхности. Если вблизи пеленгатора проходит граница раздела двух сред с разной проводимостью, например береговая линия, отделяющая сушу от моря, то могут возникать ошибки пеленгования вследствие «берегового» эффекта. Различают два рода таких ошибок:

— ошибки из-за различных параметров почвы по обе стороны границы раздела сред;

— и ошибки из-за неровности поверхности (склона берега).

Расчетные формулы для ошибок за счет береговой рефракции приводятся в книгах по радиопеленгации [40, 50].

Вблизи берега будет наблюдаться искажение линии равных фаз и появится ошибка пеленгования, зависящая от направления движения волны относительно линии берега. При дальнейшем движении волны, когда поверхность фронта волны во всех точках приобретает одинаковый наклон, ошибка исчезает. Наибольшая ошибка наблюдается при скользящих углах падения (распространение вдоль береговой линии). Расчеты [40] показали, что при угле падения 89° и удалении пеленгатора на 250 и 1000 м от берега ошибка соответственно получается — $3,0$ и $1,5^\circ$. Таким образом, практически с ошибкой береговой рефракции можно не считаться, если грозопеленгатор устанавливать не ближе чем на 1000 м от береговой линии.

Ошибки, вызываемые неровностями земной поверхности. Физическая природа ошибок из-за неровностей поверхности (склон берега) аналогична ошибке за счет береговой рефракции.

При расположении пеленгатора у вершины склона и при крутизне склона около 10° ошибка не превышает 1° [40, 50].

Ошибки, вызванные влиянием местных предметов. На точность пеленгования оказывают влияние местные предметы, находящиеся вблизи от пеленгатора [50]. Отраженный от местного предмета сигнал воздействует совместно с прямым сигналом источника сигнала на антенну пеленгатора. Так как азимутальное положение отражателя может отличаться от направления на источник, то в результате возникают ошибки пеленгования.

Для диапазона сверхдлинных волн расстояния, на которых местные предметы способны оказывать на них заметное влияние, получаются существенно меньше длины волны, т. е. все переотражатели находятся в ближней зоне.

Ошибки, вызываемые линейным вертикальным отражателем (антенна-мачта, тонкий цилиндр и т. д.). Электрическое и магнитное поля, создаваемые местным предметом, определяются выражениями (1.2) и могут быть представлены в виде:

$$E_z = -\frac{e^{jkR} Il \cdot 120\pi}{4\pi cR} \left[\frac{\frac{c^2}{R^2} + j\omega \frac{c}{R} - \omega^2}{j\omega} \right];$$

$$H_\varphi = \frac{e^{jkR} Il}{4\pi cR} \left[\frac{j\omega \frac{c}{R} - \omega^2}{j\omega} \right], \quad (2.46)$$

где Il — токовый момент источника, I — ток источника, l — длина излучателя.

Рассматривая такой предмет, как заземленный вертикальный вибратор длиной l , и определяя ток, наведенный в нем падающим полем, можем найти отраженное поле. Далее, просуммировав э. д. с., наведенные прямым и отраженным полями в ненаправленной и рамочных антеннах, получим формулу для максимальной ошибки

$$|\Delta_{\max}| = \left| 2 \frac{60 (l/2)^2}{z_a d^2 - 60 (l/2)^2} \right| \cdot 57^\circ, \quad (2.47)$$

где $z_a = -j/\omega c_a$ — полное сопротивление короткого заземленного вибратора, c_a — емкость вибратора, d — расстояние от отражателя до пеленгатора.

Подставив в выражение (2.47) значение z_a , получим расчетную формулу

$$\Delta_{\max}^\circ = \frac{120 (l/2)^2 \cdot 57^\circ}{\sqrt{\left[\frac{d^2}{\omega c_a} \right]^2 + [60 (l/2)^2]^2}} \quad (2.48)$$

где по формуле (2.20)

$$c_a = \frac{1,1l \cdot 10^{-12}}{2 \ln (l/2a)} \Phi.$$

Расчеты ошибок пеленга по формуле (2.48) для тонких вертикальных цилиндров показали, что они получаются весьма малыми даже при расстояниях до цилиндров в несколько метров. Аналогичные результаты получаются и для длинных заземленных проводов. Так, в результате измерений, проводившихся на частотах около 100 кГц с помощью приемников высокоточной радионавигационной системы «Декка» [65], не было обнаружено влияния длинного заземленного провода на показания пеленгатора при удалении его от антенны всего на 1—2 м.

Значительно большее влияние оказывают вертикальные предметы, имеющие большое поперечное сечение. Например, при этих же экспериментах было обнаружено влияние листового

дерева (высотой 20 м с диаметром кроны до 16 м) на расстоянии до 30 м.

Согласно расчетам, ошибки грозопеленгатора (при $f = 7000$ Гц) для проводящего цилиндра с такими же размерами, удаленного на 10 м, составляют $1,5^\circ$. Влияние телеграфных проводов на пеленг [65] обнаруживалось приемником «Декка» на расстояниях, меньших 15 м.

Ошибки, вносимые сооружениями, имеющими горизонтальные размеры, значительно превышающие их высоту. На практике часто приходится определять ошибки, вносимые зданиями, ангарами, самолетами, холмами и прочими отражателями, имеющими значительные размеры; причем протяженность их превышает размеры поперечного сечения. Для ориентировочной оценки ошибок можно воспользоваться решением, найденным для отраженного поля от идеально проводящего полуцилиндра бесконечной длины, лежащего на идеально проводящей поверхности [50].

Максимальная ошибка определяется выражением

$$\Delta\varphi_{\text{макс}}^\circ = \frac{\left(\frac{a}{d}\right)^2 \cdot 57}{2 \sqrt{1 + \left(\frac{a}{d}\right)^3}}, \quad (2.49)$$

где a — радиус полуцилиндра, d — расстояние от него до грозопеленгатора.

Определим для примера ошибку, вносимую холмом (или насыпью) высотой 10 м, находящимся на расстоянии 25 м от антенны пеленгатора:

$$\Delta\varphi_{\text{макс}}^\circ = \frac{\left(\frac{10}{25}\right)^2 \cdot 57}{2 \sqrt{1 + \left(\frac{10}{25}\right)^3}} = 4,8^\circ.$$

Приведенная формула справедлива при расположении источника сигнала и грозопеленгатора по одну сторону препятствия. Если препятствие находится между источником сигнала и грозопеленгатором, то необходимо учитывать экранирующее действие препятствия.

В работе [8] приведены экспериментальные данные, из которых следует, что препятствия (стены дома), имевшие угол возвышения относительно антенны пеленгатора в среднем около 10° , не вызывали заметных ошибок пеленгования.

Таким образом, если принять за допустимую величину ошибки 5° , то требование, чтобы угол возвышения препятствия был не выше 10° , оказывается несколько более жестким, чем то, которое может быть получено из формулы (2.49).

Высказывается предположение [50], что на расстоянии, примерно в 6—8 раз превышающем максимальные размеры пред-

мета, нарушающего структуру поля, ошибка пеленга становится уже достаточно малой. Последнее вполне согласуется с вышеприведенными экспериментальными и расчетными данными.

Ошибки, вызываемые плоским вертикальным отражателем (лист, антенна радиолокатора, стена дома и т. п.). Для сверхдлинных волн, когда линейные размеры отражающей поверхности существенно меньше длины волны, такой отражатель можно рассматривать как элемент Гюйгенса [1].

Допустим, что рассматривается прямоугольный лист размером $l_1 \times l_2$. При этом электрический ток, текущий по отражателю, будет равен $I = H_0 l_1$ (или l_2) в зависимости от ориентировки вектора электрического поля.

Амплитуда напряженности магнитного поля, создаваемого отражателем в ближней зоне, имеет величину

$$H_{от} = \frac{H_0 l_1 l_2}{4\pi r^2} = H_0 \frac{S}{4\pi r^2}. \quad (2.50)$$

Максимальное значение ошибки при этом составит

$$\Delta \varphi_{\max}^{\circ} = 2 \left| \frac{H_{от}}{H_0} \right| = \frac{S \cdot 57^{\circ}}{2\pi d^2} = \left(9 \frac{S}{d^2} \right)^{\circ}. \quad (2.51)$$

Например, плоский отражатель площадью 100 м^2 приводит на расстоянии 20 м к ошибке $2,25^{\circ}$. В этом случае так же, как для сооружений, холмов, необходимо, чтобы углы закрытия не превышали 10° .

2.5. ИМИТАТОРЫ

При регулировке, а также при периодической проверке гронопеленгатора необходимо контролировать его инструментальную погрешность; причем проверять нужно все устройство, включая и антенны. В антеннах при этом должны создаваться э. д. с. такие же, как при воздействии ЭМИ грозового разряда, прошедшего с расстояния, соответствующего дальней зоне. Задача возбуждения антенн сверхдлинных волн без помощи имитаторов практически неосуществима. Благодаря тому что применяющиеся в пеленгаторе электрическая и магнитные антенны на сверхдлинных волнах реагируют практически только соответственно на электрическое и магнитное поля, оказывается возможным путем воздействия и на эти антенны соответствующими статическими полями синтезировать сигналы, имитирующие воздействие атмосфера.

При антенных измерениях широко используются симметричные и несимметричные измерительные линии. При этом, помимо чисто антенных измерений (для рассматриваемого диапазона волн); оказывается возможным имитировать электромагнитное

поле, по структуре аналогичное электромагнитному полю в дальней зоне источника излучения, а также имитировать более сложные структуры поля в ближней зоне. Соотношение электрического и магнитного полей, создаваемых двухпроводной линией, нагруженной на сопротивление $Z_{\text{н}}$, определяется выражением [64]

$$\frac{E_{\text{л}}}{H_{\text{л}}} = \frac{Z_{\text{н}}}{W} \cdot 120\pi, \quad (2.52)$$

где W — волновое сопротивление линии.

При $Z_{\text{н}}=0$ существует только магнитное поле, при $Z_{\text{н}}=\infty$ существует только электрическое поле. Соотношение полей, создаваемых реальным источником, от соотношения полей в измерительной линии отличается на постоянный множитель. Для подбора нужного характера нагрузки $Z_{\text{н}}$ рекомендуется двухполюсник, изображенный на рис. 2.5. Для имитации поля в волновой зоне необходимо, чтобы $Z_{\text{н}}/W=120\pi$. Это условие выполняется при $L=r_0W$ и $c=r_0/W$. Использовать линию из двух проводов не

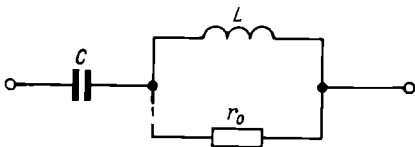


Рис. 2.5. Двухполюсник нагрузки $Z_{\text{н}}$.

удобно, так как при смещении относительно плоскости, в которой расположены провода измерительной линии, будет наблюдаться изменение напряженности поля. Поэтому применяют плоские линии, каждый провод которых представляет собой либо широкую металлическую полосу (но не из ферромагнитного материала), либо ряд параллельных проводов с соединенными концами (рис. 2.6). Эффективность (действующая высота) рамочной антенны определяется по формуле

$$h_{\text{д}} = \frac{e}{120\pi H}, \quad (2.53)$$

где e — э. д. с. в антенне, $H=I/b$ — напряженность магнитного поля, I — ток в линии, b — ширина линии (рис. 2.6).

Вращая антенну в поле линии, можно определить точность пеленгования грозопеленгатора. Неоднородность поля в линии в зависимости от вертикального (между проводами) перемещения точки приема определяется выражением

$$\frac{b}{a} = \frac{\ln \frac{1}{\delta}}{2\pi(1-m)}, \quad (2.54)$$

где b — ширина линии, d — высота линии, a — расстояние между отдельными проводами, $y=md$ ($m<1$) определяет высоту точки приема в линии, $\delta=\Delta H/H$ — коэффициент неоднородности.

Искажения поля будут практически отсутствовать при выполнении следующих соотношений:

m	0,5	0,7	0,8	0,9
b/a	2	2,5	5	10

При боковом отклонении в пределах расстояния a от провода до провода искажения будут носить синусоидальный характер. При малой величине a этими искажениями можно пренебречь.

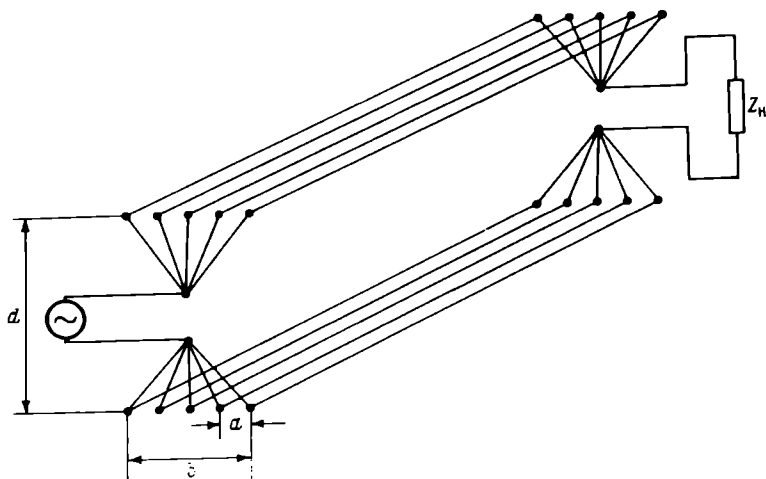


Рис. 2.6. Схема соединения проводов в измерительной линии.

В зависимости от размеров антенной системы грозопеленгатора приходится выбирать и размеры измерительной линии. Использовать такие линии целесообразно в стационарных условиях для отработки и регулировки пеленгатора. Здесь линия особенно удобна, так как она позволяет одновременно получать электрическое и магнитное поля, воздействующие на штыревую и рамочные антенны пеленгатора. Однако придавать линию каждому пеленгатору для проверки его инструментальной точности нецелесообразно. Для этой цели с успехом используются имитаторы только магнитного поля, а в приемный канал ненаправленной антенны сигнал вводится непосредственно. В этом случае электрическое поле не создается.

Можно указать на два вида подобных имитаторов:

1) кольца Гельмгольца, создающие между ними магнитное поле, в которое помещаются рамочные антенны пеленгатора [77];

2) специальные катушки, индуктивно связанные с рамочными антеннами.

Кольца Гельмгольца особенно удобны, если в пеленгаторе применяются рамочные антенны с ферритовыми сердечниками, обладающие малыми размерами.

При использовании второго вида имитаторов проверкой не полностью охватываются антенны.

На рис. 2.7 схематически изображены кольца Гельмгольца при параллельном и последовательном соединении колец. В пределах области, ограниченной цилиндрической поверхностью, у которой диаметр основания и высота равны между собой и

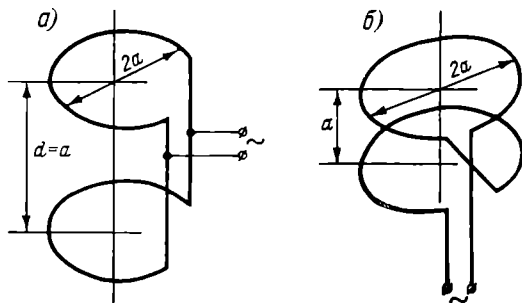


Рис. 2.7. Схематическое изображение колец Гельмгольца.

a — параллельное соединение колец, *б* — последовательное соединение колец.

составляют $0,85a$ (a — радиус колец), с точностью до 2% поле постоянно по амплитуде и поляризации. Ось указанного цилиндра совпадает с осью колец, а центр совпадает с центром системы. Магнитное поле в выделенной области можно считать равным удвоенному значению поля одного витка в центральной точке:

$$H = \frac{2a^2 I}{2\sqrt{(a^2 + 0,25a^2)^3}} = 0,716 \frac{I}{a}.$$

Это магнитное поле эквивалентно электрическому полю плоской электромагнитной волны в воздухе, равному

$$E_{\text{эkv}} = 120\pi H = 86\pi \frac{I}{a} = 270 \frac{I}{a} \text{ В/м.}$$

При использовании N витков в каждом кольце поле будет

$$E_{\text{эkv. } N} = 270 \frac{I}{a} N \text{ В/м.} \quad (2.55)$$

Диаграмма направленности антенны получается как функция угла поворота оси ферритовой антенны относительно оси колец Гельмгольца. При измерениях в кольцах Гельмгольца с влиянием помещения можно не считаться.

Наиболее совершенная из известных схем с дополнительными катушками, намотанными на рамочные антенны [18], содержит источник импульсного сигнала, имитирующего принимаемый импульс атмосферика, специальную схему, позволяющую вручную, а также автоматически устанавливать соотношение сигналов в индукционных катушках, соответствующее угловым положениям 0 , $22,5$, 45° и т. д. через $22,5^\circ$. Применение такого имитатора оправдано в тех случаях, когда по условиям размещения рамочных антенн, например, на подвижном объекте (самолет) использование колец Гельмгольца оказывается невозможным.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ГРОВОГО ОЧАГА

Из возможных принципов построения дальномеров, вытекающих из физических свойств ЭМИ молниевых разрядов, рассмотренных в гл. 1, остановимся лишь на тех, которые позволяют определять расстояние до грозового очага из одной точки пассивным методом. При этом оценка расстояния производится путем измерения некоторого параметра атмосферы, зависящего от расстояния. Для этого требуется знать соответствующий параметр ЭМИ грозового разряда в источнике и характер (закон) его изменения с расстоянием. Естественно, что для отдельного грозового разряда, являющегося одной из реализаций случайного процесса, не могут быть получены детерминированные характеристики параметров. Однако явление грозы сопровождается множеством разрядов, совокупность которых уже может быть охарактеризована определенными законами распределения.

Разрешение по дальности двух грозовых очагов возможно, если флуктуации параметра существенно меньше его изменения с расстоянием. Разрешение будет тем точнее, чем больший статистический материал может быть получен для оценки расстояния.

Из упомянутых в гл. 1 методов дальнометрии ниже описываются те из них, которые могут быть использованы при разработке дальномеров для расстояний 0—300 км.

3.1. МЕТОД АМПЛИТУДНОЙ СЕЛЕКЦИИ

Одним из широко используемых методов дальнометрии является метод, основанный на измерении амплитуды атмосферы.

Как указывалось в гл. 1, распределение амплитуд атмосфериков, генерируемых отдельным источником, удовлетворительно описывается нормально-логарифмическим законом (1.1). Параметры этого распределения, измеренные для какого-либо фиксированного очага, расположенного на расстоянии R_0 , могут быть использованы для определения параметров распределения амплитуд очага, локализованного на произвольном расстоянии от точки наблюдения. Зависимость амплитуды атмосферика от расстояния приближенно имеет вид

$$E_R = \frac{E_0}{\left(\frac{R}{R_0}\right)^k}, \quad (3.1)$$

где E_R — нормированная напряженность поля в точке, находящейся на расстоянии R ; E_0 — напряженность электрического поля, нормированная по отношению к модальному значению в точке, находящейся на удалении R_0 ; k — некоторый коэффициент.

По мере увеличения расстояния до грозового очага кривая распределения (1.1) будет смещаться в сторону меньших амплитуд.

Задача определения расстояния, по существу, сводится к статистической проверке гипотез, связанных с принадлежностью принятых из данного очага сигналов к тому или иному интервалу дальности. Если иметь неограниченный статистический материал, когда кривые распределения прорабатываются достаточно полно, и выбрать для оценки дискретные значения расстояний такими, чтобы соседние распределения перекрывались незначительно, то вероятность разделения интервалов по дальности будет высокой.

Рассмотрим конкретные виды устройств, основанных на измерении амплитуды атмосфериков.

Грозорегистраторы. Простейшим устройством, являющимся прототипом современных амплитудных дальномеров, является грозорегистратор (счетчик молний), позволяющий обнаруживать грозы в пределах некоторой области, ограниченной определенным радиусом.

Грозорегистраторы используются для изучения характеристик грозовой деятельности и позволяют дать некоторую количественную оценку грозовой активности в виде числа разрядов на единицу площади.

Основной характеристикой грозорегистратора является эффективный радиус действия $R_{\text{эф}}$, за который принимается радиус круга на поверхности Земли, внутри которого число молниевых разрядов равно числу принятых импульсов [2]. Эффективный радиус определяется по результатам наблюдений за длительный период времени.

Теоретический расчет эффективного радиуса действия грозо-регистратора был выполнен Л. Г. Махоткиным [58] и Ф. Хорнером [105]. При выводе формулы в работе [58] предполагалось, что среднее число грозовых разрядов в единицу времени N_0 , приходящееся на единицу площади, не зависит от расстояния до места наблюдения R ; амплитуды атмосфериков E убывают обратно пропорционально R^k ; амплитуды атмосфериков из каждого источника распределяются по нормально-логарифмическому закону. Исходя из этих допущений была получена формула для среднего количества зарегистрированных прибором разрядов в единицу времени:

$$N_{\Sigma}(E_{\text{п}}) = \pi N_0 R_0^2 \left(\frac{E_0}{E_{\text{п}}} \right)^{\frac{2}{k}} e^{-2 \left(\frac{\sigma}{k} \right)^2}, \quad (3.2)$$

где R_0 — расстояние, на котором медианное значение напряженности поля равно E_0 ; $E_{\text{п}}$ — порог срабатывания грозорегистратора; k — показатель в соотношении, связывающем напряженность поля с расстоянием до места наблюдения; σ — стандартное отклонение (параметр распределения для источника).

В соответствии с определением $R_{\text{эф}}$

$$N_{\Sigma}(E_{\text{п}}) = \pi N_0 R_{\text{эф}}^2. \quad (3.3)$$

Из (3.2) и (3.3) можно получить выражение для эффективного радиуса действия

$$R_{\text{эф}} = R_0 \left(\frac{E_0}{E_{\text{п}}} \right)^{\frac{1}{k}} e^{\left(\frac{\sigma}{k} \right)^2}. \quad (3.4)$$

Об $R_{\text{эф}}$ нельзя говорить как о величине строго постоянной для данного прибора, так как E_0 , σ и k могут изменяться в незначительных пределах [43].

Маловероятно, чтобы грозорегистраторы могли фиксировать все грозовые разряды, происходящие на площади, ограниченной эффективным радиусом действия прибора. Более правильной является вероятностная оценка работы грозорегистратора. Например, отношение количества принятых разрядов от гроз, расположенных на площади, ограниченной $R_{\text{эф}}$, к общему числу зарегистрированных прибором разрядов. Ниже, при рассмотрении теории ограничителя дальности действия грозопеленгатора будет показано, что с уменьшением радиуса действия ограничителя дальности (что аналогично уменьшению $R_{\text{обн}}$ для грозорегистратора) эта вероятностная характеристика ухудшается [10].

Л. Г. Махоткиным и К. А. Семеновым [61] была рассчитана для грозорегистратора характеристическая функция $\bar{P}(R)$, определяющая, какой процент разрядов из точечного источника, рас-

положенного на расстоянии R , регистрируется данным прибором:

$$P(R) = 0,5 [1 - \Phi(x)], \quad (3.5)$$

где

$$x = \frac{\lg R - \lg R^*}{\sigma},$$

R^* — расстояние, для которого $P(R^*) = 50\%$; $\Phi(x)$ — интеграл вероятностей,

$$\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-x}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt; \quad (3.6)$$

R^* определяется из выражения

$$R_{эф} = e^{2\sigma} R^*. \quad (3.7)$$

Экспериментальные данные показали, что грозорегистраторы регистрируют примерно 57% разрядов из очагов, расположенных на расстоянии $R \leq R_{эф}$.

Грозорегистраторы [2, 33, 37, 52—55, 83, 86, 97, 99, 106, 111, 125, 126, 128, 137, 138] представляют собой пороговую схему, на которую поступает сигнал с Г-образной или вертикальной штыревой антенны. В некоторых типах приборов сигнал, принятый антенной, предварительно усиливается и фильтруется. На выходе прибора обычно устанавливается самописец, регистрирующий количество принятых разрядов. Чувствительность прибора по полю зависит не только от чувствительности пороговой схемы, но и от его входной цепи (рис. 3.1) и частотной характеристики.

Поскольку в разных странах и даже в одной стране применяются грозорегистраторы различных типов и отсутствует стандартная методика калибровки порогового уровня, данные этих приборов трудно сопоставить, если не определен их эффективный радиус действия. Поэтому в настоящее время особенно актуален вопрос о разработке методики экспериментального определения величины эффективного радиуса действия грозорегистратора — счетчика местных грозных разрядов.

В работе [2] приведены основные параметры грозорегистраторов, используемых различными авторами как в СССР, так и за рубежом.

Ф. Хорнер [107] в докладе на IV Международной конференции по атмосферному электричеству говорил о возможности использования данных, полученных с помощью грозорегистраторов, для предсказания погоды, в климатологии, при изучении радиопомех, оценке вероятности поражений линий электропередачи, изучении атмосферного электричества, исследовании пространства радиоволн и пр.

Действительно, грозорегистраторы широко используются во многих странах [44]. По данным Международной комиссии по большим электрическим системам, в 12 странах, в том числе и в СССР, они используются для подсчета числа ударов на землю с целью определения вероятности повреждения линий электропередачи.

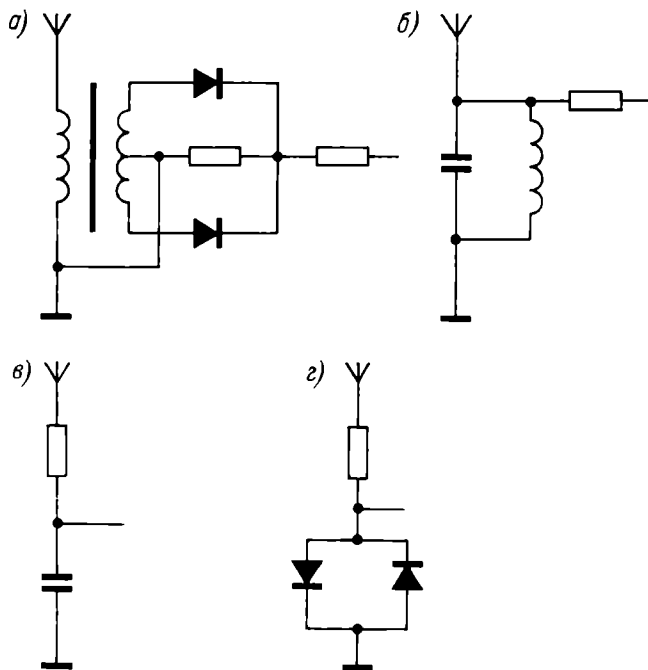


Рис. 3.1. Входные цепи грозорегистраторов.

a — резонансный вход ($f_p=63$ кГц), *б* — упрощенный резонансный вход (узкополосный, $f_p=17$ кГц), *в* — вход как у грозорегистратора типа Пирса—Голда, распространенного за границей, *з* — входная цепь широкополосного грозорегистратора.

В США как индикаторы грозовой деятельности работают модифицированные счетчики Сулливана—Уэллса.

В Японии грозорегистраторы используются на сети станций для получения реальных характеристик грозовой активности с целью организации грозозащиты промышленных силовых устройств и для получения оценок удаленности грозовых фронтов от места наблюдения.

В Голландии с целью изучения грозовой деятельности работает сеть из 15 грозорегистраторов, перекрывающих всю площадь страны.

В СССР грозорегистраторы используются для проведения научных исследований по определению закономерностей грозо-

вой деятельности в различных физико-географических условиях, для составления карт числа грозовых разрядов на единицу площади, для установления некоторых статистических закономерностей атмосфериков.

Ограничитель дальности действия грозопеленгатора. Используя распределение амплитуд грозовых разрядов, можно решить задачу пеленгования грозовых очагов в районе, ограниченном определенным радиусом действия. Необходимость такого ограничения, в частности, возникает, когда грозопеленгатор предполагается использовать совместно с метеорологическим радиолокатором для повышения эффективности и оперативности обнаружения грозовых очагов. В этом случае требуется, чтобы вероятность пеленгования грозовых очагов за пределами дальности действия радиолокатора была минимальной, так как в противном случае будут создаваться ситуации, аналогичные «ложным тревогам».

Для решения поставленной задачи необходимо ввести в грозопеленгатор устройство [10, 12], эффективно ограничивающее его дальность действия и вместе с тем не снижающее существенно количество запеленгованных гроз в рабочей области. Таким устройством может быть пороговая схема, аналогичная схемам, используемым в работах [38, 51, 56, 98, 113], для одного канала, срабатывающая при достижении амплитудой сигнала определенного порогового уровня и управляющая при этом формированием или индикацией пеленгационного сигнала. Для ограничителя дальности важно выбрать рабочую частоту, содержащуюся в спектре излучения молниевых разрядов, затухание на которой за пределами рабочей зоны было бы значительно интенсивнее, чем на частоте, используемой для пеленгования (7 кГц). В соответствии с кривыми распространения наземной волны (рис. 1.15) рабочую частоту для ограничителя дальности с радиусом действия 300 км целесообразно выбрать в диапазоне 60—100 кГц. В работах [56, 113] для амплитудных дальномеров также выбран этот диапазон. Для определения вероятностных характеристик порогового устройства, работающего как ограничитель дальности, все пространство разобьем на три зоны:

зона 1 — рабочая, ограниченная радиусом R_1 ;

зона 2 — промежуточная (или зона пониженной ответственности), лежащая между радиусами R_1 и R_2 ($R_2 > R_1$);

зона 3 — дальняя, лежащая между радиусами R_2 и R_3 ($R_3 > R_2$).

Радиус R_3 соответствует расстоянию, на котором прием излучения молниевых разрядов при выбранном пороговом уровне имеет весьма малую вероятность.

Задача сводится к определению вероятности обнаружения гроз в каждой из зон, т. е. к проверке трех статистических гипотез:

1. Гипотеза H_1 — гроза находится в рабочей зоне ($0 \leq r \leq R_1$).
2. Гипотеза H_2 — гроза находится в промежуточной зоне ($R_1 \leq r \leq R_2$).
3. Гипотеза H_3 — гроза находится в дальней зоне ($R_2 \leq r \leq R_3$).

Вероятность принять грозу с расстояния $r > R_3$ практически равна нулю.

Распределение амплитуд атмосфериков в точке приема, находящейся на расстоянии R_0 от источника грозовых разрядов, определяется выражением (1.1). Используя зависимость напряженности поля от расстояния вида (3.1) и введя обозначение $\bar{R} = R/R_0$, для плотности распределения амплитуд атмосфериков в точке, находящейся на расстоянии R (при $R > R_0$) от источника, можно записать

$$f(U_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(U+k \ln \bar{R})^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.8)$$

Предполагая равновероятное распределение гроз по площади, для условной плотности вероятностей амплитуд атмосфериков, согласно гипотезе 1 получим выражение

$$f(U/H_1) = \frac{1}{\pi \bar{R}_1^2 \sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\bar{R}_1} e^{-\frac{(U+k \ln \bar{R})^2}{2\sigma^2}} 2\pi \bar{R} d\bar{R}, \quad (3.9)$$

где $\pi \bar{R}_1^2$ — площадь (в единицах R_0), охватываемая окружностью с радиусом $\bar{R}_1 = R_1/R_0$, а $2\pi \bar{R} d\bar{R}$ — элемент площади, заключенный между окружностями с радиусами \bar{R} и $\bar{R} + d\bar{R}$.

Используя подстановку $\bar{R} = e^t$ и произведя несложные преобразования, для распределения амплитуд атмосфериков, согласно первой гипотезе, получим выражение

$$f(U/H_1) = \frac{2e^{2\left(\frac{\sigma^2}{k_1^2} - \frac{U}{k_1}\right)}}{\bar{R}_1^2 k_1} \left\{ \frac{1}{2} + \Phi_0\left(\frac{k_1}{\sigma} \ln \bar{R}_1 - \frac{2\sigma}{k_1} + \frac{U}{\sigma}\right) \right\}. \quad (3.10)$$

Аналогичным путем получены формулы для распределения амплитуд атмосфериков во второй и третьей зонах:

$$f(U/H_2) = \frac{2e^{2\left(\frac{\sigma^2}{k_2^2} - \frac{U}{k_2}\right)}}{(\bar{R}_2^2 - \bar{R}_1^2) k_2} \left\{ \Phi_0\left(\frac{k_2}{\sigma} \ln \bar{R}_2 - \frac{2\sigma}{k_2} + \frac{U}{\sigma}\right) - \Phi_0\left(\frac{k_2}{\sigma} \ln \bar{R}_1 - \frac{2\sigma}{k_2} + \frac{U}{\sigma}\right) \right\}; \quad (3.11)$$

$$f(U/H_3) = \frac{2e^{\left(\frac{\sigma^2}{k_3^2} - \frac{U}{k_3}\right)}}{(\bar{R}_3^2 - \bar{R}_2^2) k_3} \left\{ \Phi_0 \left(\frac{k_3}{\sigma} \ln \bar{R}_3 - \frac{2\sigma}{k_3} + \frac{U}{\sigma} \right) - \Phi_0 \left(\frac{k_3}{\sigma} \ln \bar{R}_2 - \frac{2\sigma}{k_3} + \frac{U}{\sigma} \right) \right\}, \quad (3.12)$$

где

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Задача о вероятности обнаружения грозы при единичном разряде с помощью порогового устройства сводится к определению вероятности превышения амплитудой данного атмосферика уровня, соответствующего пороговому значению U_n , для чего должен быть вычислен интеграл

$$P_{\text{обн}} = \int_{u_n}^{\infty} f(U/H_i) du, \quad (3.13)$$

где H_i — соответствует первой, второй или третьей гипотезам.

Задачу решаем численно, используя при больших значениях аргумента асимптотическое выражение

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{x} e^{-\frac{x^2}{2}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[1 - \frac{2!}{\pi (2\sqrt{2}x)^2} + \frac{4!}{2! (2\sqrt{2}x)^4} - \dots \right] \right\}. \quad (3.14)$$

При $x > 3$ для вычислений достаточно ограничиться одним первым членом разложения, что приводит к погрешности не более 5—6%.

Для проведения конкретного расчета необходимо задать значения параметров.

Радиусы для выбранных зон примем равными:

$R_1 = 300$ км — радиус действия метеорологических радиолокаторов, совместно с которыми может использоваться грозопеленгатор;

$R_2 = 400$ км — зона, в которой уже достаточно эффективно проявляется ограничение дальности действия;

$R_3 = 700$ км — за пределами этого расстояния маловероятен прием разрядов.

Соответственно для указанных зон были приняты следующие значения коэффициентов k , характеризующих ослабление электромагнитного поля с расстоянием на частоте 60 кГц: $k_1 = 1,0$; $k_2 = 1,2$; $k_3 = 1,6$. Значения k были определены путем аппроксимации ломаной линией кривой распространения, рассчитанной для частоты 60 кГц по методике [41] при $\sigma_0 = 10^{-2}$ См/м (подобной кривым, представленным на рис. 1.15).

Для расчетов примем величину σ равной 8 дБ, что хорошо согласуется с данными работы [59].

На рис. 3.2 приведены графики распределений амплитуд атмосфериков для зон 1, 2 и 3, рассчитанные для указанных выше

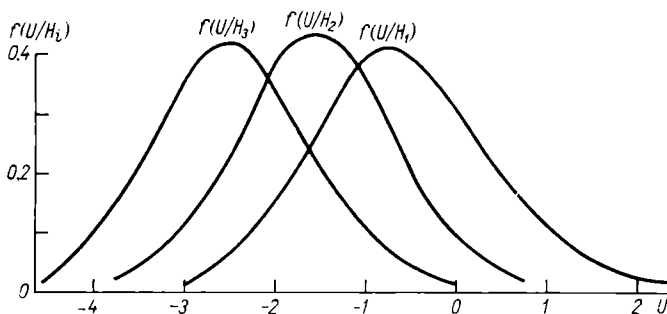


Рис. 3.2. Графики распределения амплитуд атмосфериков.
 $f(U/H_1)$ — для зоны 1, $f(U/H_2)$ — для зоны 2, $f(U/H_3)$ — для зоны 3.

условий по формулам (3.10), (3.11), (3.12). Как и следовало ожидать, они имеют характер нормального закона распределения, так как каждая кривая представляет собой сумму случай-

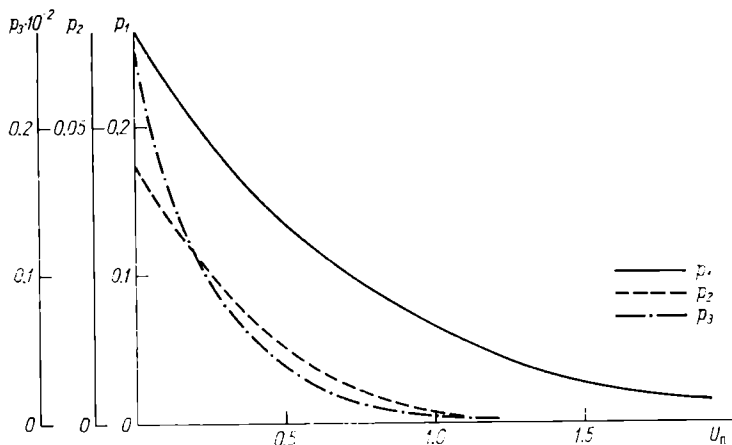


Рис. 3.3. Графики вероятности обнаружения грозы при единичном разряде.

p_1 — для зоны 1, p_2 — для зоны 2, p_3 — для зоны 3.

ных процессов (распределение амплитуд грозовых разрядов от гроз в каждой зоне), каждый из которых подчиняется нормально-логарифмическому закону распределения (распределение амплитуд грозовых разрядов для каждой грозы).

На рис. 3.3. приведены графики вероятности обнаружения грозы при единичном разряде для зон 1, 2 и 3, рассчитанные для указанных выше условий по формуле (3.13).

Величина $p_{обн}$ характеризует вероятность нахождения грозы в соответствующей зоне, когда об этом событии судят по одному разряду. Однако если событие (разряд) происходит n раз, вероятность того, что амплитуда хотя бы одного разряда превзошла пороговый уровень, будет определяться выражением

$$P_{обн} = 1 - (1 - p_{обн})^n. \quad (3.15)$$

Задавшись вероятностью обнаружения гроз $P_{обн1}$ в зоне 1, из формулы (3.15) можно определить $p_{обн1}$. Затем по графикам рис. 3.3 определить пороговое значение U_n и соответствующие значения $p_{обн2}$ и $p_{обн3}$, по которым с помощью формулы (3.15) найти вероятности обнаружения гроз в зоне 2 ($P_{обн2}$) и в зоне 3 ($P_{обн3}$). Для решения поставленной задачи необходимо знать количество разрядов, которое можно ожидать в грозовом процессе с достаточно высокой вероятностью.

Как указывалось в гл. 1 [31], среднее количество разрядов в грозе за 30-минутный интервал наблюдения, найденное из экспериментальных данных, равно 40—50. Грозовой очаг создает поток случайных событий (разрядов), для которых естественно считать справедливым распределение Пуассона, поскольку здесь рассматривается статистическая оценка по большому количеству гроз:

$$w(x, N) = e^{-N} \frac{N^x}{x!}, \quad (3.16)$$

где N — среднее число разрядов за срок наблюдения, x — количество разрядов.

По таблице для распределения Пуассона можно определить, что при $N=40$ разрядов с вероятностью $P > 0,96$ можно ожидать, что в среднем в грозе будет не менее 30 разрядов за 30 мин.

В табл. 3.1 приведены значения вероятностей обнаружения грозы в зонах 1, 2, 3 по одному разряду ($p_{обн}$) и по 30 разрядам ($P_{обн}$) для двух вариантов расчета, соответствующих значениям $p_{обн1} = 0,08$ (экспериментально найденная величина) и $p_{обн1} = 0,095$.

Таблица 3.1

Вероятности обнаружения гроз в зонах

Зона	Вариант 1		Вариант 2	
	$p_{обн}, n=1$	$P_{обн}, n=30$	$p_{обн}, n=1$	$P_{обн}, n=30$
1	0,08	0,92	0,095	0,95
2	0,003	0,086	0,005	0,14
3	0,00008	0,002	0,00012	0,004

Учитывая, что вероятное количество гроз, определенных в каждой зоне, пропорционально площади зоны и вероятности обнаружения, для процентного соотношения обнаруженных гроз между зонами можно написать следующие выражения:

$$P_1 = \frac{P_{\text{обн1}} \bar{R}_1^2 \cdot 100}{P_{\text{обн1}} \bar{R}_1^2 + P_{\text{обн2}} (\bar{R}_2^2 - \bar{R}_1^2) + P_{\text{обн3}} (\bar{R}_3^2 - \bar{R}_2^2)} \% \quad (3.17)$$

$$P_2 = \frac{P_{\text{обн2}} (\bar{R}_2^2 - \bar{R}_1^2) \cdot 100}{P_{\text{обн1}} \bar{R}_1^2 + P_{\text{обн2}} (\bar{R}_2^2 - \bar{R}_1^2) + P_{\text{обн3}} (\bar{R}_3^2 - \bar{R}_2^2)} \% \quad (3.18)$$

$$P_3 = \frac{P_{\text{обн3}} (\bar{R}_3^2 - \bar{R}_2^2) \cdot 100}{P_{\text{обн1}} \bar{R}_1^2 + P_{\text{обн2}} (\bar{R}_2^2 - \bar{R}_1^2) + P_{\text{обн3}} (\bar{R}_3^2 - \bar{R}_2^2)} \% \quad (3.19)$$

Данные о процентном распределении между зонами количества обнаруженных гроз, соответствующие вариантам 1 и 2 в табл. 3.1, приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Распределение количества обнаруженных гроз (%) между зонами

Вариант расчета	Вероятность обнаружения в зоне 1, %	Зона		
		1	2	3
1	92	92,8	6,7	0,7
2	95	88,4	10,3	1,3

Из данных табл. 3.1 и 3.2 следует, что изменение порогового уровня таким образом, чтобы вероятность обнаружения гроз в рабочей зоне увеличилась с 92 до 95%, приводит к увеличению процента гроз, запеленгованных за пределами этой зоны с 7,4 до 11,6%. Уменьшать вероятность обнаружения гроз ниже 92—90% также нежелательно. Таким образом, для данных, положенных в основу расчета, найденное значение вероятности обнаружения гроз можно считать близким к оптимальному.

Аналогичным образом был произведен расчет вероятностных характеристик ограничителя дальности действия с радиусом $R_1 = 150$ км. При этом пространство было разбито на следующие четыре зоны:

Зона 1	$0 < R_1 < 150$ км
Зона 2	$150 < R_2 < 300$ км
Зона 3	$300 < R_3 < 400$ км
Зона 4	$400 < R_4 < 700$ км

Результаты расчета приведены в табл. 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3

Вероятности обнаружения гроз в зонах при $n=30$ разрядам

Зона	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
	$p_{\text{обн}}=0,095, n=1$	$p_{\text{обн}}=0,08, n=1$	$p_{\text{обн}}=0,06, n=1$
1	0,950	0,918	0,845
2	0,302	0,236	0,164
3	0,044	0,044	0,044
4	0,002	0,002	0,002

Таблица 3.4

Распределение количества обнаруженных гроз (%) между зонами

Вариант расчета	Вероятность обнаружения в зоне 1, %	Зона			
		1	2	3	4
1	95,0	47	44,5	6,8	1,7
2	91,8	51	39,5	7,6	<1,9
3	84,5	56	32	9,1	<2,9

Из табл. 3.4 видно, что уменьшение радиуса действия ограничителя дальности приводит к ухудшению характеристик (значительно увеличивается количество гроз, обнаруженных за пределами радиуса действия ограничителя дальности). Это объясняется тем, что количество гроз на площади радиусом 150 км существенно меньше, чем количество гроз за ее пределами, и тем, что для расстояния 150 км кривая затухания на частоте 60 кГц не имеет резкого спада. Можно попытаться выбрать другую рабочую частоту, так чтобы интенсивность затухания на этой частоте была больше, чем на частоте 60 кГц. Однако из кривых распространения (рис. 1.15) видно, что изменение ослабления сигнала на частоте 500 кГц также не имеет резкого спада на расстояниях до 150 км.

Как будет показано в гл. 4, экспериментальные характеристики грозопеленгатора с ограничителем дальности хорошо совпадают с расчетными. Это позволяет рекомендовать приведенную методику для их расчета.

Некоторыми авторами [44] высказывалось предположение, что наблюдения с помощью однопороговых грозорегистраторов с радиусом действия 15 км смогут заменить визуальные наблюдения за грозами, проводящиеся на метеостанциях, а грозорегистраторы с радиусом действия 100—200 км будут использованы для сбора данных о грозовой деятельности на больших площадях

(район, обслуживаемый зональной гидрометеорологической обсерваторией).

Как видно из вышеприведенного анализа работы однопорогового устройства, вторая задача может быть решена вполне удовлетворительно. Что касается первой задачи, то в этом случае использование грозорегистратора, имеющего малый радиус действия (около 15 км), окажется неэффективным, так как грозорегистратор либо будет принимать очень большое количество разрядов от гроз за пределами радиуса действия, либо, если его сильно загрузить, будет пропускать разряды от ближних гроз.

Для повышения точности наблюдений с помощью грозорегистраторов за ближними грозами предлагается отсчет количества разрядов вести не от нуля, а от некоторого эмпирически найденного минимального числа срабатываний прибора [42].

Ограничитель дальности [10] состоит из ненаправленной штыревой антенны, резонансного усилителя, пикового детектора и пороговой схемы.

Сигнал, принятый штыревой антенной, усиливается резонансным усилителем, контур которого настроен на частоту 60 кГц с полосой пропускания $2\Delta f = 4$ кГц. Пиковый детектор выделяет огибающую сигнала, которая запускает ждущий мультивибратор, когда величина сигнала превышает порог срабатывания мультивибратора, определяющий радиус действия ограничителя дальности. Сигнал с пороговой схемы может быть использован для стробирования пеленгационного сигнала грозопеленгатора.

Многopороговые амплитудные анализаторы. Рассмотрим многopороговый амплитудный анализатор, который используется в качестве дальномера и позволяет по распределению количества принятых разрядов по дискретным пороговым уровням определить, какой градации расстояния соответствует данный грозовой очаг. При этом выясним, каким образом должны быть выбраны пороги, чтобы при ограниченном статистическом материале (количество разрядов, принятых из данного грозового очага) можно было получить максимальную вероятность обнаружения гроз, максимальную вероятность правильного выбора градации расстояний, а следовательно, минимальную вероятность ошибок, и каким критерием следует пользоваться при выборе градации дальности на основании распределения количества разрядов, зарегистрированных пороговыми устройствами.

На рис. 3.4 приведены дифференциальные распределения вероятностей при различных значениях «скачков» уровней $\Delta u = k\sigma$ (для $k = 0,5; 0,75; 1,0; 1,2; 1,5$).

Согласно рисунку, можно сделать предварительный вывод о том, что с увеличением скачка Δu облегчается задача разделения соседних градаций. Провести разделение, по-видимому, легче на участках $(i - 1) - i$ или $i - (i + 1)$, так как здесь отмечается наибольшее изменение пороговых вероятностей. При этом следует учитывать, что скачок уровня Δu определяет вели-

чину градации расстояний в логарифмическом масштабе. Например, при $\Delta u = \sigma = 8$ дБ изменения пороговых уровней и, следовательно, градаций расстояний будут различаться в 2,5 раза в зоне, где напряженность электромагнитного поля меняется обратно пропорционально расстоянию.

При решении задачи будем исходить из предпосылки нормально-логарифмического распределения амплитуд атмосфериков и использовать следующую модель [11]:

— в фиксированном месте находится одиночный грозовой очаг;

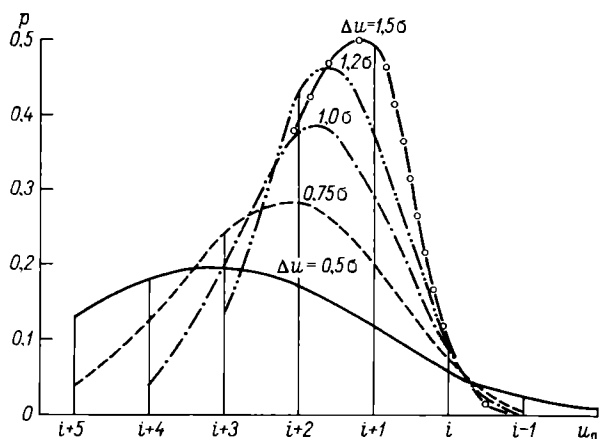


Рис. 3.4. Дифференциальные распределения вероятностей $\ln E$.

— разность пороговых уровней в логарифмическом масштабе — величина постоянная, $\Delta u = \text{const}$;

— разбивка уровней производится в обе стороны от некоторого i -того уровня, причем этому уровню соответствует пороговая вероятность p_i , т. е. вероятность того, что атмосферик, принятый из грозового очага на i -том интервале расстояния, превысит указанный уровень;

— вероятность того, что атмосферик, принятый из грозового очага на i -том интервале расстояния, превысит более грубый $(i-1)$ -й порог, будет (p_{i-1}) .

Вероятность принять i -тым пороговым устройством m разрядов при N разрядах в грозе может быть определена по биномиальной формуле

$$\mathcal{P}_i(m, N) = C_N^m p_i^m (1 - p_i)^{N-m}, \quad (3.20)$$

так как последовательные разряды можно рассматривать как независимые события.

Вероятность принять не менее n разрядов — кумулятивная вероятность — определяется выражением

$$\mathcal{P}_i(N \geq m \geq n) = \sum_{m=n}^{m=N} C_N^m p_i^m (1-p_i)^{N-m}. \quad (3.21)$$

Если определять расстояния до грозы по двум дискретным значениям распределения разрядов на $(i-1)$ -м и i -том пороговых устройствах, то при наличии не менее a_0 зарегистрированных ими разрядов можно ввести следующие вероятностные характеристики:

вероятность обнаружения грозы

$$P_{\text{обн}} = \mathcal{P}_i(n \geq a_0); \quad (3.22)$$

вероятность правильного определения градации дальности

$$P_{\text{пр. опр}} = \mathcal{P}_i(n \geq a_0) - \mathcal{P}_{i-1}(n \geq a_0); \quad (3.23)$$

вероятность выбора младшей градации, т. е. вероятность минусовой ошибки,

$$P_- = \mathcal{P}_{i-1}(n \geq a_0); \quad (3.24)$$

вероятность пропуска грозы и выбора старшей градации

$$P_{\text{пр}} + P_+ = \mathcal{P}_i(n < a_0). \quad (3.25)$$

Для выполнения расчетов необходимо знать количество разрядов в грозе N , выбрать значение порогового уровня u_i и интервал Δu .

Если исходить из среднего числа разрядов $N=40$ за 30-минутный срок наблюдения, то с вероятностью 0,9 количество разрядов в отдельной грозе, согласно распределению Пуассона, будет находиться в пределах 30—50. Были выбраны пороговые уровни $u_i=1,3\sigma$; $1,1\sigma$; $0,9\sigma$ и интервалы $\Delta u=0,75\sigma$; $1,0\sigma$ и $1,2\sigma$.

Рассчитанные по этим данным вероятностные характеристики для критериев $a_0=1$ и $a_0=2$ приведены в табл. 3.5. Из анализа результатов расчета следует, что вероятностные характеристики улучшаются с увеличением порогового интервала. Лучший вариант получается при $u_i=1,3\sigma$ и $\Delta u=1,2\sigma$. Однако с увеличением порогового интервала увеличиваются градации расстояний. По имеющимся данным, величина стандартного отклонения близка к 8 дБ [58]. При этом выбор интервала $\Delta u=1,0\sigma$ позволяет определять расстояние в пределах дискретных значений, различающихся в 2,5 раза, например: 0—30, 30—75, 75—187 км и т. д.

Если переход от $\Delta u=0,75\sigma$ к $\Delta u=1,0\sigma$ приводит к существенному увеличению вероятности правильного определения расстояния, то повышение Δu до $1,2\sigma$ уже не дает столь значительного выигрыша. Поэтому целесообразно принять интервал Δu равным $1,0\sigma$. Интервал $\Delta u=1,0\sigma$ был выбран в работе [60], значение σ было принято равным 6 дБ, при этом была получена шкала расстояний, несколько отличная от используемой в амплитудном дальномере [51, 56].

Таблица 3.5

Вероятностные характеристики многопорогового амплитудного дальномера

Δu	N	$u_i = 1,3\sigma$				$u_i = 1,1\sigma$				$u_i = 0,9\sigma$			
		$P_{обн}$	$P_{пр. опр}$	P_-	$P_{пр} + P_+$	$P_{обн}$	$P_{пр. опр}$	P_-	$P_{пр} + P_+$	$P_{обн}$	$P_{пр. опр}$	P_-	$P_{пр} + P_+$
При критерии $a_0 = 1$													
0,75 σ	30	0,896	0,482	0,414	0,104	0,982	0,404	0,558	0,038	1,0	0,282	0,718	0
	40	0,95	0,441	0,509	0,05	0,987	0,324	0,663	0,013	1,0	0,185	0,815	0
	50	0,997	0,388	0,589	0,023	0,996	0,253	0,743	0,004	1,0	0,121	0,875	0
1,0 σ	30	0,923	0,646	0,277	0,074	0,984	0,570	0,414	0,016	1,0	0,422	0,578	0
	40	0,967	0,616	0,357	0,033	0,993	0,483	0,510	0,007	1,0	0,337	0,663	0
	50	0,986	0,569	0,417	0,014	0,998	0,409	0,589	0,002	1,0	0,257	0,743	0
1,2 σ	30	0,934	0,764	0,170	0,066	1,0	0,723	0,277	0	1,0	0,586	0,414	0
	40	0,973	0,753	0,220	0,027	1,0	0,649	0,351	0	1,0	0,491	0,509	0
	50	0,989	0,722	0,267	0,011	1,0	0,583	0,417	0	1,0	0,411	0,589	0
При критерии $a_0 = 2$													
0,75 σ	30	0,670	0,566	0,104	0,330	0,854	0,651	0,203	0,146	1,0	0,632	0,368	0
	40	0,836	0,673	0,163	0,164	0,935	0,630	0,305	0,065	1,0	0,491	0,509	0
	50	0,887	0,659	0,228	0,113	0,974	0,570	0,404	0,026	1,0	0,371	0,629	0
1,0 σ	30	0,735	0,690	0,045	0,265	0,929	0,825	0,104	0,071	1,0	0,777	0,227	0
	40	0,860	0,787	0,073	0,140	0,959	0,795	0,164	0,041	1,0	0,695	0,305	0
	50	0,929	0,824	0,105	0,071	0,987	0,759	0,228	0,013	1,0	0,596	0,404	0
1,2 σ	30	0,753	0,738	0,015	0,247	1,0	0,955	0,045	0	1,0	0,896	0,104	0
	40	0,880	0,854	0,026	0,120	1,0	0,927	0,073	0	1,0	0,837	0,163	0
	50	0,942	0,922	0,020	0,058	1,0	0,895	0,105	0	1,0	0,772	0,228	0

При критерии $a_0=1$ лучшие результаты получаются при выборе порогового уровня $u_i=1,3\sigma$, а при критерии $a_0=2$ оптимальным оказывается пороговый уровень $u_i=1,1\sigma$.

Для обеспечения высокой вероятности обнаружения гроз целесообразно считать грозу обнаруженной, если принят хотя бы один разряд и определена градация расстояния по критерию $a_0=1$. Когда разрядов принято больше, для определения расстояния можно пользоваться критерием $a_0=2$. Приемлемое совмещение общих критериев получается при выборе рабочей точки $u_i=1,3\sigma$.

Статистические характеристики амплитудного способа определения расстояния могут изменяться под влиянием следующих причин:

— пороговые уровни не соответствуют выбранным пороговым вероятностям;

— стандартное отклонение нормально-логарифмического распределения отличается от расчетного;

— число разрядов в грозе отличается от расчетного;

— в одном азимутальном секторе находятся две и более грозные ячейки.

По данным табл. 3.5 можно судить о влиянии на вероятностные характеристики многопорогового амплитудного дальномера изменения параметров грозового процесса и аппаратуры.

Изменение пороговых уровней приводит к смещению рабочей точки. Изменение u_i от $1,3\sigma$ до $1,1\sigma$ соответствует изменению порогового напряжения на 21,5%. При этом не происходит недопустимого изменения вероятностных характеристик дальномера. Следовательно, для обеспечения стабильных характеристик дальномера достаточно задать стабильность пороговых уровней в пределах $\pm 10\%$.

Выше при расчетах пороговая вероятность p_i была принята равной 0,09. Если увеличивать p_i , то при выбранной градации расстояний резко возрастает вероятность ошибки; уменьшать p_i также не очень целесообразно, так как падает $P_{\text{пр. опр.}}$. Допустимы колебания p_i в обе стороны около 0,02. Если изменить p_i до 0,01 или до 0,38, то это вызовет соответственно смещение шкалы дальности на минус или плюс одну градацию. Но столь большое смещение пороговых уровней вряд ли возможно, так как оно соответствует ошибке в установке порогов на ± 8 дБ.

До сих пор предполагалось, что σ — величина постоянная. Допустим, что она может несколько изменяться от грозы к грозе. Изменение σ будет аналогично изменению порогового интервала. При интервале $\Delta u=8$ дБ расчетным интервалам Δu , равным $0,75\sigma$; $1,0\sigma$; $1,2\sigma$, будут соответствовать следующие значения σ : 10,6; 8; 6,7 дБ. Изменение числа разрядов в грозе в пределах доверительных интервалов, ограниченных вероятностью 0,9, не вызывает недопустимого ухудшения вероятностных характеристик дальномера (см. табл. 3.5). Наличие в одном азимуталь-

ном секторе нескольких грозовых ячеек аналогично увеличению числа разрядов в грозе. Чтобы избежать ухудшения вероятностных характеристик, в данном случае целесообразно при визуально-статистической оценке результатов ограничить азимутальный сектор угловым размером одной грозовой ячейки в каждой градации по дальности.

На рис. 3.5 приведен пример возможной реализации многопорогового амплитудного анализатора [38]. Амплитудный анализатор состоит из вертикальной штыревой антенны 1, усилителя 2 с трансформатором на выходе. Три выходные обмотки трансформатора подсоединены к выпрямителям 3, 4, 5, сигналы с которых запускают одностабильные мультивибраторы 6, 7, 8 и

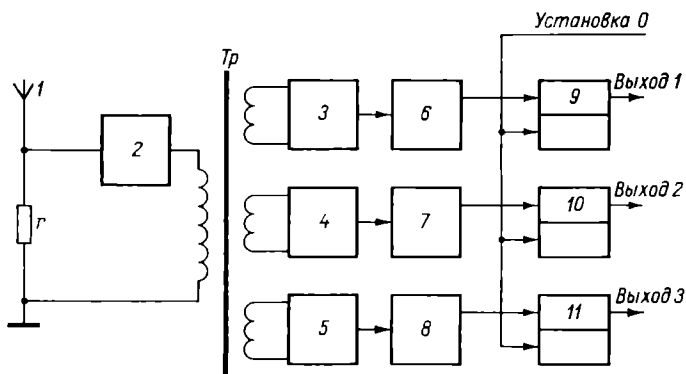


Рис. 3.5. Структурная схема трехдиапазонного регистратора гроз [38].

1 — непараллельная штыревая антенна, 2 — усилитель с трансформатором на выходе, 3, 4, 5 — выпрямители, 6, 7, 8 — одностабильные мультивибраторы, 9, 10, 11 — триггеры.

триггеры 9, 10, 11. Для установки первоначального нулевого положения предусмотрена подача специального сигнала на вход схемы. Выходная информация регистрируется на перфоленте. Ниже представлены пороговые уровни и градации расстояний, принятые в многопороговом дальномере:

Пороговый уровень, В/м	40	12	2
Градация расстояния, км	0—20	20—50	50—200

Примечание. Значение последнего порога согласуется с данными [113]. По измерениям Пирса, напряженность поля при удалении от источника на 100 км равна 3 В/м.

Разработанный в ГГО многопороговый амплитудный анализатор [56] использовался совместно с грозопеленгатором для локализации грозовых очагов (см. гл. 4). Экспериментальные установки испытывались в течение нескольких лет в различных

условиях (равнина, горы), и были определены основные параметры такого дальномера [51]. Об аналогичном приборе, разработанном в Венгрии и имеющем 5 каналов, сообщается в работе [98].

Следует заметить, что исследования по выбору оптимальной рабочей частоты для амплитудных дальномеров не дали окончательного решения. Некоторые авторы рекомендуют переходить для малых расстояний на частоты 2,5—3 кГц [69], другие, наоборот, предлагают работать в диапазоне 0,5—1 МГц [116], однако большинство авторов останавливается на диапазоне 50—100 кГц, в котором работают существующие в настоящее время дальномерные устройства.

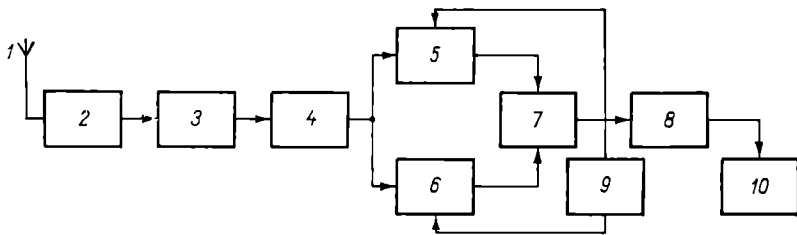


Рис. 3.6. Структурная схема дальномера, работающего по принципу измерения пикового значения амплитуд импульсов грозовых разрядов.

1 — антенна (длина 33 м, высота подвеса 8 м), 2 — двухкаскадный узкополосный усилитель с резонансным контуром на входе, 3 — линейный диодный детектор, 4 — импульсный предоконечный каскад (эмиттерный повторитель), 5, 6 — накопительные конденсаторы, 7 — схема «ИЛИ», 8 — оконечный каскад, 9 — устройство переключения конденсаторов на разряд, 10 — регистратор.

Устройство накопления пиковых значений амплитуд атмосфериков. В работе [116] сообщается о разработке индикатора расстояния до источника грозовых разрядов. Прибор работает по принципу измерения пикового значения амплитуд импульсов грозовых разрядов на частоте 500 кГц за промежутки времени 220 с. Структурная схема прибора приведена на рис. 3.6. Прибор состоит из антенны 1 длиной 35 м, подвешенной на высоте 8 м от уровня земли, узкополосного высокочастотного усилителя 2, линейного детектора 3, накопительных конденсаторов 5 и 6, оконечного каскада 8 и регистратора 10. Тарировочная характеристика прибора, указывающая на зависимость выходного напряжения от расстояния до источника атмосфериков, получена путем сравнения результатов наблюдений за грозами по прибору и по радиолокатору, работающему на длине волны $\lambda=10$ см. Среднее квадратическое отклонение выходного напряжения прибора от тарировочной кривой соответствовало ± 2600 м в диапазоне расстояний 0—274 км. На расстоянии 10 км от источника рассчитанная по экспериментальным данным напряженность электрического поля атмосфериков ($f=500$ кГц, $\Delta f=4,8$ кГц) равна 3700 мкВ/м.

При приеме импульсов грозовых разрядов происходит усиление и детектирование сигналов, которыми заряжаются поочередно две накопительные емкости. Большее из напряжений на емкостях передается на выходной оконечный каскад 8 и регистратор. Каждая накопительная емкость разряжается через 220 с устройством переключения конденсаторов на разряд 9. Если источник грозовых разрядов удаляется, то в следующий промежуток времени накопительная емкость зарядится до меньшего значения напряжения; если же источник приближается — до большего значения напряжения.

По приведенным в работе [116] данным, описанный дальномер является наиболее точным указателем расстояния до грозовых очагов. Однако вызывает сомнение столь высокая точность локации грозовых очагов, поскольку калибровка прибора производилась по данным метеорадиолокатора, а в литературе [85, 94] имеются сообщения о том, что часто источники атмосфериков располагаются в областях, соседних с теми, где наблюдается максимальная интенсивность отражения радиоэхо. Кроме того, следует отметить, что метод оценки расстояния по пиковому значению амплитуды атмосфериков, полученному накоплением зарядов за некоторый интервал времени, позволяет определить расстояние только до ближайшей грозы и исключает возможность определения ее азимута при наличии нескольких грозовых очагов, расположенных на различных удалениях и различных направлениях, как это обычно бывает при грозовых ситуациях.

В заключение отметим следующее. Вероятностные характеристики амплитудных дальномеров в одних работах оценивались чрезмерно оптимистически [56], а в других, наоборот, пессимистически [13]. В последней работе в основном правильно сформулирована задача об определении зависимости вероятностных характеристик дальномера от изменения количества разрядов в грозе, от среднего квадратического отклонения распределения амплитуд и других факторов. Однако на изменения этих параметров не были наложены ограничения, основанные на статистических характеристиках грозового процесса, в результате чего авторы пришли к выводу о непригодности амплитудного метода вообще, что противоречит данным работ [11, 51, 56, 60, 113].

3.2. МЕТОД РАЗДЕЛЬНОГО АНАЛИЗА E И H СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛЯ

В основе данного метода оценки расстояния до источника грозовых разрядов лежит идея использования различных зависимостей электрической и магнитной составляющих поля от расстояния [45, 46].

Для области низких частот (до 100 кГц) и малых расстояний (до 100—120 км) выражения для вертикальной составляющей электрического поля и горизонтальной составляющей магнитного поля на основании формул (2.46) могут быть записаны в следующем виде:

$$E_z = \frac{e^{+jkR} I l}{4\pi\epsilon_0} \frac{\omega^2}{c^2 R} \left[\frac{1 + \frac{1}{j\omega k/c} - \frac{1}{\omega^2 \left(\frac{R}{c}\right)^2}}{j\omega} \right];$$

$$H_\varphi = -\frac{e^{+jkR} I l}{4\pi} \frac{\omega^2}{cR} \left[\frac{1 + \frac{1}{j\omega \frac{R}{c}}}{j\omega} \right]. \quad (3.26)$$

Если подать напряжения с приемных E - и H -каналов, не искажающих приведенные соотношения составляющих (3.26), на четырехполюсники (фильтры антитрасс) с коэффициентами передачи

в E -канале

$$k_E(j\omega) = -\frac{zj\omega}{\left[1 + \frac{1}{j\omega \frac{1}{z}} - \frac{1}{\omega^2 \left(\frac{1}{z}\right)^2} \right] \omega^2}, \quad (3.27a)$$

в H -канале

$$k_H(j\omega) = -\frac{\beta j\omega}{\left[1 + \frac{1}{j\omega \frac{1}{\beta}} \right] \omega^2}, \quad (3.27b)$$

то, подобрав для некоторого расстояния R_0 параметры четырехполюсников таким образом, чтобы

$$\beta = \alpha = \frac{c}{R_0}, \quad (3.28)$$

на выходе схем получим сигналы:

$$U_E = E_z \cdot k_E(j\omega) = -\frac{e^{-jkR} I l}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R_0^2} \frac{1}{c},$$

$$U_H = H_\varphi \cdot k_H(j\omega) = \frac{e^{-jkR} I l}{4\pi} \frac{1}{R_0^2}, \quad (3.29)$$

совпадающие с точностью до постоянного множителя.

Если расстояние, с которого пришел атмосферик, не соответствует параметру фильтров R_0 , то их отклики разойдутся (рис. 3.7), причем характер этого расхождения позволяет судить, в какую сторону произошла расстройка. Например, если атмосферик пришел с расстояния большего, чем то, на которое наст-

роен фильтр, то расстройка между откликами фильтров всегда положительная и растет со временем, при условии равенства чувствительностей обоих трактов и амплитудных множителей в выражениях (3.29). Если же атмосферик пришел с расстояния меньше того, на которое настроен фильтр, расхождение откликов меняет знак. Указанный характер расхождения отмечается независимо от вида проходящего атмосферика, меняется только

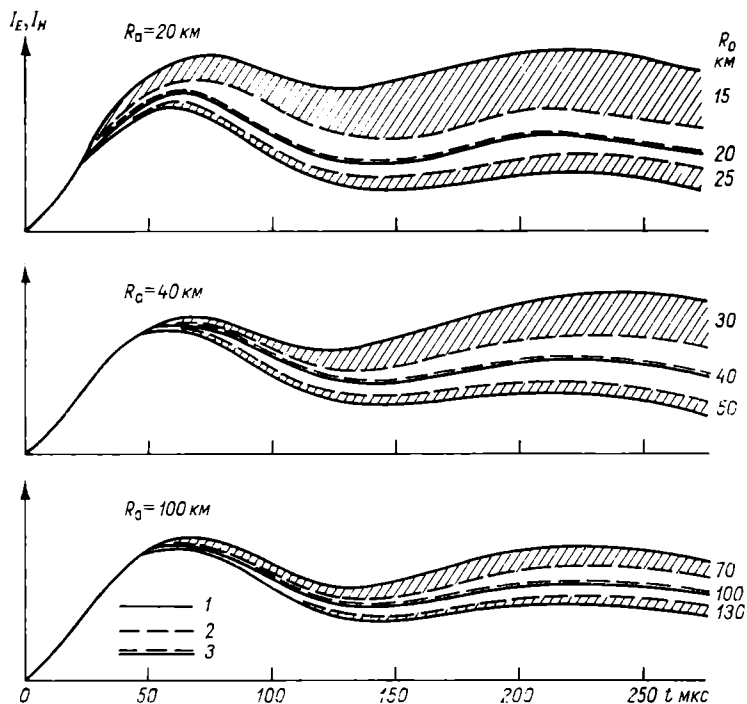


Рис. 3.7. Изменение формы откликов I_E и I_H фильтров k_E и k_H в зависимости от расстояния, с которого пришел атмосферик R_0 , и расстояния, на которое настроены фильтры R_0 .

его форма и абсолютное значение. Используя пару сопряженных (по параметрам) фильтров, можем создать альтернативный селектор дальности, дающий ответ на вопрос, с большего или меньшего расстояния, чем то, на которое настроены оба фильтра, пришел атмосферик. Применяя набор из нескольких пар подобных фильтров, настроенных на различные расстояния, можно получить информацию о дальности в пределах выбранных градаций.

В качестве фильтров E и H с характеристиками, соответствующими выражениям (3.27а) и (3.27б), могут быть использованы простейшие четырехполюсники, схемы которых приведены

на рис. 3.8. Для выполнения условий настройки и сопряжения фильтров параметры схем с учетом выражения (3.28) должны соответствовать равенствам:

для фильтра в E -канале

$$\alpha = \frac{r}{L}; \quad (3.30a)$$

для фильтра в H -канале

$$\beta = \alpha = \frac{1}{rC}; \quad (3.30б)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \alpha. \quad (3.30в)$$

Обеспечить отклики фильтров в E - и H -каналах дальнего номера одинаковой величины оказывается трудно по следующим при-

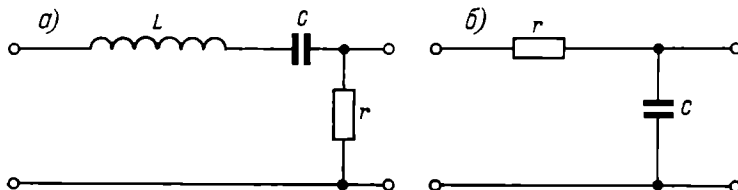


Рис. 3.8. Четырехполюсники, используемые в качестве фильтров-антитрасс.

a — в E -канале, b — в H -канале.

чинам. Для приема горизонтальной составляющей H -поля при любом направлении прихода атмосферика используются две ортогональные рамочные антенны с последующим суммированием сигналов. Диаграмма по суммарному сигналу отличается от круговой. В связи с этим непосредственное сравнение амплитуд сигналов в обоих каналах привело бы к ошибке. Обойти это затруднение можно путем анализа первых нулевых переходов откликов фильтров, взаимное положение которых определяется характером расхождения откликов и не зависит от абсолютного значения сигналов в E - и H -каналах. Требования к входным трактам рассматриваемого устройства определяются спектральными особенностями регистрируемых сигналов и частотными характеристиками фильтров-антитрасс.

Основное различие откликов фильтров на воздействие атмосфериков, приходящих с расстояний, превышающих 30—50 км, обусловлено различием амплитудно-частотных характеристик фильтров:

$$|K_E(x)| = \frac{x}{\sqrt{x^2 + (1 - x^2)^2}}; \quad |K_H(x)| = \frac{1}{\sqrt{1 + x^2}}, \quad (3.31)$$

где $x = 2\pi f/\beta$; $\beta = c/R_0$.

Это различие становится заметным начиная с $x \leq 3$. Например, если фильтры настроены на расстояния 25, 50, 75 и 100 км, то значению $x=3$ соответствуют частоты 3,8; 1,9; 1,27; 0,955 кГц. Следовательно, входные тракты должны передавать без искажений низкие частоты. Обеспечить это требование можно, шунтируя рамочную антенну низкоомным сопротивлением и применяя в E -канале входное устройство с высоким входным сопротивлением (от 1 до 10 МОм в зависимости от типа вибратора). Для повышения действующей высоты рамочной антенны приходится увеличивать ее площадь, так как увеличение числа витков выше некоторой оптимальной величины приводит к ухудшению частотных характеристик.

Применяя рамочную антенну диаметром 80 см и с числом витков $N=270$, можно получить при нагрузке 50 Ом действующую высоту $h_d=0,4$ мм и нижнюю граничную частоту $f_n=30$ Гц. Остальные элементы входных устройств не отличаются какими-либо особенностями и должны только обеспечивать помехозащищенность устройства от сетевых наводок и тождественность частотных характеристик обоих трактов (с точностью 5% по амплитуде и до 1° по фазе в полосе частот от 100 Гц до 10—15 кГц).

Основные погрешности дальномера обусловлены неточностью фиксации положения нулевого перехода. Оценим эти погрешности, исходя из откликов K_E и K_H фильтров-антитрасс на воздействие сигналов различного вида. При расчете воспользуемся интегралами типа свертки

$$U_{E,(H)}(t) = \int_0^t h_{E,(H)}(\tau) s(t-\tau) d\tau, \quad (3.32)$$

где $s(t)$ — входной сигнал; $h_{E,(H)}(\tau)$ — импульсные характеристики фильтров.

Для получения с достаточной точностью нулей откликов необходимо при численном интегрировании брать очень мелкий шаг по времени. Поэтому численные расчеты целесообразно проводить, используя выражение для разности $R(t)$ откликов фильтров:

$$R(t) = (\alpha - \beta) \int_0^t I(t-\tau) e^{-\frac{3\tau}{2}} \left(-e^{-\frac{\beta\tau}{2}} + \cos \frac{\sqrt{3}}{2} \beta\tau + \frac{3 + 2 \frac{\alpha - \beta}{\beta}}{\sqrt{3}} \sin \frac{\sqrt{3}}{2} \beta\tau \right) d\tau, \quad (3.33)$$

где $I(t)$ — эквивалентный ток источника.

Рассчитывая $R(t)$ в окрестности нулей функции $I(t)$, можно при малом объеме машинного времени получить оценки с высокой точностью.

Конкретные расчеты проводились для аппроксимации тока в виде

$$I(t) = I_0 e^{-at} \sin(at)^b.$$

Основным параметром аппроксимации с точки зрения проводимых оценок является a , значение которого определяет длительность полуволны $I(t)$. Изменяя a от $0,5 \cdot 10^6$ до $0,5 \cdot 10^5$ (при $b=0,445$), можно менять длительность первой полуволны от 25 до 250 мкс. Эти значения определяют практически возможные вариации экспериментальных кривых $I(t)$.

В качестве иллюстрации на рис. 3.9 приведено семейство линий, полученных для $d=1$ и $a=1,8 \cdot 10^5$ и характеризующих за-

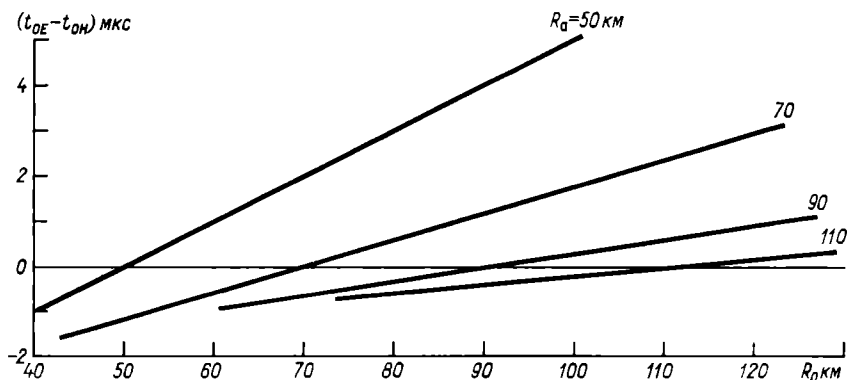


Рис. 3.9. Расхождение нулевых переходов откликов фильтров-антитрасс для различных расстояний до источника (R_a).

висимость абсолютного расхождения нулевых переходов откликов фильтров от величины расстройки между значениями расстояний, с которых приходят атмосферерики (R_a), и расстояний, на которые настроены фильтры (R_0). По мере удаления источника разрядов расхождение, соответствующее одной и той же величине относительной расстройки ($R_a - R_0/R_a$), заметно убывает.

Пользуясь такого рода расчетами и задаваясь фиксированными значениями аппаратурной погрешности определения разности нулевых переходов $\Delta t = t_{0E} - t_{0H}$, можно построить кривые, ограничивающие область расстояний до источника, не разрешаемых дальномером. Такие кривые приведены на рис. 3.10 для $\Delta t = 0,5$ мкс. Внешние границы зоны неопределенности решения (кривые 1 и 2) соответствуют крайним значениям параметров аппроксимации тока $I(t)$. Как показывают результаты экспериментальной регистрации эквивалентных токов молниевых разрядов, наиболее вероятные значения длительности первых полуволн тока лежат в окрестности 120 мкс. Этим значениям соответствует зона неопределенности, границы которой ле-

жат примерно посередине между кривыми 1 и 2. Кривые на рис. 3.10 дают возможность выбрать градации расстояний, удовлетворяющие требованиям точности их определения. Например, можно задаться значением вероятности перекрытия соседних интервалов. При равномерной шкале градаций ошибки в основ-

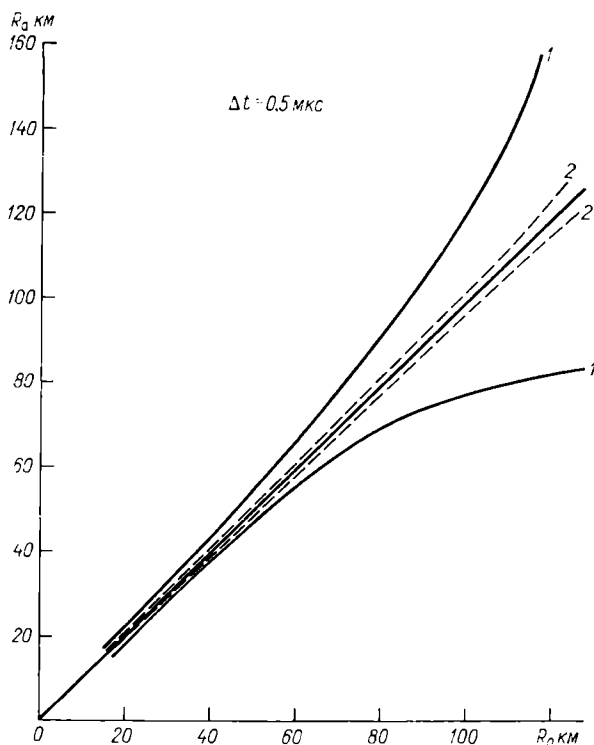


Рис. 3.10. Пределы ошибок определения расстояния до источника гроз при фиксации нулевых переходов с точностью 0,5 мкс.

1 — для $\alpha = 0,5 \cdot 10^5$, 2 — для $\alpha = 0,5 \cdot 10^6$.

ном появляются за счет градаций, близких к верхнему пределу оцениваемого диапазона расстояний. При разбиении расстояния 0—70 км на градации по 10 км вероятность ошибиться на ± 1 градацию не превышает 0,1. В принципе с уменьшением расстояния ширину градаций можно уменьшать, соответственно будет повышаться точность оценки расстояния, которая с 40—50 км может быть не хуже 5%. Однако при использовании дальномера для оценки местоположения грозовых очагов, если учесть, что средние размеры грозовой ячейки в поперечнике составляют

10—15 км, выбирать градации меньше 10 км вряд ли целесообразно.

Заметим, что если дискретность по расстоянию не слишком велика, то по расхождению нуль-переходов E - и H -каналов имеется возможность судить о степени рассогласования параметрического расстояния фильтров и расстояния до источника ЭМИ. Применив схему анализа этих рассогласований, можно построить дальномер с плавным указанием расстояний до источника разряда. Однако зависимость погрешности отдельных измерений от параметров атмосферика (длительности первой полуволны) в этом случае также сохраняется и для определения расстояния до грозы требуется некоторый статистический материал. Согласно описанному алгоритму определения расстояния, необходимо найти порядок следования нулевых переходов откликов для каждой пары фильтров-антитрасс и выделить ту пару фильтров, в которой расхождение нулей минимально, определив таким образом градацию расстояния, соответствующую расстоянию, с которого пришел атмосферик.

Структурная схема возможной реализации E — H -дальномера приведена на рис. 3.11. Дальномер с четырьмя градациями расстояния состоит из антенных устройств, входных усилителей, согласующих входные цепи с антеннами, фильтров верхних частот, предварительных усилителей, четырех пар фильтров-антитрасс, схем выделения нулевых переходов и схемы анализа и выбора градации дальности.

Сигнал в E -канале с выхода всенаправленной штыревой антенны 1, принимающей вертикальную составляющую электрического поля, пройдя согласующий усилитель 4, поступает на фильтр верхних частот 7.

В H -канале сигнал с выхода установленных взаимно перпендикулярно рамочных антенн 2 и 3, принимающих горизонтальную составляющую магнитного поля, пройдя согласующие усилители 5 и 6, также поступает на фильтры верхних частот 8 и 9.

Фильтры верхних частот введены во входные устройства для подавления сетевых наводок и идентификации частотных характеристик входных цепей.

Сигналы, усиленные в предварительном усилителе 10 E -канала и усилителе 12 H -канала, поступают на фильтры-антитрассы 14—21, настроенные на четыре дискретные градации расстояния, и далее на схемы выделения нулевых переходов 23—30 и счетчики 31—38, которые устанавливаются в исходное состояние импульсом установки нуля, вырабатываемым схемой 22. При появлении на втором входе счетчиков импульса, соответствующего выделенному нулевому переходу, сигналы со счетчиков, установленных после настроенных на одинаковое расстояние фильтров-антитрасс E - и H -каналов, поступают на отдельные входы триггеров 40—43. Состояние триггеров, связанное с порядком следования нулевых переходов откликов определен-

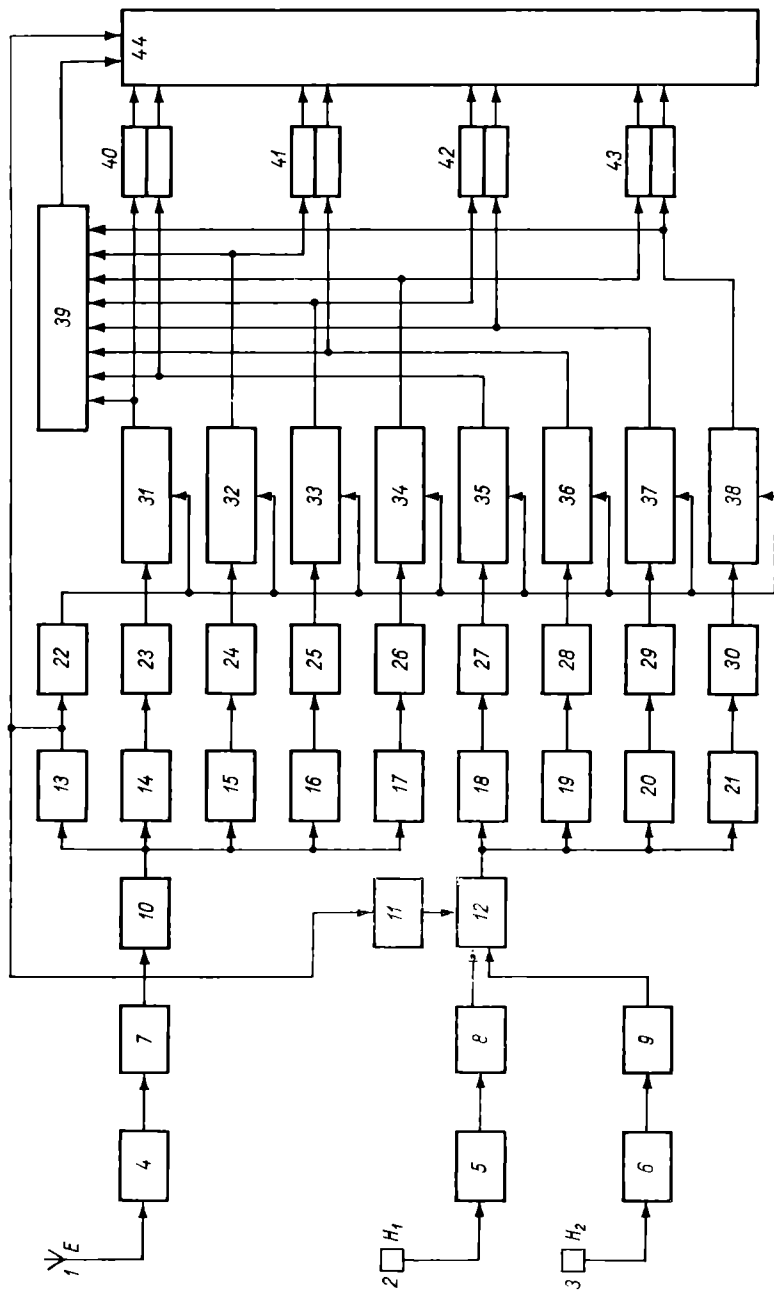


Рис. 3.11. Структурная схема $E-H$ -дальномера.

1 — штыревая антенна E -канала, 2, 3 — рамочные антенны H -канала, 4, 5, 6 — согласующие усилители, 7, 8, 9 — дифференцирующие фильтры высоких частот, 10 — предварительный усилитель, 11 — схема коммутации знака коэффициента усиления, 12 — сумматор, 13 — компаратор, 14, 15, 16, 17 — фильтры-антиграссы E -канала, 18, 19, 20, 21 — фильтры-антиграссы H -канала, 22 — схема установки нуля, 23, 24, 25, 26 — схемы выделения нулевых переходов в E -канале, 27, 28, 29, 30 — схемы выделения нулевых переходов в H -канале, 31, 32, 33, 34 — счетчики в E -канале, 35, 36, 37, 38 — счетчики в H -канале, 39 — схема разрешения отсчета, 40, 41, 42, 43 — триггеры, 44 — схема анализа.

ных пар фильтров, анализируется в схеме 44 и однозначно характеризует ту градацию расстояния, которой соответствует пришедший атмосферерик.

Со схемы анализа сигнал, указывающий выбранную градацию расстояния, может быть выдан для индикации на цифровую лампу ИН-2 или использован для подсвета пленки в нужной градации при сопряжении дальномера с грозопеленгатором и совместной индикации угломерно-дальномерной информации в виде яркостной отметки на электронно-лучевом индикаторе.

Синхронизация работы устройства осуществляется сигналом из E -канала, взятым после предварительного усилителя 10 для запуска компаратора 13, который генерирует импульс большой длительности. Передний фронт этого импульса выделяется схемой 22 и используется для установки нуля счетчиков, а задний фронт управляет схемами 11 и 12, обеспечивающими коммутацию диаграммы направленности тракта приема магнитной составляющей поля.

Сигналы с выходов счетчиков подаются на входы схемы разрешения отсчета 39, которая формирует сигнал, разрешающий отсчет дальности, только в том случае, когда все счетчики сработали. Схема 44 анализирует состояние триггеров только при наличии сигналов с выхода компаратора и схемы разрешения отсчета.

Наряду с рассмотренным выше E — H -дальномером разрабатывается дальномер, позволяющий производить непрерывную оценку дальности до разряда. Как показывают расчеты [76], зависимость величины Δt — разности нулевых переходов откликов фильтров антитрасс t_{0E} и t_{0H} — от расстояния R_0 , на которое настроен фильтр, является монотонно растущей функцией (при увеличении R_0 и постоянной дальности до источника излучения R_a). Вид этой функции слабо зависит от параметра a аппроксимации эквивалентного тока разряда. Значение Δt обращается в нуль только при равенстве R_0 и R_a во всем диапазоне возможных вариаций форм разрядов. Учитывая вышесказанное, можем, производя интерполирование зависимостей $R_0 = f(\Delta t, R_a)$ по величинам Δt для определенного числа пар фильтров, настроенных на дальности $R_{01}, R_{02}, \dots, R_{0n}$, и определяя значение R_0 при $\Delta t = 0$, получить оценку искомой дальности до разряда. Аппаратурные видоизменения, вводимые в схему рассмотренного выше E — H -дальномера, связаны с добавлением интерполатора и решающего устройства. Оказывается [76], что даже в рамках линейной интерполяции при соответствующем выборе узлов интерполирования (расстояний, на которые настроены фильтры) удастся достичь неплохой точности определения расстояния. Так, при узлах интерполирования 10, 25, 50 и 100 км дальномер обеспечивает погрешность определения расстояния, не превышающую (за счет интерполирования) 10% в зоне 10—

100 км. При квадратичном интерполировании может быть достигнута значительно более высокая точность. Однако техническая реализация интерполятора существенно усложняется.

3.3. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ГРОЗОВЫХ ОЧАГОВ

Спектральный метод и метод, основанный на анализе ионосферных отражений, предназначались исследователями для оценки расстояния до грозových очагов, удаленных на 1000—2500 км.

Однако эти методы оказались практически малоэффективными. В последнее время делаются попытки исследовать возможности применения их для определения расстояния до более близких грозových очагов (от 100 км). Кратко остановимся на характеристике этих методов.

Спектральный метод. Суть спектрального метода заключается в использовании волноводного механизма распространения сигнала в канале земля—ионосфера [23, 24, 40, 92]. Как показано в гл. 1, зависимость напряженности поля от расстояния до источника разрядов при определенных условиях описывается в виде функции

$$E(f) = F(R, f) E_0(f) e^{-\alpha(f) R}, \quad (3.34)$$

где $F(R, f)$ — некоторый коэффициент, зависящий от расстояния и частоты; $E_0(f)$ — амплитуда напряженности электрического поля на частоте f непосредственно вблизи источника; $\alpha(f)$ — коэффициент затухания, зависящий от частоты; R — расстояние от источника грозových разрядов до пункта наблюдения.

Измеряя величину отношения амплитуд двух спектральных составляющих сигнала на частотах f_1 и f_2 , используя выражение (3.34), можно получить оценку искомого расстояния в виде

$$R = \frac{1}{\alpha_1(f_1) - \alpha_2(f_2)} \ln \left[\frac{E(f_1)/E_0(f_1)}{E(f_2)/E_0(f_2)} \right], \quad (3.35)$$

где в первом приближении $\xi = F(R, f_1)/F(R, f_2) \approx 1$.

Для реализации метода частоты необходимо выбрать таким образом, чтобы было справедливым одномодовое представление разложения сигнала по нормальным волнам, чтобы разница между $\alpha_1(f_1)$ и $\alpha_2(f_2)$ была по возможности большей и в то же время чтобы разброс соответствующего отношения амплитуд $E_0(f_1)/E_0(f_2)$ вблизи источника был минимальным.

Первоначально рабочие частоты выбирались в диапазоне 5—15 кГц [22, 25]. Однако для этого диапазона частот характеристика изменения поля (3.34) наблюдается начиная с расстояния 1000 км. В работах [23, 24] были выбраны рабочие частоты 1 и 2 кГц. Величина затухания $\Delta\alpha$ и отношение $E_0(f_1)/E_0(f_2)$

оценивались для выбранных частот путем обработки вычисленных спектров реальных атмосфериков. В результате для исходной зависимости, связывающей расстояние до грозы с измеряемым отношением спектральных составляющих атмосферика на частотах 1 и 2 кГц, нормированным по начальному спектру излучения молнии, предложено полуэмпирическое выражение

$$R = 215 \ln \left[\frac{E(f_1)}{E(f_2)} \cdot 2,5 \right]. \quad (3.36)$$

Методическая погрешность, заложенная в используемые принципы и связанная с изменениями свойств источника и вариациями параметров трассы распространения атмосферика, может достигать сравнительно больших значений, особенно для расстояний меньше 100 км.

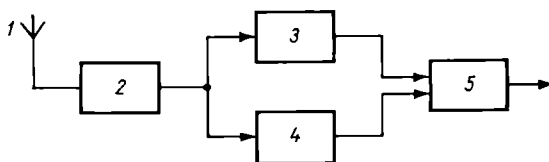


Рис. 3.12. Структурная схема спектрального дальногомера.

1 — штыревая антенна, 2 — усилитель, 3, 4 — нормирующие селективные усилители частот f_1 и f_2 , 5 — измерительный узел.

Анализ точностных характеристик метода [22] и экспериментальных данных показал, что ошибки измерения расстояния до грозы достигают 50% R для $R=100$ км, 30% R для 150 км, 25—10% R для 200—500 км. По оценкам, произведенным в работе [34], погрешности определения расстояния, обусловленные вариациями свойств источника и параметров трассы распространения атмосферика, имеют один порядок и для расстояния 200 км могут достигать 20—30%, они уменьшаются с увеличением расстояния.

Структурная схема одной из реализаций дальногомера [25] представлена на рис. 3.12. Атмосферик, принятый штыревой ненаправленной антенной 1, усиливается широкополосным усилителем 2, сигнал с которого поступает на входы нормирующих усилителей 3, 4, где выделяется спектральная составляющая соответствующей частоты f_1 и f_2 , пропорциональная спектральной плотности импульса грозового разряда на этой частоте. В измерительном узле 5 амплитудный детектор выделяет огибающую сигнала, которая преобразуется в прямоугольный импульс напряжения. Длительность импульса связана с максимальной амплитудой огибающей сигнала по логарифмическому закону. Преобразованные таким образом сигналы подаются на

схему, вырабатывающую разностный импульс напряжения, длительность которого оказывается пропорциональной дальности до регистрируемого грозового разряда.

Метод, основанный на анализе ионосферных отражений. При регистрации форм атмосфериков было замечено, что некоторые волновые формы принимаемых атмосфериков состояли из серии пиков, которые интерпретировались с помощью многоскачковой модели распространения электромагнитных волн. Согласно этой модели, сигнал в точке приема складывается из двух составляющих: земной (поверхностной)

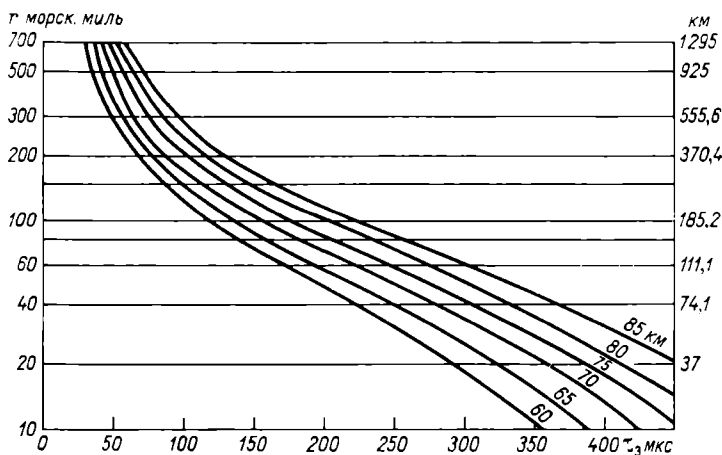


Рис. 3.13. График зависимости времени задержки от расстояния до грозового очага при различной высоте слоя D .

волны и несколько раз отраженной от ионосферного слоя D пространственной волны. При небольших расстояниях до грозы (100—300 км) земная волна и однократно отраженная волна в точке приема разделены заметным интервалом времени. Учитывать отражения более высоких порядков нецелесообразно ввиду их малости. Для однократно отраженной волны оценку расстояния до грозового очага можно производить по формуле [117]

$$\tau_3 = \frac{2}{c} \sqrt{h^2 + R_3(R_3 + h) \left(1 - \cos \frac{\vartheta}{2}\right)} - \frac{R}{c}, \quad (3.37)$$

где R — расстояние, проходимое земной волной; R_3 — радиус Земли; τ_3 — время задержки пространственной волны; h — эффективная высота ионосферного слоя D ; c — скорость света; ϑ — угол между направлениями на приемную станцию и источник сигнала относительно центра Земли.

Для ускорения расчетов соотношение (3.37) представлено на рис. 3.13 графиком зависимости времени задержки пространственной волны от расстояния до грозовых очагов при различных высотах слоя D . Экспериментально было обнаружено, что эффективная высота слоя D днем составляет 64 км, ночью 85 км. Наибольшую трудность встречает оценка времени запаздывания, так как для большинства атмосфериков отраженный сигнал накладывается на земной и разделить их с требуемой точностью возможно в ограниченном интервале расстояний (100—200 км). Для атмосфериков типа 5 это разделение возможно при расстоянии до источника разрядов 400—500 км. Существенным фактором, облегчающим измерение времени задержки, является изменение фазы сигнала на 180° при отражении пространственной волны от слоя D [117]. В результате отраженный сигнал приходит в точку приема с обратной полярностью по отношению к прямому сигналу и на ЭЛТ индикатора дальности образует провал на линии развертки, которая начинается с приходом земной волны. Время задержки, соответствующее отклонению максимальной амплитуды провала от начала линии развертки, считывается со специальной шкалы, расположенной на экране индикатора дальности.

В работе [135] по результатам систематических наблюдений сделан вывод, что формы атмосфериков, пригодные для определения τ_3 , встречаются довольно редко — всего в 5—10% от общего числа зарегистрированных атмосфериков, причем благоприятные условия имеются обычно только ночью. В работе [117] утверждается, что отражение от ионосферного слоя D возможно как ночью, так и днем и рассмотренный метод эффективен на расстояниях от 40 до 900 миль. Однако экспериментальные статистические данные не приводятся.

Из рассмотренных в разделах 3.1—3.3 методов дальнометрии гроз наиболее обстоятельно разработан метод амплитудной селекции, на основе которого в ГГО были созданы экспериментальные образцы грозопеленгаторов-дальномеров [56], послужившие прототипом современной аналогичной аппаратуры. Для расстояний меньше 100 км наиболее обнадеживающие результаты дает метод сравнительного анализа E и H составляющих полей, хотя при аппаратурной реализации он оказывается существенно сложнее амплитудного метода.

Возможность использования остальных методов для расстояний до 300 км вызывает сомнения из-за отсутствия достоверных экспериментальных данных и требует дальнейших исследований.

ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРЫ-ДАЛЬНОМЕРЫ

Рассмотренные в предыдущих главах методы пассивного определения местонахождения гроз из одного пункта, несмотря на некоторые недостатки, позволяют повысить эффективность существующих в настоящее время способов обнаружения гроз.

В оперативной практике Гидрометслужбы СССР для получения объективных сведений о полях облачности и связанных с ними опасных явлениях начинают широко использоваться данные радиолокационных наблюдений [72]. В отдельных районах страны создается сеть из специальных метеорологических радиолокаторов (типа МРЛ-1 и МРЛ-2), соединенных каналами связи с территориальными метеорологическими центрами.

На основании экспериментальных и теоретических исследований были выработаны методика радиолокационных наблюдений и критерии распознавания характеристик облачности и опасных явлений [14].

Радиолокационная информация о грозовых явлениях имеет вероятностный характер, т. е. не во всех случаях грозы удается обнаружить путем радиолокационных наблюдений. В табл. 4.1 приведены результаты оценки «метеорологической информативности» радиолокационных данных для летнего периода [30]. Под метеорологической информативностью понимается вероятность правильной интерпретации явления на основании радиолокационной классификации по сравнению с данными визуальных наземных наблюдений, которые принимаются за эталон.

Из таблицы видно, что на площади, ограниченной радиусом 150 км, при анализе радиолокационных данных нераспознанными остается 20% гроз, а на площади, ограниченной радиусом 200 км,— 35% гроз.

Проводившиеся исследования [16, 20, 21] показали, что одновременные радиолокационные и пеленгаци-

Таблица 4.1

Метеорологическая информативность радиолокационных данных

Явления	Расстояние, км			
	30	100	150	200
Грозы	1,00	0,90	0,80	0,65
Ливни	0,95	0,83	0,49	0,40
Обложные осадки	0,95	0,81	0,42	0,18
Облака	0,72	0,32	0,07	0,007

онные наблюдения дают возможность разделить грозы и ливни и повысить вероятность обнаружения гроз, так как грозопеленгатор, регистрируя ЭМИ молнии, позволяет оценить электрическое состояние облаков. Однако при этом необходимо, чтобы радиус действия грозопеленгатора соответствовал дальности действия радиолокатора, поскольку пеленгование гроз, находящихся за пределами рабочей зоны, создает ситуацию «ложной тревоги».

4.1. ГРОЗОПЕЛЕНГАТОР С ОГРАНИЧИТЕЛЕМ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ

Для совместной работы с метеорадиолокаторами любого вида был разработан грозопеленгатор типа ПАГ-1 [12, 19], имеющий ограничитель дальности действия, для которого в гл. 3 был сделан теоретический расчет вероятностных характеристик.

Структурная схема грозопеленгатора представлена на рис. 4.1. В грозопеленгаторе имеются два канала: азимутальный и ограничения дальности действия. Азимутальный канал позволяет однозначно определить направление на источник грозовых разрядов. Направление определяется путем сравнения амплитуд импульсных сигналов, принятых двумя взаимно перпендикулярными рамочными антеннами 1 и 7, диаграмма направленности которых имеет вид «восьмерки». Рамочные антенны выполнены на ферритовых сердечниках, что позволило значительно уменьшить их габариты и снизить антенный эффект. Сигналы, принятые рамочными антеннами, усиливаются в двух идентичных усилительных трактах 2 и 8. Для исключения двузначности предусмотрены синхронные детекторы 3 и 9, на которые поступает напряжение с выхода усилительных трактов и опорное напряжение, сформированное в схеме 12 из сигнала, принятого все-направленной в горизонтальной плоскости антенной (вертикальным симметричным вибратором 11).

Для увеличения динамического диапазона имеется двухступенчатая схема мгновенной автоматической регулировки усиления (МАРУ) 5. При превышении сигналом определенного уровня

происходит одновременное и одинаковое изменение коэффициента усиления в обоих усилительных трактах. Это достигается применением в нагрузке усилительных каскадов делителей напряжения с мостовыми схемами, коэффициент передачи которых скачкообразно меняется при срабатывании управляющей пороговой схемы.

Пеленгационные сигналы, имеющие на выходе синхронных детекторов вид квазиколоколообразных напряжений, в схемах 4 и 10, преобразуются в напряжения прямоугольной формы,

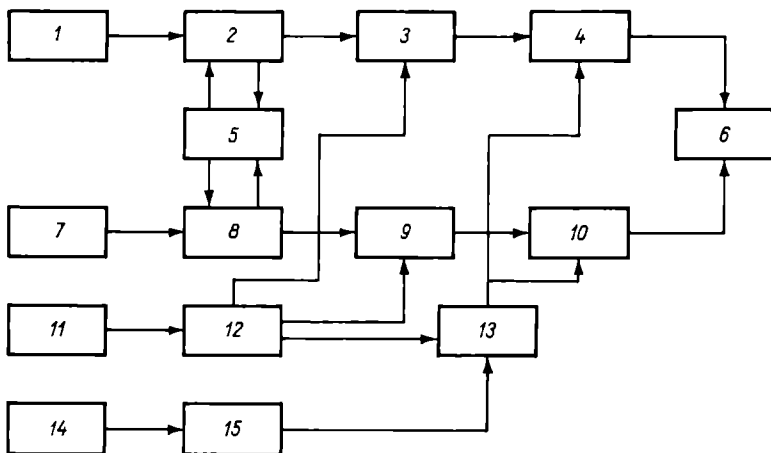


Рис. 4.1. Структурная схема грозопеленгатора ПАГ-1.

1, 7 — рамочные антенны, 2, 8 — идентичные усилительные тракты, 3, 9 — синхронные детекторы, 4, 10 — схемы преобразования квазиколоколообразного напряжения в напряжение прямоугольной формы, 5 — МАРУ, 6 — индикатор, 11, 14 — ненаправленные антенны, 12 — схема формирования опорного напряжения, 13 — схема совпадения, 15 — амплитудный анализатор.

пропорциональные косинусу и синусу угла между направлениями на север и на источник грозового разряда. Из этих напряжений в индикаторе 6 формируются пилообразные напряжения развертки. Пеленги на экране индикатора имеют вид радиальных линий, идущих от центра к краю экрана (рис. 4.2). Индикатор выполнен на потенциоскопической электронно-лучевой трубке типа 13ЛН-2, обладающей длительной «памятью». Таким образом обеспечивается отображение и запоминание пеленгационной информации в течение сеанса наблюдения (до 30 мин). Оператор освобождается от постоянного присутствия на рабочем месте и непрерывного снятия показаний пеленгов. В конце сеанса он производит считывание информации и «стирание» ее. Азимутальный канал настроен на частоту 7 кГц (полоса пропускания $2\Delta f = 500$ Гц). Чувствительность азимутального канала обеспечивает длину пеленга на половину радиуса экрана индикатора при напряженности поля 1,0—1,5 В/м.

Канал ограничителя дальности построен по принципу амплитудной селекции.

Антенна ограничителя дальности *14* — вертикальный симметричный вибратор с трансформаторным выходом — настроена на частоту 60 кГц, полоса пропускания $2\Delta f = 4$ кГц. В амплитудном анализаторе *15* усиленный и протектированный сигнал запускает пороговую схему, если он превышает величину порога ($u_{\text{п}} \approx 20$ В — по сигналу имитатора).

Пеленгационная информация формируется на выходе схем *4* и *10*, когда в спектре импульса грозового разряда одновре-

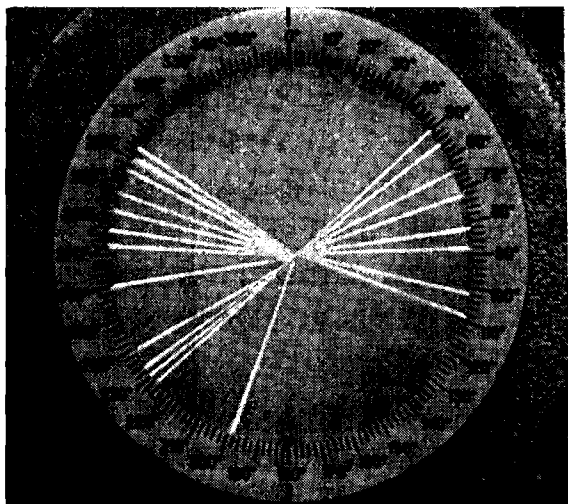


Рис. 4.2. Экран запоминающего индикатора грозо-пеленгатора ПАГ-1 с пленками на грозовые очаги.

менно присутствуют достаточной интенсивности составляющие (7 и 60 кГц), и только в этом случае с каскада совпадения *13* выдается импульс синхронизации для схем *4* и *10*.

Встроенная аппаратура контроля обеспечивает оперативный контроль работоспособности грозопеленгатора и его настройку.

Аппаратура грозопеленгатора представлена на рис. 4.3 и состоит из антенны азимутального канала, антенны ограничителя дальности и трехблочного шкафа грозопеленгатора. В верхнем отсеке шкафа размещен блок индикатора, в среднем — основной приемник грозопеленгатора и в нижнем отсеке — блок выпрямителей.

Грозопеленгатор ПАГ-1 имеет следующие технические характеристики:

— вероятность обнаружения гроз на расстоянии $R \leq 300$ км не менее 0,90;

- вероятность пеленгования дальних гроз на расстоянии $R > 400$ км не более 0,05;
- инструментальные ошибки по азимуту средняя квадратическая не более 3° , максимальная 7° ;
- динамический диапазон 18 дБ;
- время сохранения пеленгационной информации на экране запоминающего индикатора не менее 30 мин;
- трансляция пеленгационной информации на выносной индикатор по кабельной линии на расстояние до 1 км;
- время непрерывной работы 24 ч.

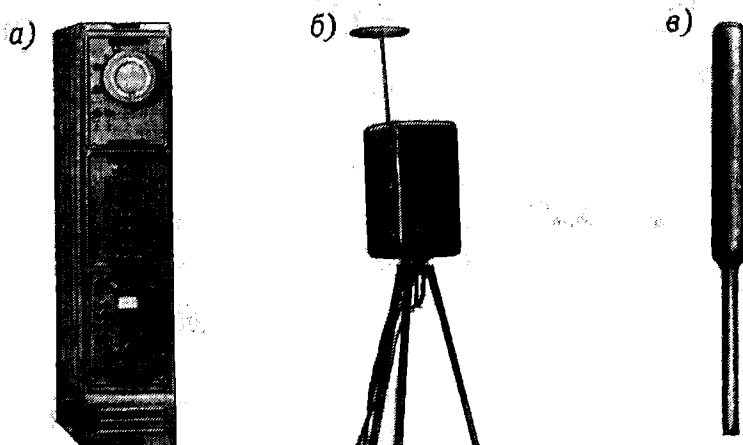


Рис. 4.3. Аппаратура грозопеленгатора.

а — трехблочный шкаф грозопеленгатора, *б* — антенна азимутального канала, *в* — антенна ограничителя дальности.

Об эффективности работы грозопеленгатора с ограничителем дальности действия можно судить по данным, приведенным в табл. 4.2.

Как видно из табл. 4.2, применение в грозопеленгаторе ограничителя дальности действия приводит к понижению вероятности запеленгованных дальних гроз с 35 до 9,3%.

В табл. 4.3 и 4.4 даны экспериментально полученные вероятностные характеристики грозопеленгатора ПАГ-1. Методика проведения эксперимента и оценки вероятностных характеристик изложена в разделе 4.7.

Из табл. 4.3 и 4.4 видно, что полученные экспериментально вероятностные характеристики близки к расчетным и подтверждают эффективность ограничителя дальности действия. Однако следует иметь в виду, что они обеспечиваются только при правильном выборе порогового уровня ограничителя дальности $u_{п.}$

Таблица 4.2

Расчетные и экспериментальные данные по вероятности обнаружения гроз грозопеленгатором ПАГ-1 с ограничителем дальности действия и без него

Характеристика данных	Вероятность обнаружения гроз в рабочей зоне, % ($R \leq 300$ км)	Запеленгованные грозы, %	
		в рабочей зоне ($R \leq 300$ км)	за ее пределами ($R > 300$ км)
Расчетные	92	92,6	7,4
Экспериментальные			
ПАГ-1 с ограничителем дальности	91	90,7	9,3
ПАГ-1 без ограничителя дальности	88	65	35

Таблица 4.3

Распределение по зонам (см. гл. 3) вероятного количества обнаруженных гроз (%)

Характеристика данных	Вероятность гроз, обнаруженных в рабочей зоне ($R \leq 300$ км)	Зона			Единичные пеленги на неустановленные источники
		$R \leq 300$ км	$300 \text{ км} \leq R \leq 400 \text{ км}$	$R > 400 \text{ км}$	
Расчетные	92,0	92,6	6,7	0,7	—
Экспериментальные					
1968 г.	91,2	90,7	4,7	3,2	1,4
1971 г.	93,7	88,9	3,5	1,9	5,7

Таблица 4.4

Экспериментально определенные вероятностные характеристики грозопеленгатора ПАГ-1 (1972 г., Белоруссия)

Зона	Вероятность обнаружения гроз, %		
	образец 1	образец 2	образец 3
$R \leq 300$ км	95,0	96,0	97,0
$300 \text{ км} \leq R \leq 400 \text{ км}$	6,0	7,0	2,0
$R > 400 \text{ км}$	1,7	1,6	3,2

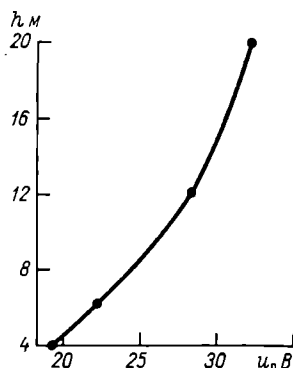
Примечание. Образец 1 установлен в ГМО г. Минска, образец 2 — в ЗГМО г. Гомеля, образец 3 — г. Бреста.

поскольку на эффективность действий штыревой антенны в значительной мере влияет высота ее установки над уровнем земли и электрические параметры самой земли. Наиболее существенным является влияние высоты подъема антенны над уровнем земли, и, хотя использование в антенне симметричного вибра-

тора уменьшило зависимость ее эффективности от высоты подъема, тем не менее значение порогового уровня следует корректировать в соответствии с полученной экспериментально зависимостью (рис. 4.4) порогового уровня ограничения дальности от высоты установки антенны в условиях равнинной местности [9]. Для устранения зависимости уровня сигнала от высоты установки антенны целесообразно использовать две ортогональные рамочные антенны, сигналы от которых суммируются в квадратуре. Однако это требует некоторого усложнения электрической схемы и увеличения усиления в приемном тракте, так как эффективность рамочных антенн ниже эффективности штыревых.

Для оценки эффективности совместного использования метеорологического радиолокатора и грозопеленгатора ПАГ-1 было

Рис. 4.4. Зависимость величины порога ограничения u_n от высоты установки антенны ограничителя дальности h для $R_{огр} \leq 400$ км (измерения напряжения производились импульсным вольтметром типа В4-2).



произведено [9] сопоставление радиолокационных данных о грозах с данными о грозах, обнаруженных визуально метеостанциями и постами, на которых были зарегистрированы пеленги по грозопеленгатору ПАГ-1. Сопоставление проводилось для трех зон: 0—100, 101—200, 201—300 км.

В табл. 4.5 представлены результаты обработки радиолокационных данных, полученных при анализе параметров радиоэхо по радиолокационным критериям [14, 62] для четырех пунктов наблюдения. В табл. 4.6 приведены результаты сопоставления радиолокационных и визуальных данных наблюдений о ливнях и грозах за 1968—1969 гг. на АМСГ Ленинград, Шоссейная [3].

Как видно из табл. 4.5 и 4.6, вероятность обнаружения гроз по МРЛ уменьшается с увеличением расстояния, что согласуется с данными табл. 4.1 [30]. В табл. 4.5 в 2,0—25,6% случаев классификация грозы произведена по критерию с низкой надежностью — 50—70% (обозначена (K)). Привлечение в этих случаях к анализу пеленгационной информации позволяет отделить ливни от гроз, поскольку наличие пеленгов на такие очаги является достаточным основанием для уверенного определения их как грозовых.

Таблица 4.5

Результаты обработки радиолокационных наблюдений за грозами

	Зона, км								Гомель, ЗГМО		
	101-200	201-300	0-100	101-200	201-300	0-100	101-200	201-300			
	Ленинград, Шоссейная		Брест, ЗГМО		Минск, ГМО						
Количество гроз, обнаруженных визуально и грозоопеленгатором ПАГ-1	135	214	57	86	96	116	294	258	67	106	94
Грозы, обнаруженные МРЛ, %	84,0	60,0	93,0	82,6	68,8	60,3	63,6	49,2	58,3	52,0	39,3
Из них:											
К., К)	66,0	58,0	77,2	57,0	44,8	44,8	55,1	39,9	43,4	35,0	24,4
(К)	18,0	2,0	15,8	25,6	24,0	15,5	8,5	9,3	14,9	17,0	14,9
Грозы, не обнаруженные МРЛ, %	16,0	40,0	7,0	17,4	31,2	39,7	36,4	50,8	41,7	48,0	60,7
Из них:											
\dot{V}	—	—	3,5	2,4	8,3	19,0	14,9	7,0	11,9	13,2	2,1
$H_{\max} \geq 8 \text{ км}$ $\lg Z < 1$	4,0	13,0	—	2,3	4,2	10,3	7,5	12,4	13,4	3,8	2,1
Радиоэхо без опасных явлений	12,0	27,0	3,5	12,7	18,7	10,4	14,0	31,4	16,4	31,0	56,5

Таблица 4.6

Результаты сопоставления радиолокационных и визуальных данных о грозах и ливнях. Ленинград, Шоссейная [3]

	Зона, км			
	0—100	101—200	201—300	0—300
Количество гроз по данным наземных наблюдений	428	376	518	1322
Данные МРЛ				
Количество гроз по МРЛ, подтвержденное наземными наблюдениями (гроза над метеостанцией)				
Σ	376	275	180	831
%	88	73	35	65
Количество ливней по МРЛ, которым соответствуют грозы, определенные визуально				
Σ	52	101	338	491
%	12	27	65	45
Количество гроз по МРЛ, которым соответствуют ливни, определенные визуально	190	168	38	396
Количество гроз по МРЛ, подтвержденных синоптической обстановкой (гроза между станциями)	266	340	186	792

В 2—19% случаев (табл. 4.5), а по данным П. А. Алленова и Р. М. Зражевской [3] (табл. 4.6) в 12—65% случаев визуально обнаруженные грозы классифицировались по радиолокационным критериям как ливни (∇). Кроме того, в 2,1—13,0% случаев (табл. 4.5) грозы пропускались в облаках, высота которых характерна для грозовых облаков ($H_{\max} \geq 8$ км), а отражаемость на верхнем уровне мала ($\lg Z < 1$). По данным работы [3], достаточно большое количество случаев визуально обнаруженных ливней классифицировалось как грозы (табл. 4.6), а обнаруженные по радиолокационным данным грозы (табл. 4.6) из-за редкой сети метеостанций не подтверждались и оправдывались только синоптической обстановкой. Экспериментальные данные по совместному использованию МРЛ и грозопеленгатора типа ПАГ-1 [9] показали, что в 16—38% случаев (на разных пунктах в зависимости от густоты сети метеостанций) грозовые очаги обнаруживались при сопоставлении радиолокационных и грозопеленгационных данных, подтверждались синоптической обстановкой, но не регистрировались метеостанциями.

Таким образом, во всех перечисленных выше случаях использование данных грозопеленгаторов позволяет более надежно и

оперативно произвести разделение ливня и грозы и обеспечивает повышение эффективности МРЛ по обнаружению гроз по данным табл. 4.5 в среднем на 15%, а по данным табл. 4.6 еще значительнее.

В табл. 4.7 приведены результаты экспериментальных исследований ограничителя дальности действия при пороговых уровнях, соответствующих радиусам ограничения $R_{огр}$ 400, 240 и 120 км.

Таблица 4.7

Вероятность обнаружения гроз (%) в рабочей зоне и за ее пределами

$R_{огр}$	Зона	
	$R < R_{огр}$	$R > R_{огр}$
400	88,5	3,0
240	75,0	21,5
120	74,0	58,5

Примечание. В зоне $R < R_{огр}$ вероятность обнаружения определяется отношением количества гроз, запеленгованных грозопеленгатором, к общему количеству зарегистрированных гроз в этой зоне. В зоне $R > R_{огр}$ вероятность обнаружения определяется отношением количества гроз, запеленгованных грозопеленгатором в этой области, к общему количеству запеленгованных гроз.

Приведенные в табл. 4.7 данные подтверждают вывод, сделанный на основании расчетов в гл. 3, о неэффективности ограничения дальности действия грозопеленгатора с помощью однопорогового устройства в зоне, где не наблюдается интенсивное увеличение затухания сигнала с расстоянием.

Следует обратить внимание на возможность уменьшения азимутальных ошибок при определении местоположения гроз, которое может быть получено путем сопоставления данных МРЛ с пеленгами ПАГ-1.

Известно, что вследствие высокой турбулентности в грозовых облаках местоположение грозы часто определяется по радиолокационным данным в соседней ячейке (пространство 30×30 км) [85]. По проведенной выборочной оценке (табл. 4.8), количество таких ошибок возрастает с 15—30% для зоны 0—100 км до 50—60% для зоны 200—300 км. Эта особенность радиолокационных наблюдений учитывается при кодировании информации о грозах, которое ведется по ячейкам пространства 60×60 км. Привлечение к анализу данных пеленгования позволяет уточнить азимутальное положение грозовых очагов.

Таблица 4.8

Количество случаев (%), при которых радиолокатор обнаруживает грозу в соседней дискретной ячейке (30×30 км)

Зона, км	Пункт	
	1	2
0—100	15	33
101—200	37	51
201—300	53	59

Примечание. За истинный азимут на грозу при анализе было принято азимутальное положение метеостанций, определяющих грозу.

Согласно проведенному анализу экспериментальных данных можно сделать вывод, что использование грозопеленгатора ПАГ-1 совместно с метеорологическим радиолокатором обеспечивает:

— увеличение вероятности обнаружения гроз в среднем на 13,7%;

— повышение надежности обнаружения гроз по радиолокационным критериям в среднем в 15% случаев;

— повышение оперативности обнаружения гроз, так как по данным грозопеленгатора ПАГ-1 определяются направления, в которых следует вести наблюдения в первую очередь;

— возможность уточнить азимутальное положение грозовых очагов;

— возможность в условиях хорошей погоды (и благоприятного синоптического прогноза) не включать метеорологический радиолокатор, если отсутствуют пеленги на индикаторе грозопеленгатора ПАГ-1, что позволит экономить его технические ресурсы.

4.2. ГРОЗОПЕЛЕНГАТОР С ОГРАНИЧЕНИЕМ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ И СЕКТОРНЫМ ДОКУМЕНТИРОВАНИЕМ

Для обслуживания местных воздушных линий и службы прогноза погоды в Японии разрабатывается грозопеленгатор [140], сочетающий в себе положительные качества катодного пеленгатора и секторного грозорегистратора. К разрабатываемому прибору предъявляются следующие требования: дальность действия 200 км, индикация направления на грозовой очаг в 10 секторах (по 36° каждый), обеспечение различения типов гроз в зависимости от преобладания разрядов на землю или межоблачных, для чего производится регистрация количества

принятых разрядов в каждом секторе на частотах 80 кГц (все разряды) и 3 кГц (разряды на землю).

Структурная схема прибора показана на рис. 4.5. Азимутальный канал работает по фазовому методу, описанному в гл. 2, и настроен на частоту 80 кГц (в будущем предполагают изменить частоту на 10 кГц). Сигнал принимается двумя взаимно перпендикулярными рамочными антеннами 1 и 2 и усиливается усилителями 4 и 5. Фазовращатели 7 и 8 обеспечивают сдвиг фаз на 90° между напряжениями в канале каждой рамочной

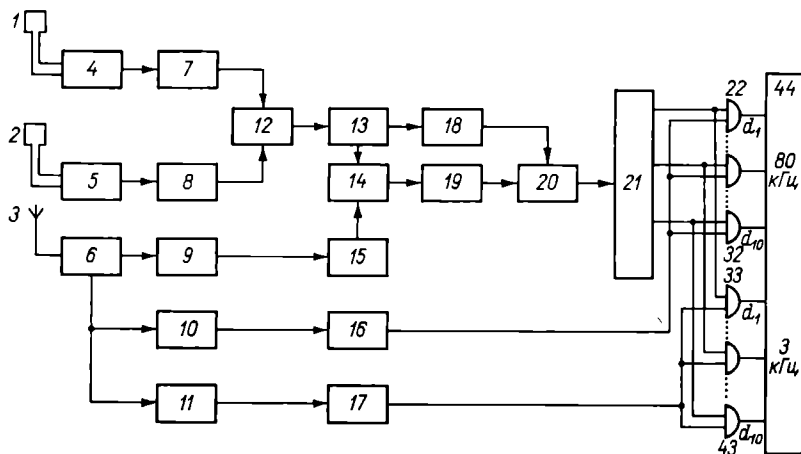


Рис. 4.5. Структурная схема грозопеленгатора [26].

1, 2 — рамочные антенны, 3 — ненаправленная штыревая антенна, 4, 5 — узкополосные усилители ($f_0=80$ кГц), 6 — широкополосный усилитель, 7, 8 — фазовращатели, 9, 10 — узкополосные усилители ($f_0=80$ кГц), 11 — узкополосный усилитель ($f_0=3$ кГц), 12 — сумматор, 13, 15, 16, 17 — триггеры Шмитта, 14 — бистабильный мультивибратор, 18 — одностабильный мультивибратор, 19 — преобразователь временной зависимости в амплитудную (генератор пилообразного напряжения), 20 — каскад задержки, 21 — анализатор амплитуды импульса, 22—43 — схемы совпадения «И», 44 — регистратор (самописец).

антенны, затем эти напряжения поступают на сумматор 12, где образуется напряжение $V_1 + V_2 = A \sin(\omega t + \varphi)$, воздействующее на триггер Шмитта 13. Сигнал $V_0 = B \sin \omega t$ с выхода ненаправленной антенны 3 усиливается широкополосным 6 и узкополосным 9 усилителями и воздействует на триггер Шмитта 15. Временной сдвиг импульсов триггеров 13 и 15 пропорционален углу φ между направлениями на источник сигнала и на север. Импульсами с триггеров Шмитта 13 и 15 запускается бистабильный мультивибратор 14, на выходе которого образуется импульсное напряжение, по длительности пропорциональное φ . В преобразователе 19 вырабатывается пилообразное напряжение, амплитуда которого пропорциональна φ . С помощью анализатора амплитуды импульса 21 происходит селекция напряжения, поступившего через каскад задержки 20, по 10 уровням, соответствующим азимутальным секторам $0-36, 36-72, \dots, 324-360^\circ$.

Для ограничения дальности действия грозопеленгатора и выделения типа разряда сигналы с ненаправленной антенны 3 усиливаются узкополосными усилителями (10 на частоте $f=80$ кГц и 11 на частоте $f=3$ кГц) и запускают триггеры Шмитта 16 и 17, если напряженность электромагнитного поля превышает 300 мкВ/м. С выхода триггеров Шмитта 16 и 17 сигналы поступают на схемы совпадения 22—32 для $f=80$ кГц и 33—43 для $f=3$ кГц, на вторые входы которых подается сигнал с выхода анализатора амплитуды импульса. При одновременном наличии сигналов на входах схемы совпадения срабатывает регистратор 44 грозы, соответствующий азимутальному сектору и типу разряда (при $f=80$ кГц считается, что имеются все типы разрядов, при $f=3$ кГц — разряды облако—земля).

Для оценки наличия грозы экспериментально были выработаны критерии грозоопасности в зависимости от числа зарегистрированных разрядов за 20 мин, которые приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Критерии грозоопасности в зависимости от частоты повторения атмосфериков [140]

	Количество атмосфериков за 20 мин		
	2	4	16
Гроза в радиусе:			
100 км	—	Возможна	Вероятна
200 км	Возможна	Вероятна	Вероятна

Разработка [140] очень интересна и перспективна, так как она является попыткой создать грозопеленгатор для ближней зоны с автоматизацией обработки результатов наблюдений и документированием. Однако секторы в 36° , в которых производится сбор и документирование данных о количестве принятых разрядов, велики для регистрации грозовых очагов, удаленных на расстояние 100—200 км, и могут приводить к большой азимутальной ошибке, особенно если грозовой очаг находится на границе раздела и попадает в два сектора. Поэтому предложенное устройство удобно использовать для обеспечения данными о наличии гроз таких отраслей народного хозяйства, в которых не требуется высокая точность по азимуту (например, служба пожарной охраны лесных массивов и др.). В подразделениях метеослужбы, обеспечивающих данными о грозах авиацию и другие отрасли народного хозяйства, в которых требуется более высокая азимутальная точность, особенно при сопоставлении данных грозопеленгатора и метеорологического радиолокатора, предпочтительнее использовать устройства типа ПАГ-1 или описанный выше грозопеленгатор с уменьшенным сектором.

4.3. ГРОЗОПЕЛЕНГАТОР С ДАЛЬНОМЕРОМ В ВИДЕ АМПЛИТУДНОГО МНОГОПороГОВОГО АНАЛИЗАТОРА

Грозопеленгатор с амплитудным многопороговым дальномером (анализатором) позволяет оперативно получить информацию о распределении грозовых очагов. При этом направление на грозовой очаг определяется по грозопеленгатору, а дальность — в пределах дискретных градаций по расстоянию по показаниям амплитудного дальномера (см. гл. 3).

Подобные устройства давно предлагались, разрабатывались и испытывались как в Советском Союзе [56], так и в других странах [97, 113]. Однако до выпуска промышленных образцов они не были доведены. В настоящее время началось промышленное освоение грозопеленгаторов-дальномеров.

Одной из ранних экспериментальных установок является разработанный в ГГО грозопеленгатор-дальномер [51, 56].

Азимутальный блок представляет собой обычный грозопеленгатор, имеющий две скрещенные рамочные антенны, установленные в направлениях север—юг и запад—восток и соединенные с аperiодическими усилителями. Штыревая антенна соединена с третьим усилителем. Электродвижущие силы, наведенные грозовым разрядом в рамочных и штыревых антеннах, подаются на контуры, настроенные на частоту 10 кГц, а с них на усилители. Сигналы с выходов усилителей рамочных антенн поступают на отклоняющие пластины ЭЛТ индикатора. Подсветка ЭЛТ осуществляется напряжением, снимаемым с выхода третьего усилителя, причем фаза этого напряжения установлена в таком соответствии с фазами выходных напряжений первых двух усилителей, что на экране ЭЛТ индикатора подсвечивается только половина эллипса, соответствующая истинному направлению на источник грозовых разрядов.

Блок дальности содержит пять пороговых схем, отрегулированных на разную чувствительность. Каждая пороговая схема соединена при помощи кабеля длиной 10 м со штыревой антенной длиной 3,5 м, поднятой на высоту 10 м. Емкость кабеля и входной трансформатор образуют резонансный контур, настроенный на рабочую частоту 60 кГц. Блок дальности, кроме пороговых схем, имеет счетчики числа принятых разрядов, амплитуда которых превысила порог срабатывания данной пороговой схемы, и индикаторные лампочки, указывающие, какая пороговая схема сработала.

Лампочка горит в течение 4—5 с, для того чтобы оператор успел снять отсчет азимута принятого атмосферика по шкале индикатора блока азимутов, а затем отсчет с блока дальности. В зависимости от амплитуды принятого разряда срабатывает столько пороговых схем, в скольких из них порог оказался ниже амплитуды сигнала. У всех сработавших схем загораются индикаторные лампочки. Оператор, снимая отсчет, оценивает

градацию дальности для принятого разряда по самой грубой сработавшей пороговой схеме.

Следует заметить, что прибор, описанный в работах [51, 56], имеет ряд недостатков: отсутствие совмещенной индикации информации об азимуте и дальности, необходимость непрерывного и синхронного снятия отсчетов, длительное (4—5 с) бланкирование входной информации, которое может привести к потере полезной информации.

Использование в индикаторе потенциалоскопической ЭЛТ типа 13 ЛН-2, которая применена в грозопеленгаторе ПАГ-1, в сочетании с логической схемой выбора «ближней» градации дальности и схемой совмещения пеленгационной и дальномерной информации позволяет устранить указанные выше недостатки. Выбор градации производится следующим образом: срабатывают все пороговые схемы, порог которых оказывается ниже уровня сигнала; логическая схема выдает запрет на все выходы пороговых схем, кроме самой грубой, соответствующей ближней градации дальности.

Совмещенная информация о пеленге и градации дальности получается в виде яркостной точки, угловое положение которой соответствует пеленгу, а радиальное отклонение находится в пределах выбранной градации дальности. В течение определенного срока (30 мин), заданного режимами «памяти» ЭЛТ, яркостные отметки сохраняются на экране индикатора. После визуальной оценки их распределения оператор стирает информацию с ЭЛТ нажатием кнопки, и индикатор снова начинает автоматическое накопление данных о распределении разрядов.

В табл. 4.10 приведены вероятностные характеристики [11] грозопеленгатора-дальномера, выполненного с учетом высказанных рекомендаций. В дальномере был установлен пороговый интервал $\Delta u = 8$ дБ и градации дальности: 0—13, 13—30, 30—90, 90—210, 210—420 км. Указанные градации дальности соответствовали следующим чувствительностям пороговых схем по полю: 0,9; 2,05; 5,1; 13,5; 33,7 В/м.

При сопоставлении полученных данных с расчетными (гл. 3) видно достаточно хорошее совпадение с результатом расчета для числа разрядов 30, рабочей точки $u_i = 1,3\sigma$ и $\Delta u = \sigma = 8$ дБ. Таким образом, есть основание полагать, что среднее наблюдаемое число разрядов в грозе несколько меньше, чем было принято при расчетах многопорогового анализатора (40—50). Частично это обстоятельство может быть объяснено тем, что один грозовой процесс мог быть разбит между соседними сроками наблюдения (по 30 мин) и начало процесса не совпало с началом срока наблюдения.

Из табл. 4.10 видно, что для получения высокой вероятности правильного определения местоположения грозовых очагов целесообразно делать оценки по критерию $a_0 = 1$, при этом

Таблица 4.10

Экспериментальные вероятностные характеристики грозопеленгатора с амплитудным дальномером (грозовой сезон 1972 г.)

Вероятностные характеристики	Экспериментальные данные				Теоретические значения при $\Delta u = 8$ дБ, $N = 30$, $u_1 = 1,3\sigma$	
	пункт 1		пункт 2		$a_0 = 1$	$a_0 = 2$
	$a_0 \geq 1$	$a_0 \geq 2$	$a_0 \geq 1$	$a_0 \geq 2$		
Вероятность обнаружения грозы	0,947	0,718	0,906	0,731	0,923	0,735
Вероятность правильного определения града-ции расстояния	0,732	0,563	0,797	0,673	0,646	0,69
Вероятность минусовой ошибки в одну града-цию	0,134	0,095	0,009	0,006	0,277	0,045
Вероятность минусовой ошибки более чем в одну градацию	0,014	—	0,009	—		
Вероятность пропуска грозы в радиусе 300 км	0,053	0,282	0,094	0,269	0,077	0,265
Вероятность плюсовой ошибки в одну и бо-лее градацию	0,067	0,06	0,091	0,052		
Вероятность приема гроз с расстояния больше 420 км	0,025	0,029	0,01	0,01	0,007 ¹	0,007 ¹
Вероятность получения отсчетов от неуста-новленных источников	0,198	0,077	0,18	0,06		

¹ См. расчет ограничителя дальности.

величина ошибки и количество обнаруженных дальних гроз уве-личивается незначительно по сравнению с их значениями при оценке по критерию $a_0 = 2$.

Методика проведения эксперимента и оценки дальности при-ведены в разделе 4.7.

Кроме вышесказанного, из табл. 4.10 следует, что грозопе-ленгатор с амплитудным многопороговым дальномером позво-ляет обнаруживать не менее 90% гроз ($a_0 = 1$) и при этом в 73—80% случаев правильно определять местоположение гро-зовых очагов (в пределах приведенных градаций дальности). Следует отметить, что указанные точности вполне приемлемы для оперативной работы по штормпредупреждению (в авиации и других отраслях народного хозяйства), поскольку в большин-стве случаев размеры грозовых очагов, состоящих из несколь-ких грозовых ячеек, обычно перекрывают градации дальности, особенно первых трех.

Использование данного прибора совместно с метеорологическими радиолокаторами позволит еще больше, чем с грозопеленгатором ПАГ-1 повысить эффективность обнаружения гроз, так как он дает возможность оценить и расстояние до грозового очага.

4.4. ГРОЗОПЕЛЕНГАТОР С ДАЛЬНОМЕРОМ, РАБОТАЮЩИМ ПО МЕТОДУ РАЗДЕЛЬНОГО АНАЛИЗА E И H СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Первые экспериментальные установки грозопеленгатора с дальномером, работающим по методу раздельного анализа E и H составляющих поля, описаны в работах [45, 76]. В качестве азимутального устройства использован грозопеленгатор типа ПАГ-1 (или амплитудно-фазовый), а в качестве дальномера — дальномер, описанный в разделе 3.2. Синхронность показаний и ограничение радиуса действия прибора обеспечивались запуском мультивибратора подсветки пеленга синхронизирующими импульсами из блока дальности. Дальномер имел равномерные градации дальности через 25 км: 0—25, 25—50, 50—75, 75—100 км и обзорную градацию — более 100 км. Индикация сработавшей градации дальности производилась на цифровой лампе типа ИИ-2.

Местоположение отдельных грозовых разрядов определялось по синхронно снятым показаниям пеленга на экране индикатора грозопеленгатора ПАГ-1 и сработавшей градации дальности на цифровой лампе дальномера.

Суждение о местоположении грозового очага принималось по градациям в секторе, где находился грозовой очаг, в которых относительная частота срабатываний превышала 0,2. Относительная частота характеризуется долей срабатываний в данной градации в выделенном секторе по отношению к общему числу срабатываний в выделенном секторе. Время накопления данных (40 мин) и минимальный порог срабатывания схемы запуска, равный 2,9 В/м, выбирались на основании требований обеспечения надежности оценок, не меньшей 0,95. При таких условиях ЭМИ грозовых разрядов уверенно принимались в радиусе до 150 км.

В результате обработки данных за первый грозовой сезон и сопоставления их с данными о грозах, полученными с метеостанций и постов, а также с радиолокационными и синоптическими данными, были получены следующие экспериментальные вероятностные характеристики грозопеленгатора-дальномера:

— вероятность правильного определения местоположения грозовых очагов $P_{\text{пр. опр}} = 0,7$;

- вероятность пропуска грозовых очагов $P_{\text{пр}}=0,08$;
- вероятность ложных тревог $P_{\text{л. тр}}=0,22$.

К числу ложных тревог были отнесены ошибки, равные ± 1 градации. Если эти ошибки выделить, то вероятность ложной тревоги $P_{\text{л. тр}}=0,055$, а вероятность определения градации дальности с ошибкой ± 1 градация $P_{\text{ош}}=0,165$. До 75 км разделение градаций было четким, как и следовало ожидать (рис. 3.10).

В следующий грозовой сезон градации дальномера были уменьшены до 15 км: 0—15, 15—30, 30—45, 45—60, 60—75 км.

Индикация дальности была выведена на индикатор грозопеленгатора в виде яркостной отметки в масштабном кольце, соответствующем сработавшей градации дальномера. При этом для исключения наложения отметок был введен разброс радиального отклонения в пределах градации.

Результаты испытаний показали, что в те сеансы, когда грозы находились в пределах рабочей зоны, грозопеленгатор-дальномер обеспечивал четкую локализацию грозовых очагов и позволял проследить динамику их движения и развития. При этом вероятностные характеристики грозопеленгатора-дальномера оказались следующими: $P_{\text{пр. опр}}=0,82$; $P_{\text{пр}}=0,07$; $P_{\text{л. тр}}=0,11$.

Улучшение характеристики $P_{\text{пр. опр}}$ связано с четким разделением градаций дальности до 75 км.

Основные ошибки, увеличивающие $P_{\text{л. тр}}$, появлялись за счет тех сеансов, в которые грозовые очаги располагались за пределами рабочей зоны. Для уменьшения этого рода ошибок целесообразно иметь обзорную градацию 75—100 км, позволяющую судить о наличии грозы вне рабочей зоны.

Следует отметить, что используемая методика оценки результатов сопоставления показаний грозопеленгатора-дальномера с показаниями МРЛ, данными синоптических карт и штормоповещения при уменьшении отдельной градации дальности до значений, меньших 25 км, уже не обеспечивает требуемую точность контрольных данных. Более точным инструментальным методом контроля может быть радиолокационное зондирование канала молнии [17], при котором выдается азимут и дальность до источника ЭМИ, с синхронным снятием показаний с индикатора грозопеленгатора-дальномера. Первая экспериментальная проверка такого рода показала высокую точность работы грозопеленгатора-дальномера. Есть основание полагать, что дальнейшее усовершенствование схемы устройства позволит обеспечить более высокие вероятностные характеристики. Такой грозопеленгатор-дальномер может обеспечить в радиусе 75—100 км точность определения местоположения грозы не хуже, чем существующие метеорологические радиолокаторы.

4.5. ГРОЗОПЕЛЕНГАТОР С ДАЛЬНОМЕРОМ, РАБОТАЮЩИМ ПО МЕТОДУ СРАВНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

С. Н. Городенский и др. [25] описали самолетный вариант устройства для определения местоположения грозового разряда. В грозопеленгаторе для приема грозовых разрядов с расстояний до 700—1000 км выбрана частота 5 кГц. Прием магнитной составляющей ЭМИ грозового разряда производится рамочными антеннами с ферритовыми сердечниками, заключенными в металлические экраны (обтекатели) и укрепленными под фюзеляжем самолета во взаимно перпендикулярных направлениях. Сигналы, принятые рамочными антеннами, усиливаются в отдельных каналах усиления и поступают на индикатор, где преобразуются в напряжение вертикальной и горизонтальной развертки. Для устранения неоднозначности электрическая составляющая ЭМИ грозового разряда принимается ненаправленной штыревой антенной авиационного типа (длиной 0,5 м), заключенной в диэлектрический обтекатель. Со штыревой антенны сигнал поступает в канал однонаправленности, где он формируется, усиливается и подается на индикатор пеленга в такой фазе, чтобы подсветить на экране индикатора половину эллипса, соответствующую направлению на источник ЭМИ. В зависимости от места установки рамочных антенн возможны девиационные ошибки до 20°.

Спектральный дальномер описан в разделе 3.3. Узел автоматики в нем обеспечивает цифровую индикацию дальности на специальном индикаторе и осуществляет бланкирование цифрового индикатора от дальномерных каналов после выработки очередного отсчета дальности на время 3—5 с, необходимое для регистрации отсчета. Обеспечена синхронизация индикаторов пеленга и дальности за счет принудительной привязки момента начала развертки пеленга к моменту начала прямоугольного импульса на выходе дальномерного канала. Когда дальномерные каналы бланкированы, в канале однонаправленности осуществлен запрет подсвета пеленга.

К недостаткам прибора следует отнести наличие двух индикаторов, затрудняющих оперативную работу с прибором, и длительное бланкирование.

Экспериментальная проверка работы грозопеленгатора со спектральным дальномером [26, 27] была произведена как в наземных условиях (продолжительность 18 ч), так и при полетах (общей продолжительностью 50 летных часов) по воздушным трассам Прибалтики, Белоруссии, Украины, Крыма и Кавказа. Полеты производились в летние месяцы и сопровождались интенсивными фронтальными и внутримассовыми грозами на разных удалениях от самолета (700 км и более).

Достоверность результатов летных испытаний оценивалась путем сопоставления их с данными АМСГ аэропортов, Гидрометцентра СССР и визуальных наблюдений с борта самолета. Местоположение грозовых разрядов фиксировалось по одновременным показаниям индикатора дальности и пеленгатора. Грозопеленгатор со спектральным дальномером, как показали экспериментальные данные, может определять местоположение грозовых очагов на расстояниях свыше 100 км с погрешностью, не превосходящей 50% для 100 км, 30% для 150 км, (25—10)% для 200—500 км. При этом было отмечено, что для грозовых очагов, лежащих близко к маршруту (курсу) самолета, ошибки пеленгования оказались минимальными. Зарегистрированные грозовые очаги в основном подтверждались имеющейся метеоинформацией в сроки наблюдений и в сроки, близкие к ним. Однако из-за недостаточного статистического материала полученные результаты о точности метода требуют дальнейшей проверки, а для оценки точности системы в переходное время суток необходимо провести специальные исследования.

4.6. ГРОЗОПЕЛЕНГАТОР С ДАЛЬНОМЕРОМ, РАБОТАЮЩИМ ПО МЕТОДУ АНАЛИЗА ИОНОСФЕРНЫХ ОТРАЖЕНИЙ

Прибор для определения местоположения грозовых очагов методом анализа ионосферных отражений запатентован в США Т. Лири [117]. Подобно другим аналогичным устройствам он состоит из грозопеленгатора и дальномера. Структурная схема прибора показана на рис. 4.6.

Грозопеленгатор имеет две рамочные антенны 1 и 4, ориентированные в направлениях север—юг и запад—восток. Через идентичные двухтактные усилители 2 и 5 с высоким коэффициентом усиления и полосой пропускания 100—10 000 Гц рамочные антенны соединены соответственно с вертикальными и горизонтальными отклоняющимися пластинами электроннолучевой трубки индикатора азимута 3. Для исключения двухзначности используется штыревая вертикальная антенна 6, сигнал с которой усиливается и сдвигается по фазе на 90° относительно фазы сигнала в усилителях рамочных антенн. Сигнал с усилителя и фазовращателя 7 штыревой антенны поступает на ЭЛТ для модуляции по интенсивности электронного пучка, при этом одна половина диаметральной линии развертки гасится, а вторая, соответствующая направлению на источник ЭМИ грозового разряда, подсвечивается.

Поскольку рамочные антенны не имеют нуля диаграммы направленности для сигнала, проходящего под некоторым углом к горизонтальной плоскости, например сигнала атмосфера, от-

раженного от слоя D , то этот сигнал отображается на экране ЭЛТ как овал, наложенный на прямую линию, вызванную предшествующим приемом сигнала атмосферика поверхностной волны.

Горизонтальный разряд между облаками производит аналогичный овал, но без делящей его пополам прямой линии. Таким

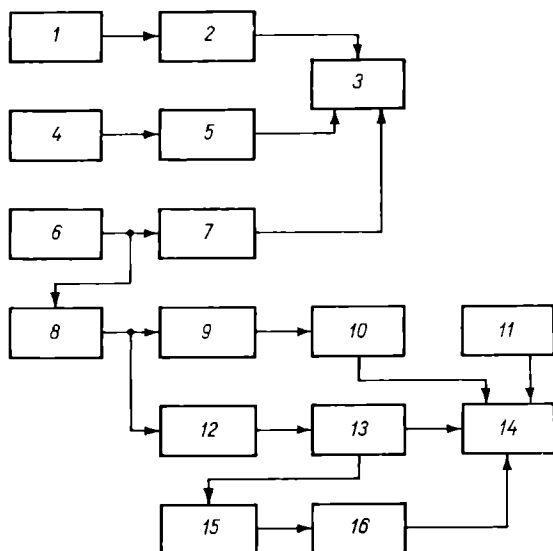


Рис. 4.6. Структурная схема грозопеленгатора с дальномером, работающим по методу анализа ионосферных отражений [117]

1, 4 — рамочные антенны, 2, 5 — усилители горизонтальной и вертикальной развертки, 3 — индикатор азимута, 6 — ненаправленная штыревая антенна, 7 — усилитель с фазовращателем, 8 — фильтр, детектор, 9 — усилитель, катодный повторитель с управляемой линией задержки, 10 — усилитель сигнала вертикальной развертки, 11 — генератор сигнала треугольной формы с частотой $f=30$ Гц, 12 — усилитель синхронизации, 13 — генератор пусковых импульсов, 14 — индикатор дальности, 15 — генератор сигнала горизонтальной развертки, 16 — усилитель сигнала горизонтальной развертки.

образом, по мнению автора, можно различить эти типы грозовых разрядов.

На дальномерное устройство сигнал снимается с ненаправленной штыревой антенны (длиной не менее 0,9 м), пропускается через фильтр с полосой 100—10 000 Гц и детектируется в детекторе 8. Выпрямленный сигнал поступает в схему 9 и 10 формирования вертикальной развертки индикатора дальности 14, где осуществляется усиление сигнала и задержка его на

время около 0,5 мкс с тем, чтобы горизонтальная развертка началась раньше вертикальной. В двухтактном усилителе звуковых частот 10 сигнал преобразуется в два равных напряжения противоположной полярности, которые подаются на пластины вертикального отклонения ЭЛТ индикатора дальности 14. Незадержанная часть сигнала поступает в усилитель синхронизации 12, который обеспечивает запуск генератора пусковых импульсов 13. Генератор пусковых импульсов вырабатывает прямоугольный сигнал переменной длительности, которым запускается генератор развертки 15, формирующий линейно возрастающее пилообразное напряжение, подаваемое с выхода усилителя 16 на пластины горизонтального отклонения ЭЛТ индикатора дальности. Для того чтобы следы от последовательно принятых грозовых разрядов не накладывались, используется генератор 11 треугольных сигналов с частотой 30 Гц. Сигнал генератора подается на вертикальные пластины и постепенно отклоняет луч в вертикальном направлении, обеспечивая новое начальное положение вертикальной развертки для каждого вновь принятого атмосферика.

Таким образом, сигнал поверхностной волны, который приходит раньше, чем сигнал, отраженный от ионосферного слоя *D*, принимается, фильтруется, детектируется и запускает сначала горизонтальную, а затем вертикальную развертку индикатора дальности. Через несколько микросекунд приходит пространственная волна, фаза которой из-за эффекта преломления в слое *D* обратна фазе сигнала поверхностной волны. В результате наложенный на след прямого сигнала отраженный сигнал четко обозначается в виде провала на линии развертки. Местонахождение на линии развертки точки с максимальной амплитудой вертикального отклонения является отметкой дальности. Отсчет времени запаздывания производится по откалиброванной шкале времени, нанесенной на экран ЭЛТ индикатора дальности. Иногда на следе отмечаются два провала, обусловленные первым и вторым отражением пространственной волны. При этом отсчет времени следует производить по первому от начала развертки провалу. Результаты экспериментальной проверки работы прибора в [117] не приводятся, но отмечается, что установка работает в интервале расстояний 40—900 мор. миль.

Описанное устройство интересно по своим возможностям для исследовательских целей. Однако для оперативной работы оно малоприспособно, так как требует от оператора непрерывного и напряженного внимания для считывания и анализа информации с двух индикаторов (азимута и дальности). Кроме того, поскольку в [117] не приводятся статистически обеспеченные экспериментальные данные по обнаружению грозовых очагов, неизвестны точностные характеристики устройства.

4.7. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕРКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРА И ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРОВ-ДАЛЬНОМЕРОВ

При проведении экспериментальных исследований по выяснению статистических характеристик грозопеленгатора и грозопеленгатора с амплитудным дальномером и дальномером, работающим по методу раздельного анализа E и H составляющих поля, сопоставлялись обнаруженные грозовые очаги с фактически наблюдавшимися грозами. При этом была сделана попытка объяснить происхождение каждого зарегистрированного импульса ЭМИ. Этому обстоятельству была подчинена выработанная методика постановки эксперимента и анализа результатов наблюдений.

В период испытаний проводились регулярные наблюдения и съем информации с индикатора грозопеленгатора или грозопеленгатора-дальномера либо каждые 30 мин, либо за 20—30-минутный срок наблюдения один раз в час (при совместной работе грозопеленгатора с метеорадиолокатором).

При съеме информации с индикатора записывался сектор, занятый непрерывным рядом пеленгов или отметок на грозовой очаг. Сектора разделялись, если между крайними пеленгами образовался угол более 10° , так как такое расхождение уже не могло вызываться инструментальной ошибкой пеленгатора и означало разделение соседних грозовых очагов.

При съеме данных с индикатора грозопеленгатора с амплитудным дальномером при равномерном распределении отметок в широком секторе выделенные сектора не должны превышать угловых размеров грозовых ячеек в каждой градации дальности, например, для дальномера с четырьмя градациями дальности: 60° для градации 0—30 км, 40° — для градации 30—75 км, 20° — для градации 75—200 км и т. д. Если такого разделения не сделать, то распределение отметок по градациям от нескольких гроз приведет к ошибке в оценке дальности (будет указана более близкая градация, чем та, в которой находится гроза).

Для каждого азимутального сектора в зависимости от распределения отметок по градациям производилась оценка градации, в которой находится гроза, по следующим критериям, уточненным по экспериментальным данным:

1. Если в градациях есть только по одной отметке, то выбиралась ближняя градация.

2. Если в распределении отметок между градациями наблюдался «скачок», при котором количество отметок в i -той градации (n_i) превышало количество отметок в $(i-1)$ -й градации (n_{i-1}) в 2 раза и более, то выбиралась i -тая градация, если же $n_i \leq 3$, а за первым скачком шел второй с $n_{i+1}/n_i \geq 2$, то

выбиралась градация только на втором скачке, т. е. $(i+1)$ -я градация.

3. Если имелось большое количество отметок в подряд идущих градациях, то выбирались все градации, где $n_i \geq 5$.

4. Если распределение отметок между градациями позволило выделить два скачка с провалом между ними, то выбирались обе градации, на которые приходились скачки.

Пеленгационная информация сопоставлялась с фактическими данными о грозах, полученными со штормового кольца АМСГ аэропорта, в районе которого проводились испытания, с данными синоптических карт и метеорологической радиолокационной информации. В основном за эталон принимались данные визуальных наблюдений. Но поскольку метеостанции, включенные в штормовое кольцо, расположены очень редко, т. е. имеются большие участки территории, грозы над которыми с метеостанций не обнаруживаются, то в этих случаях совпадение радиолокационных и грозопеленгационных данных о грозе считалось достаточным подтверждением наличия грозы. Данные о грозах, полученные с помощью радиолокатора, не учитывались, если они не подтверждались данными метеостанций или грозопеленгатора [3]. Сравнивались данные о грозах, совпадающих по времени со сроком наблюдения. Если гроза начиналась в срок наблюдения и не была зафиксирована, то она считалась пропущенной в данный срок даже в том случае, если в последующие сроки наблюдения она фиксировалась. Несовпадение по времени допускалось ± 5 мин, так как не всегда фиксировалось точное время сеанса и не проводилась сверка точного времени на метеостанциях. Если гроза длилась в течение 4—6 ч и в какой-либо промежуточный срок наблюдения не была зафиксирована, то она в этот срок не считалась пропущенной. За конец грозы принималось время за 30 мин до отбоя, указанного в шторм-телеграмме, если в течение этого времени не было приема ЭМИ грозовых разрядов.

Поскольку при радиолокационных наблюдениях съем информации производится один раз в час, данные одного сеанса радиолокационных наблюдений сравнивались с данными двух ближайших по времени сеансов пеленгационных наблюдений.

При сопоставлении метеоинформации о грозах с грозопеленгационной допуск по азимуту принимался равным 10° . В отдельных случаях с учетом инструментальной погрешности приборов (допустимая максимальная ошибка 7°), протяженности грозовых облаков и возможной удаленности от метеостанции зарегистрированного грозового очага на 14—20 км (днем) допуск по азимуту был увеличен до 15° для грозовых очагов, удаленных на расстояние 100 км и более, и до 20° для грозовых очагов, находящихся ближе 100 км.

В результате сопоставления всех видов информации о грозах (по фактическим данным, по данным метеорологического радиолокатора и грозопеленгатора или грозопеленгатора-дальномера) каждый азимутальный сектор с выбранной градацией дальности (при наличии дальномера) квалифицировался по одному из вариантов, приведенных в табл. 4.11 и 4.12.

Таблица 4.11

Принятая характеристика вариантов при анализе данных грозопеленгатора ПАГ-1

№ варианта	Наличие гроз по данным				Расстояние до грозы, км	Примечания	
	ПАГ-1	МРЛ	метеостанций	синоптических карт			
1	+	+	+	+	≤ 300	} Правильная фиксация гроз ПАГ-1	
2	+	+	—	Возможны	≤ 300		
3	+	Cb, Ns, $\dot{\nabla}$	+	+	≤ 300		
4	+	—	+	+	≤ 300		
5	+	—	+	+	от 300 до 400		
6	—	—	+	+	≤ 300		} Пропуск гроз
7	—	+	+	+	≤ 300		
8	+	—	+	+	> 400		Фиксация дальних гроз
9	+	-/+ в соседние сроки	-/+ в соседние сроки	Возможны	≤ 400	Продолжение или опережение фиксации гроз	
10	+	—, $\dot{\nabla}$, Cb	—	Cb, $\dot{\nabla}$	≤ 400	Грозы возможны	
11	+	—	—	—		Ложные тревоги	

Статистические характеристики грозопеленгатора и грозопеленгатора-дальномера определялись по соотношению вариантов, приведенному в табл. 4.13 и 4.14.

Для примера в табл. 4.15 приведено распределение по вариантам случаев пеленгования гроз с помощью грозопеленгатора ПАГ-1, полученных при анализе результатов наблюдений за грозовые сезоны 1968 и 1972 гг. По этим данным были рассчитаны статистические характеристики грозопеленгатора ПАГ-1, приведенные в табл. 4.3 и 4.4.

Для грозопеленгатора с амплитудным дальномером полученное распределение вариантов приведено в табл. 4.16, а рассчитанные по ним статистические характеристики — в табл. 4.10.

Результаты первой опытной проверки работы метеорадиолокатора совместно с ПАГ-1 позволили выработать некоторые рекомендации по коррекции радиолокационных данных с учетом пеленгационной информации, приведенные в [62].

Таблица 4.12

Принятая характеристика вариантов при анализе данных грозопеленгатора с амплитудным дальномером

№ варианта	Характеристика варианта по сопоставлению с фактическими данными	Примечание
1	Фактические грозы попадают в одну градацию по дальности, в несколько градаций по дальности	Правильная фиксация гроз
2	Определяется грозовой очаг в ближней градации	
3	Определяется грозовой очаг в дальней градации	
4	Определяются грозовые очаги в нескольких градациях	
5	Определена гроза на одну градацию дальше фактической	Ошибка ± 1 градация дальности
6	Определена гроза на одну градацию ближе фактической	
7	Определена гроза на две градации ближе или дальше фактической	Ошибка ± 2 градации дальности
8	Гроза зарегистрирована на расстоянии $400 \text{ км} < R \leq 500 \text{ км}$	
9	Гроза зарегистрирована на расстоянии $R > 500 \text{ км}$	Прием дальних гроз
10	Гроза не определена	
11	По синоптической обстановке Сб, ∇	Гроза возможна
12	Фактические грозы имелись в соседние сроки наблюдения	Продолжение или опережение фиксации гроз
13	Нет подтверждения зарегистрированной грозы	Ложная тревога

Таблица 4.13

Таблица для определения статистических характеристик грозопеленгатора из распределения по вариантам результатов экспериментальных наблюдений

Статистическая характеристика	Формулы для определения статистических характеристик
Вероятность обнаружения гроз при R км:	
≤ 300	$\left(\sum_{i=1}^{i=4} N_i \right) / \left(\sum_{i=1}^{i=4} N_i + N_6 + N_7 \right)$
от 300 до 400	$N_5 / \left(\sum_{i=1}^{i=7} N_i \right)$
> 400 (дальняя)	$N_8 / \left(\sum_{i=1}^{i=8} N_i \right)$
Вероятность пропуска гроз при $R \leq 300$ км	$(N_6 + N_7) / \left(\sum_{i=1}^{i=4} N_i + N_6 + N_7 \right)$
Примечание. N_i — количество случаев каждого варианта, i — номер варианта.	

Таблица 4.14

Таблица для определения статистических характеристик грозополенгатора с амплитудным дальномером из распределения по вариантам результатов экспериментальных наблюдений

Статистическая характеристика	Формулы для определения статистических характеристик
С учетом ложных тревог	
Вероятность обнаружения гроз	$P_{\text{обн}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=7} N_i}{\sum_{i=1}^{i=10} N_i}$
Вероятность пропуска гроз	$P_{\text{пр}} = \frac{N_{10}}{\sum_{i=1}^{i=10} N_i}$
Вероятность ложных тревог:	
прием дальних гроз	$P_{\text{л. тр}} = \frac{N_8 + N_9}{\sum_{i=1}^{i=10} N_i}$
прием ЭМИ от неустановленных источников	$P_{\text{л. тр}} = \frac{N_{13}}{\sum_{i=1}^{i=10} N_i}$
Без учета ложных тревог	
Вероятность обнаружения гроз	$P_{\text{обн}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=7} N_i}{\sum_{i=1}^{i=7} N_i + N_{10}}$
Вероятность правильного определения градации дальности	$P_{\text{пр. опр}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=4} N_i}{\sum_{i=1}^{i=7} N_i + N_{10}}$
Вероятность ошибки в одну и более градацию дальности	$P_{\text{ош}} = \frac{\sum_{i=5}^{i=7} N_i}{\sum_{i=1}^{i=7} N_i + N_{10}}$
Вероятность пропуска гроз	$P_{\text{пр}} = \frac{N_{10}}{\sum_{i=1}^{i=7} N_i + N_{10}}$
Примечание. N_i — количество случаев каждого варианта, i — номер варианта.	

Таблица 4.15

Распределение по вариантам результатов экспериментальных наблюдений за грозами с помощью грозопеленгатора ПАГ-1 (1968, 1972 гг.)

№ варианта	1968 г.				1972 г.			
	Ленинград, Шоссейная		Минск, ГМО		Гомель, ЗГМО		Брест, ЗГМО	
	N_i	%	N_i	%	N_i	%	N_i	%
1	306	34,5	178	42,1	166	33,9	146	36,9
2	129	14,5	69	16,3	99	20,1	152	38,4
3	124	14,0	36	8,5	46	9,4	13	3,3
4	114	12,9	18	4,2	26	5,3	4	1,0
5	35	4,0	21	4,9	27	5,5	7	1,8
6	53	6,0	11	2,6	7	1,4	7	1,8
7	12	1,3	5	1,2	8	1,6	3	0,7
8	24	2,7	6	1,4	6	1,2	11	2,8
9	54	6,1	20	4,7	28	5,7	9	2,2
10	26	2,9	18	4,2	31	6,3	21	5,3
11	10	1,1	42	9,9	47	9,6	23	5,8
Итого	887	100	424	100,0	491	100,0	396	100

Таблица 4.16

Распределение по вариантам результатов экспериментальных наблюдений за грозами с помощью грозопеленгатора с амплитудным дальномером (1972 г.)

№ варианта	Пункт 1		Пункт 2	
	N_i	%	N_i	%
1	91	20,9	102	23,9
2	85	19,5	32	7,5
3	20	4,6	119	28,0
4	24	5,5	4	0,9
5	19	4,4	27	6,3
6	38	8,7	3	0,7
7	4	0,9	5	1,1
8 } 9 }	9	2,0	4	0,9
10	15	3,4	30	7,1
11	39	9,0	25	5,8
12	20	4,6	6	1,4
13	72	16,5	70	16,4
Итого	436	100	427	100,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Книга представляет собой попытку осветить уровень, достигнутый в области грозопеленгационной техники на сегодняшний день, и указать на возможности, которые открываются при использовании грозопеленгаторов-дальномеров для грозового предупреждения.

Из книги видно, в какой тесной взаимосвязи находятся исследования в области характеристик ЭМИ молниевых разрядов и разработка аппаратуры для определения местоположения гроз пассивными методами из одной точки.

Результаты исследований физических характеристик ЭМИ с учетом трассы и современный технологический уровень приборостроения определяют уровень и точностные характеристики создаваемой в настоящее время аппаратуры. При этом прослеживается и обратная связь. При исследовании такого нерегулярного источника ЭМИ, каким является молниевый разряд, создание теоретической модели и соответствующие расчеты сами по себе не позволяют получить обоснованные количественные оценки. Требуются всесторонние экспериментальные исследования по реальным источникам, проведение которых невозможно без специально созданных приборов. Не меньшее значение имеет метрологическая база, которой могут располагать исследователи.

Особенно сказывается это обстоятельство на исследовании характеристик грозопеленгаторов-дальномеров ближней зоны (и главным образом на расстояниях до 100 км). В этом случае информация о распределении гроз, полученная по сети штормового оповещения или с помощью метеорологических радиолокаторов, не дает возможности судить о точности определения местоположения гроз, которую даст исследуемая аппаратура. Использование для целей подобных исследований радиолокаторов прямого зондирования молниевых каналов открывает новые возможности. Можно осуществить синхронную запись показаний грозопеленгатора-дальномера, формы и других характеристик E и H составляющих ЭМИ молниевых разрядов, привязав

эти данные к точным радиолокационным координатам молнии. Сказанное относится также к исследованию вопросов, связанных с потенциальными возможностями амплитудного и дисперсионного методов дальнометрии. Естественно ожидать, что результаты таких исследований послужат основой для создания грозопеленгаторов-дальномеров ближней зоны с более высокими точностными характеристиками и соответственно с более широкими тактическими возможностями.

Отмеченная здесь диалектика развития средств пассивного обнаружения гроз ни в малейшей степени не умаляет результатов, уже достигнутых в этой области. Созданные или создаваемые в настоящее время грозопеленгаторы-дальномеры дают возможность значительно повысить эффективность обнаружения гроз, снизить количество ложных тревог, когда ливни принимаются за грозы, получать объективное средство регистрации гроз в ближней зоне.

Создание грозопеленгаторов-дальномеров вышло из стадии теоретических и экспериментальных исследований и вступило в стадию опытно-конструкторских разработок и промышленного освоения моделей аппаратуры, выполненной на современном технологическом уровне. Теперь уже очевидно, что ни один метеорологический радиолокационный комплекс не может быть создан без включения в него грозопеленгаторов-дальномеров.

Широкое использование метеорологическими службами подобной аппаратуры, включение ее в аппаратурные метеорологические комплексы в свою очередь выдвигают новые задачи и вызывают необходимость дополнительных и более широких исследований, направленных на определение путей по повышению точностных характеристик аппаратуры (в частности дальномеров), на автоматизацию обработки результатов, передачу информации потребителям, разработку алгоритмов совместного использования данных грозопеленгаторов-дальномеров с другой информацией метеорологических комплексов и т. п. Поэтому в ближайшие годы можно ожидать появления результатов указанных исследований и соответственно новой аппаратуры пассивных методов разведки гроз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Г. Э. Антенны ультракоротких волн. М. Связьиздат, 1957. 699 с.
2. Александров М. С. и др. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. М., «Наука», 1972. 195 с.
3. Алленов П. А., Зражевская Р. М. К вопросу о радиолокационной эффективности распознавания гроз и облаков.— «Тр. ГГО», 1973, вып. 281, с. 95—100.
4. Альперт Я. Л. О распространении электромагнитных волн низкой частоты над земной поверхностью. М., Изд. АН СССР, 1955. 112 с.
5. Альперт Я. Л. и др. Расчеты амплитуды поля и фазовой скорости низкочастотных волн в приземном сферическом волноводе.— «Геомagnetизм и аэрономия», 1972, т. 12, № 6, с. 1020—1026.
6. Апостолов Г. А. Грозовая деятельность на территории Киргизской ССР и организация инструментальных наблюдений. Проблемы высокогорной электроники. Фрунзе, Изд. АН Киргизской ССР, 1961, с. 237—255.
7. Арабаджи Р. И. Гроза и грозовые процессы. Минск, Изд. БГУ, 1960. 230 с.
8. Асташенко А. И., Махоткин Л. Г. О пеленговании ближних грозовых разрядов.— «Тр. ГГО», 1963, вып. 146, с. 10—16.
9. Бару Н. В. и др. Результаты использования грозопеленгатора ПАГ-1 в составе метеорологического радиолокатора МРЛ-2 для обнаружения гроз.— «Тр. ГГО», 1975, вып. 358, с. 96—103.
10. Бару Н. В., Кононов И. И., Соломоник М. Е. Ограничитель дальности действия грозопеленгатора.— «Тр. ГГО», 1974, вып. 301, с. 168—177.
11. Бару Н. В. и др. Амплитудный анализатор для определения расстояния до грозовых очагов.— «Тр. ГГО», 1975, вып. 358, с. 108—115.
12. Бару Н. В. и др. Автоматический сверхдлинноволновый радиопеленгатор грозовых разрядов. Библиографический бюллетень по официальным материалам зарубежных патентных ведомств (объединенное издание), № 8 (1973), 1974. с. 37.
13. Бреслав Л. Б., Имянитов И. М. О точности амплитудного метода измерения удаленности гроз.— «Тр. ГГО», 1974, вып. 301, с. 153—164.

14. Брылев Г. Б. и др. Методические основы оперативного получения радиолокационной метеорологической информации об облачности и связанных с нею опасных явлениях. Методические основы автоматизированной системы метеорологических наблюдений. Л., Гидрометеиздат, 1971, с. 69—119.
15. Вершков М. В. Судовые антенны. Л. «Судостроение», 1972, с. 263—283.
16. Гальперин С. М. Распознавание грозовых разрядов в ливневых очагах при радиолокационных наблюдениях атмосферных образований с помощью пеленгатора гроз. Инф. сб. НИО ЛВИИКА им. А. Ф. Можайского, 1964, № 68, с. 26—29.
17. Гальперин С. М., Степаненко В. Д., Осетров А. С. Радиолокационное обнаружение молний.—«Тр. ГГО», 1974, вып. 301, с. 81—87.
18. Гальперин С. М., Пашенко Е. Г., Соломник М. Е. Устройство для контроля инструментальных ошибок пеленгатора гроз. Авторское свидетельство № 311229. Официальный бюллетень ГК СМ СССР по делам изобретений и открытий. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки». 1971, № 24.
19. Гальперин С. М., Соломник М. Е., Степаненко В. Д. Сверхдлинноволновый автоматический радиопеленгатор гроз для сопряжения с РЛС метеорологического назначения и телеметрическим каналом. Авторское свидетельство № 200633. Бюллетень открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков. 1967, № 17.
20. Гальперин С. М. и др. Эффективность радиолокационно-пеленгационного метода опознавания грозовых облаков. Труды Конференции по проблемам авиационной метеорологии. Л., Изд. ЛГМИ, 1969, с. 228—235.
21. Гальперин С. М. и др. Результаты радиолокационно-пеленгационных наблюдений за ливнями и грозами с помощью МРЛ-1 и сопряженного с ним пеленгатора гроз. В кн.: Труды третьего Всесоюзного совещания по радиолокационной метеорологии. М., Гидрометеиздат, 1968, с. 62—72.
22. Городенский С. Н. Оценка точности спектральных измерений дальности до грозы.—«Геомagnetизм и аэрономия». 1973, т. 13, № 5, с. 850—856.
23. Городенский С. Н., Каяндер О. Д. Некоторые аппроксимации зависимости дальности до грозы от отношения спектральных составляющих атмосферика.—«Тр. РКИИГА», 1970, вып. 165, с. 202—227.
24. Городенский С. Н., Каяндер О. Д. Определение дальности до грозы спектральным методом.—«Геомagnetизм и аэрономия». 1972, т. 12, № 2, с. 256—261.
25. Городенский С. Н., Краснитский Ю. А., Каяндер О. Д. Устройство для определения местоположения грозового разряда. Авторское свидетельство № 305434. Бюллетень открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, 1971, № 18.
26. Городенский С. Н., Краснитский Ю. А., Каяндер О. Д. Об опыте измерения местоположения грозовых очагов из одного пункта спектральным методом.—«Тр. РКИИГА», 1971, вып. 221, с. 37—49.
27. Городенский С. Н., Крылов В. И., Титов Н. А. Об опыте пеленгации гроз с самолета.—«Тр. ГГО», 1973, вып. 301, с. 142—148.
28. Гюннинен Э. М., Забавина И. Н. Распространение длинных радиоволн над земной поверхностью.—«Проблемы дифракции и распространения волн», 1966, вып. 5, с. 31—50.

- с. 29. Гюннинен Э. М. и др. Распространение электромагнитных импульсов и их гармонических составляющих над земной поверхностью.— «Проблемы дифракции и распространения волн». 1964, вып. 3, с. 5—191.
30. Дивинская Б. Ш., Сальман Е. М. К вопросу о режимных обобщениях данных радиолокационных наблюдений.— «Тр. ГГО», 1973, вып. 281, с. 58—64.
31. Диневич Л. А., Малихин А. В., Снегуров В. С. Результаты наблюдений за грозами по счетчикам молний различной конструкции.— «Тр. ГГО», 1975, вып. 358, с. 78—85.
32. Забавина И. Н., Штенников Ю. В. Формирование и распространение дневных атмосфериков на расстояниях до 500 км.— «Геомагнетизм и аэронаомия», 1974, № 6, т. XIV, с. 1035—1039.
33. Знаменский А. А. Инструментальная регистрация гроз полупроводниковым грозорегистратором ПРГ-1.— «Тр. ГГО», 1960, вып. 110, с. 67—74.
34. Иванов В. И., Кононов И. И. Метод однопунктовой дальнометрии, основанный на использовании спектральных особенностей компонентов поля, излучаемого молниевым разрядом.— В кн.: Атмосферное электричество. Тр. I. Всесоюз. симпозиума по атм. электричеству. Л., Гидрометеоиздат, 1976, с. 245—253.
35. Иньков Б. К. Фазовые методы определения расстояния до очагов атмосфериков.— «Тр. ГГО», 1973, вып. 319. 135 с.
36. Иньков Б. К., Махоткин Л. Г. Границы применимости амплитудного метода оценки расстояния до грозовых очагов.— «Тр. ГГО», 1968, вып. 225, с. 63—71.
37. Иньков В. К. О выборе рабочей частоты для счетчиков местных грозовых разрядов.— «Тр. ГГО», 1970, вып. 253, с. 161—166.
38. Ирр В. Я. Трехдиапазонный регистратор наличия гроз. Ученые записки Тартуского государственного университета, 1969, вып. 239, с. 103—105.
39. Кашпровский В. Е. Авторское свидетельство № 104726. Бюллетень открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, 1958, № 11.
- 40. Кашпровский В. Е. Определение местоположения гроз радиотехническими методами. М., «Наука», 1966. 248 с.
41. Кашпровский В. Е., Кузубов Ф. А. Распространение средних радиоволн земным лучом. М., «Связь», 1971, 220 с.
42. Колоколов В. П., Лещенко Г. П. О некоторых соотношениях между параметрами грозовой деятельности, полученными визуально и при помощи счетчиков молний.— «Тр. ГГО», 1975, вып. 301, с. 98—104.
- 43. Колоколов В. П., Симонова Р. И. Методика составления карт грозовых разрядов.— «Тр. ГГО», 1965, вып. 177, с. 23—30.
44. Колоколов В. П., Шварц Я. М. Проблемы регулярных наблюдений за элементами атмосферного электричества. Обнинск, 1971. 32 с.
45. Кононов И. И. Импульсный электромагнитный метод определения удаленности грозовых очагов.— «Тр. ГГО», 1970, вып. 253, с. 46—54.
46. Кононов И. И. Устройство для определения удаленности грозовых очагов. Авторское свидетельство № 316048. Официальный бюллетень ГК СМ СССР по делам изобретений и открытий. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1971, № 29.

47. Кононов И. И. Границы применимости дипольных представлений молниевых разрядов.— «Тр. ГГО», 1975, вып. 358, с. 61—68.
48. Кононов И. И., Семикрас Ю. В. Электромагнитное излучение молниевых разрядов.— «Тр. ГГО», 1975, вып. 358, с. 48—60.
49. Крылов Г. Н. Распространение радиоволн. М., «Энергия», 1968, 331 с.
50. Кукес И. С., Старик М. Е. Основы радиопеленгации. М., «Советское радио», 1964. 640 с.
51. Лободин Т. В. и др. Экспериментальная проверка работы пеленгатора близких гроз.— «Тр. ГГО», 1967, вып. 204, с. 84—91.
52. Лоч Б. Ф. Приборные наблюдения за числом разрядов ближних гроз. «Тр. ГГО», 1952, вып. 35(97), с. 58—62.
53. Лоч Б. Ф. Опытные наблюдения за числом грозовых разрядов.— «Тр. ГГО», 1956, вып. 58(120), с. 47—52.
54. Лоч Б. Ф. Суточный ход числа грозовых разрядов.— «Тр. ГГО», 1960, вып. 157, с. 39—42.
55. Лыдзар П. С. Полупроводниковые грозорегистраторы.— «Тр. ГГО», 1964, вып. 157, с. 54—58.
56. Лыдзар П. С. Установка для определения местоположения близких грозовых очагов с одного пункта.— «Тр. ГГО», 1966, вып. 188, с. 23—33.
57. Макаров Г. И., Новиков В. В. Распространение электромагнитных волн над поверхностью с произвольным поверхностным импедансом.— «Проблемы дифракции и распространения волн». 1962, вып. 1, с. 96—115.
58. Махоткин Л. Г. Статистика атмосферных радиопомех.— «Геомагнетизм и аэрномия». 1963, т. 3, № 2, с. 285—292.
59. Махоткин Л. Г. Оценка параметров амплитудного распределения атмосфериков, генерируемых изолированным источником.— «Геомагнетизм и аэрномия». 1964, т. 4, № 1, с. 200—202.
60. Махоткин Л. Г., Лыдзар П. С. Ориентировочная оценка удаленности гроз по амплитудам атмосфериков.— «Тр. ГГО», 1963, вып. 146, с. 58—64.
61. Махоткин Л. Г., Семенов К. А. Статистика грозовых разрядов.— «Тр. ГГО», 1963, вып. 146, с. 39—47.
62. Методические указания по применению грозопеленгатора ПАГ-1 совместно с МРЛ. Л., 1974, 28 с.
63. Новиков В. В. О точности приближенных формул в задаче о распространении импульсных сигналов над плоской однородной земной поверхностью.— «Проблемы дифракции и распространения волн». 1964, вып. 3, с. 202—220.
64. Пашенко Е. Г. К вопросу об измерениях рамочных антенн.— «Вопросы радиоэлектроники, серия XII», 1963, вып. 10, с. 47—53.
65. Распространение длинных и сверхдлинных радиоволн. Сборник статей под редакцией проф. В. Б. Пестрякова, М., Изд. иностр. лит., 1960, 261 с.
66. Рыбачек С. Т., Гюннинен Э. М. Распространение длинных и сверхдлинных радиоволн в волноводном канале Земля-ионосфера.— «Проблемы дифракции и распространения волн». 1966, вып. 5, с. 115—123.

67. Рысаков В. М. Приближенные методы расчета и моделирование переходных процессов при распространении радиоволн.— «Проблемы дифракции и распространения волн.» 1964, вып. 3, с. 202—220.
68. Рязин П. А. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности.— «Тр. ФИАН СССР». 1946, т. 3, вып. 2, с. 47—120.
69. Созин В. И. О выборе рабочей частоты для оценки расстояния до близких грозových очагов.— «Тр. ГГО», 1970, вып. 253, с. 111—115.
70. Созин В. И. Об одном методе пеленгации близких грозových очагов.— «Тр. ГГО», 1973, вып. 302, с. 117—122.
71. Соломоник М. Е., Шатраков Ю. Г., Расин А. М. Корреляционные ошибки УКВ угломерных систем. М., «Советское радио», 1973, 208 с.
72. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1973, 343 с.
73. Тверской П. Н. Атмосферное электричество. М., Гидрометеиздат, 1949. 251 с.
74. Тимофеев Н. Т. Грозových разряды и их количественная характеристика в некоторых горных районах проектирования трасс ЛЭП Нурекская ГЭС—Ташкент,— «Тр. ГГО», 1968, вып. 225, с. 128—131.
75. Тиходеев Н. И. О некоторых закономерностях грозовой деятельности.— «Тр. ЛПИ», 1954, № 1, с. 162—167.
76. Файзулин Н. А., Кононов И. И., Плотников В. Д. Импульсный электромагнитный грозодальномер ближней зоны.— «Тр. ГГО», 1975, вып. 358, с. 116—123.
77. Фрадин А. З., Рыжков Е. В. Измерения параметров антенн. М., Связьиздат, 1962. 352 с.
78. Хомич В. И. Приемные ферритовые антенны. М., Госэнергоиздат, 1960. 64 с.
79. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л., Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
80. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозовой электричество. Л. Гидрометеиздат, 1964. 401 с.
81. Штенников Ю. В. Экспериментальные исследования дипольных и токовых моментов грозových разрядов.— «Проблемы дифракции и распространения волн». 1968, вып. 7, с. 198—208.
82. Юман М. Молния, М., «Мир», 1972. 327 с.
83. An instrument for counting local lightning flashes. WMO Bull, 1959, vol. 8, N 1, p. 14—18.
84. Arnold H. R., Pierce E. T. Lieder and junction processes in the lightning discharge as a source of VLF atmospheric. "J. Res.", NBS, 1964, 68D, N 7, p. 771—776.
85. Austin G. L., Stansbury E. I. The location and its relation to precipitation detected by radar.— "J. Atm. and Terr. Phys.", 1971, vol. 33, N 5, p. 841—844.
86. Barham R. A. Transistorized lightning-flash counter. Electron. Letters, 1965, vol. 1, N 6. 173 p.

87. Berger K. Front duration and current steepness of lightning strokes to the earth. Proc. Int. Conf. Gas Disch. and Electr. Supply Industry, 1962, p. 63—73.
88. Brook M., Kitagawa N. Radiation from lightning discharges in frequency range 400 to 1000 mcs.—„J. Geophys. Res”, 1960, vol. 65, p. 1189.
89. Bruce C. E., Golde R. H. The lightning discharge. J. IEE, 1941, part 2, vol. 88, p. 487.
90. Clarence N. D., Malan D. I. Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground. Quart.—„J. Roy. Meteorol. Soc.”, 1957, 83(356), p. 161—172.
91. Clarke C., Byrne B. I. The location of thunderstorms by a single-station high frequency ranging technique.— „J. Atm. and Terr. Phys.”, 1956, N 4, p. 210—228.
92. Croom D. L. The location of distant lightning discharges using the frequency spectrum of their VLF radiation.— „J. Atm. and Terr. Phys.”, 1965, vol. 27, N 1, p. 101—109.
93. Dennis A. S., Pierce E. T. The return stroke of the lightning flash to earth as a source of VLF atmospherics.— „J. Res. NBS”, 1964, 68D, N 7, p. 776—794.
94. Dickson E. B. Preliminary results of the new automatic sferics locating set AN/FMS-3, operating in 1959. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1960, vol. 41, N 4, p. 207.
95. Discussion on thunderstorm research. Quart.— „J. Roy. Meteorol. Soc.”, 1936, vol. 62, p. 499—527.
96. Fisher R. I., Uman M. A. Measured electric field risetimes for first and subsequent lightning return strokes.— „J. Geophys. Res.”, 1972, vol. 77, N 3, p. 399—406.
97. Forrest J. S. The determination of the location and frequency of thunderstorms by a radio method. Quart.— „J. Roy. Meteorol. Soc.”, 1943, vol. 69, N 298, p. 33—44.
98. Galo V., Mazosi M. A. Five channel transistorized lightning counter. Jâôjrás, 1966, vol. 70, p. 17.
99. Gane P. G., Shonland B. F. The cerauometer. Weather, 1948, vol. 3, N 6, p. 174—178.
100. Hepburn F. Atmospheric waveforms with very low frequency components below 1 kc/s known as slow tails.— „J. Atm. and Terr. Phys.”, 1957, vol. 16, N 10, p. 266—287.
101. Hepburn F. Analysis of smooth type atmospheric waveforms.— „J. Atm. and Terr. Phys.”, 1960, vol. 19, N 1, p. 37—53.
102. Heydt G., Volland H. A new method for locating thunderstorms and counting their lightning discharges from a single observing station.— „J. Atm. and Terr. Phys.”, 1964, vol. 26, N 7, p. 780.
103. Hill R. D. Electromagnetic radiation from the return stroke of a lightning discharge.— „J. Geophys. Res.”, 1966, vol. 71, N 8, p. 1963—1968.
104. Hill R. D. Analysis of irregular paths of lightning channels.— „J. Geophys. Res.”, 1968, vol. 73, N 6, p. 1897—1906.

105. Horner F. The relationship between atmospheric radio noise and lightning.— „J. Atm. and Terr. Phys.”, 1958, vol. 13, p. 140—154.
106. Horner F. The design and use of instruments for counting local lightning flashes. Proc. IEE, 1960, 107B, N 34, p. 321—330.
107. Horner F. Present status of lightning flash counter observations. In: Planetary electrodynamics. (Ed. by S. G. Coronity and J. Hughes), Gordon and Breach Science Publishers, New York, London, Paris, 1969, vol. 2, p. 43.
108. Horner F., Bradley P. A. The spectra of atmospheric from near lightning discharges.— „J. Atm. and Terr. Phys.”, 1964, vol. 26, p. 1155—1166.
109. Horner F., Clarke C. Some waveforms of atmospheric and their use in the location of thunderstorms.— „J. Atm. and Terr. Phys.”, 1955, vol. 7, p. 1—13.
110. Israël H. von. Atmosphärische Elektrizität, 1961, Leipzig, Bd II, 503 S.
111. Ito K., Kato T., Iwai A. Local lightning flash counter within 20 km. Proc. Res. Inst. Atmospheric, Nagoya Univ., 1955, vol. 3, p. 69—74.
112. Jöhler I. R. Concerning limitations and further corrections to geometric—optical theory for LF, VLF propagation between the ionosphere and the ground.— „J. Res. NBS”, 1964, p. 1—13.
113. Kaiser H. von., Schulze H. G. Blitzzählgeräte und Ihre Anwendung für die Ortung von Gewitterherd. Zeitschrift für Meteorologie. 1960, Bd 14, H. 2, S. 50—55.
114. Kimpara A. Electromagnetic energy radiated from lightning. Problems of Atmospheric and space electricity. Proc of the III-d Int. Conf. on Atm. and Space Electr., 1965, p. 352—365.
115. Kitagawa N., Brook M. A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges.— „J. Atm. and Terr. Phys.”, 1960, vol. 65, N 4, p. 1189—1202.
116. Kohl D. A. A 500-kHz sferics range detector.— „J. Appl. Meteorol.”, 1969, vol. 8, N 4, p. 610—617.
117. Leary T. P. Range and bearing indication of geographically remote sources of electromagnetic radiation. Patent N 3369240. Oficial Gazette, 1968, 13 febr., vol. 847, p. 50.
118. Lejay P. Les perturbations orangeuses du champ électrique et leur propagation a grande distance. L'Onde électr., 1926, vol. 5, N 58, p. 493—531.
119. Ligda M. The radar observation of lightning channels.— „J. Atm. and Terr. Phys.”, 1956, vol. 9, p. 329—346.
120. Malan D. I. La distribution verticale de la charge négative orangeuse. Ann. Geophys., 1955, 11(4), p. 420—426.
121. Malan D. I. Lightning counter for flashes to ground. Proc. Int. Conf. central electricity Res. Lab., England, 1962, p. 112—116.
122. Malan D. I., Schonland B. F. J. Progressive lightning. Part 7. Proc. Roy. Soc., 1947, A191, p. 513—523.

123. Morrison R. B. The variation with distance in the range 0—100 km of atmospheric waveform. *Phyl. Mag.*, 1953, vol. 44, p. 980—986.
124. Müller—Hillebrand G. Magnetic field of the lightning discharge. *Proc. Int. Conf. Gas Disch. and Electr. Supply Industry*, London, 1962, p. 89—110.
125. Müller—Hillebrand G. Lightning counters. I. *Ark. Geophys.* 1963, Bd 4, N 10, S. 247—269.
126. Müller—Hillebrand G., Johanesen O., Saraoja E. K. Lightning counter measurements in Scandinavia. *Proc. IEE*, 1965, vol. 112, p. 203—210.
127. Pierce E. T. Electrostatic field changes due to lightning discharges. *Quart.—„J. Roy. Meteorol. Soc.”*, 1955, 81(348), p. 211—228.
128. Pierce E. T. The influence of individual variations in the field changes due to lightning discharges upon the design and performance of lightning flash counters. *Arch. Meteorol., Geophys. und Bioklimatol. Wien*, 1956, 9A, N 1, S. 78—86.
129. Pierce E. T. Atmospherics— their characteristics at source and propagation. *Introductory Review Paper, XV-th general Assembly of IURSJ*, Munchen, 1961.
130. Reynolds S. E., Nail W. H. The distribution and discharge of thunderstorm charge—centers.— „*J. Meteorol.*”, 1955, vol. 12, p. 1—12.
131. Ruhnke L. H. Distance to lightning strokes as determined from electrostatic field strength measurements.— „*J. Appl. Meteorol.*”, 1962, vol. 1, N 3, p. 544—547.
132. Sao K. A note on phase-frequency spectra analysed from wave forms of atmospherics.— „*J. Atm. and Terr. Phys.*”, 1962, vol. 24, N 11, p. 993—996.
133. Schonland B. F. J. *Handbuch der Physic.* 1956, 578 S.
134. Schonland B. F. J., Elder I. S., Hodges D. B., Phillips W. E., Van Wyk I. W. The waveforms of atmospherics at night. *Proc. Roy. Soc.*, 1940, A176, p. 180—202.
135. Skeib G., Kaiser H., Popp C. Die Reilung atmosphärischer storungen durch synchronaufnahme von Richtung und Wellenform. *Abhand. Meteorol. und Hydr. Dienst. DDR*, 1958, vol. 7, N 48, S. 51.
136. Srivastava K. L. M. Return stroke velocity of a lightning discharge.— „*J. Geophys. Res.*”, 1966, vol. 71, N 4, p. 1283—1287.
137. Sullivan A. W., Wells J. D. A lightning stroke counter. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1957, vol. 38, N 5, p. 291—294.
138. Sullivan A. W., Wells J. D., Dinger H. E. Radio receiver counts lightning strokes. *Electronics*, 1954, vol. 27, N 10, p. 158—159.
139. Takeuti T. Studies on thunderstorm electricity, cloud discharge.— „*J. Geomagnetism and Geoelectricity*”, 1965, 17, p. 59—68.
140. Takeuti T., Nakata H. Registriergerät für Gewitter im Umkreis von 200 km. *Meteorol. Rdsch.* 1972, vol. 25, N 1, S. 23—25.
141. Taylor W. L. Radiation field characteristics of lightning discharges in the band of 1 kc/s to 100 kc/s.— „*J. Res. NBS*”, 1963, 67D, p. 539—550.

142. Uman M. A., McLain D. K. Magnetic field of lightning return stroke.— „J. Geophys. Res.”, 1969, vol. 74, N 28, p. 6899—6910.
143. Uman M. A., McLain D. K. Radiation field and current of the lightning stepped leader.— „J. Geophys. Res.”, 1970, vol. 75, N 6, p. 1058—1066.
144. Wadehra N. S., Tantry B. A. P. Phase spectra of distant atmospherics.— „J. Atm. and Terr Phys.”, 1967, vol. 29, N 11, p. 1453—1457.
145. Wagner C. F. The lightning stroke as related to transmission line performance. *Electr. Engr.*, 1963, vol. 82, p. 339—347.
146. Wait I. R. *Electromagnetic waves in stratified media*. London, Perg. press, 1962. 372 p.
147. Watson-Watt R. A., Herd J. P. An instantaneous direct-reading radiogoniometer. *JIEE*, 1926, vol. 64, p. 611.
148. Workman E. G., Brook M., Kitagawa N. Lightning and charge storage.— „J. Geophys. Res.”, 1960, vol. 65, p. 1513—1517.
149. Workman E. G., Holzer R. E., Pelsor G. T. The electrical structure of thunderstorms. *Tech. notes Nat. advisory comm. aeron.* Washington, 1942, N 864, p. 1—47.
150. Zonge K. L., Evans W. H. Prestroke radiation from thunderclouds — „J. Geophys. Res.”, 1966, vol. 71, N 6, p. 1519—1523.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4

1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕЛЕНГАЦИИ И ДАЛЬНОМЕТРИИ ГРОЗОВЫХ ОЧАГОВ

1.1. Общие характеристики грозовой деятельности	8
1.2. Развитие грозовой активности. Разрядные процессы	9
1.3. Электромагнитное излучение молниевых разрядов	12
1.4. Электродинамическая модель молниевых разрядов	21
1.5. Некоторые особенности распространения атмосфериков над земной поверхностью	27
1.6. Физические основы построения однопунктовых дальномеров	38

2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НА ИСТОЧНИК МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА

2.1. Структурные схемы грозопеленгаторов	44
2.2. Антенны грозопеленгаторов	52
2.3. Приемные устройства	59
2.4. Ошибки грозопеленгаторов, определяемые условиями распространения волн	60
2.5. Имитаторы	65

3

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ГРОЗОВОГО ОЧАГА

3.1. Метод амплитудной селекции	70
3.2. Метод раздельного анализа E и H составляющих поля	89
3.3. Другие методы определения расстояния до грозовых очагов	99

ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРЫ-ДАЛЬНОМЕРЫ

4.1. Грозопеленгатор с ограничителем дальности действия	104
4.2. Грозопеленгатор с ограничением дальности действия и секторным документированием	113
4.3. Грозопеленгатор с дальномером в виде амплитудного многопорогового анализатора	116
4.4. Грозопеленгатор с дальномером, работающим по методу раздельного анализа E и H составляющих электромагнитного поля	119
4.5. Грозопеленгатор с дальномером, работающим по методу сравнения спектральных составляющих	121
4.6. Грозопеленгатор с дальномером, работающим по методу анализа ионосферных отражений	122
4.7. Описание методики проверки статистических характеристик грозопеленгатора и грозопеленгаторов-дальномеров	125
Заключение	131
Список литературы	133

Ната Владимировна Бару
Игорь Иванович Кононов
Моисей Едидевич Соломоник

**РАДИОПЕЛЕНГАТОРЫ-
ДАЛЬНОМЕРЫ
БЛИЖНИХ ГРОЗ**

Редактор Л. В. Царькова. Художник И. Н. Фаррахов. Худ. редактор В. А. Баканов.
Техн. редактор М. И. Брайнина. Корректор А. В. Хюркес

Сдано в набор 23/IV 1976 г. Подписано к печати 9/VIII 1976 г. М-19766. Формат
60×90^{1/16}. Бум. тип. № 1. Печ. л. 9. Уч.-изд. л. 9,11. Тираж 1300 экз. Индекс МЛ-152.

Заказ № 193. Цена 92 коп. Гидрометеиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.
Ленинградская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.

Предлагаемая книга посвящена проблеме создания пеленгационно-дальномерных устройств для оперативного определения местоположения гроз в радиусе нескольких сот километров.

Рассматриваются способы определения направления и расстояния до молниевых разрядов. Особое внимание уделяется анализу различных методов дальнометрии гроз, определению их вероятностных точностных характеристик и аппаратурной реализации.

