

Министерство общего и профессионального образования РФ

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Л. И. ДИВИНСКИЙ

**ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЛАКА
НА ИНДИКАТОРАХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ**

Расчетное задание по курсу
"Основы метеорологической радиолокационной техники"

Специальность – метеорология

Специализация – информационно-измерительные
системы в метеорологии

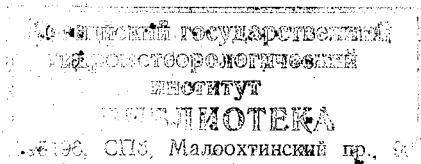
Санкт-Петербург
1998

Дивинский Л. И. Формирование изображения облака на индикаторах метеорологической радиолокационной станции. Расчетное задание по курсу «Основы метеорологической радиолокационной техники». – СПб.: изд. РГТМУ. 1998 – 53 с.

Излагаются принципы формирования отраженного от облака радиолокационного сигнала и процессы его трансформации при прохождении по тракту метеорологической радиолокационной станции. Задаются технические характеристики радиолокационной станции и параметры облака с детерминированными в пространстве и не изменяющимися во времени радиолокационными характеристиками. Излагается методика расчета выходного напряжения приемного устройства радиолокационной станции и структурных особенностей изображения облака на экранах индикатора кругового обзора и индикатора типа дальность-высота при разных условиях распространения радиоволн и разных режимах работы метеорологического радиолокатора.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГТМУ). 1998.

© Дивинский Л. И. 1998.



ВВЕДЕНИЕ

Цель задания – расчет процесса формирования изображения на экранах индикаторов метеорологической радиолокационной станций (РЛС) при отражении сигнала от облака. Учитываются особенности трансформации зондирующего импульса и отраженного сигнала при их распространении в пространстве и прохождении по приемо-передающему тракту метеорологической радиолокационной станции.

Расчетное задание выполняется студентами четвертого курса метеорологического факультета, специализирующимися по информационно-измерительным системам в метеорологии.

Для выполнения расчетного задания, типичный пример которого приведен в приложении (см. стр. 49), студентам выдаются индивидуальные исходные данные, включающие:

1. Основные технические характеристики радиолокационной станции, которые близки к техническим характеристикам современных метеорологических радиолокаторов.

2. Параметры, описывающие облако.

3. Сферические координаты точки M , находящейся внутри облака.

В задании предполагается, что на трассе от РЛС до облака радиоволны распространяются без ослабления. Считается, что облако имеет форму эллипсоида с детерминированными (не случайными) пространственными и временными функциями радиолокационной отражаемости и коэффициента ослабления радиоволн. Задается положение центра облака в сферической системе координат. Приводятся функциональные зависимости, которые определяют пространственные изменения радиолокационной отражаемости облака и коэффициента ослабления радиоволн в декартовой системе координат. Центр декартовой системы координат совпадает с центром облака, а оси – с полуосями эллипсоида, которые ориентированы вертикально, на север и на восток. Задаваемые функциональные зависимости типичны для мощных кучево-дождевых облаков, в которых наблюдаются грозовые и градовые процессы.

Студент должен выполнить четыре раздела расчетной работы.

По первому разделу необходимо выполнить расчет выходных напряжений приемника РЛС при отражении сигнала от заданной области пространства – частиц, находящихся в окрестности точки M облака. Напряжения определяются для случаев работы приемного тракта РЛС с выключенной и включенной системой коррекции сигнала на расстояние. При расчетах предполагается, что при распространении радиоволн их ослабления за счет рассеяния и поглощения не происходит.

В результате расчетов должны быть определены:

1) координаты точки M облака в декартовой системе координат, центром которой совпадает с центром облака;

2) ширина угла диаграммы направленности антенной системы РЛС в градусах и радианах;

3) коэффициент направленного действия антенны РЛС;

4) коэффициент усиления антенны РЛС;

5) отражающий объем пространства;

6) эффективная отражающая поверхность цели;

7) мощность зондирующего импульса на входе антенны РЛС;

8) мощность излученного сигнала;

9) плотность потока мощности зондирующего импульса в точке M облака;

10) мощность отраженного сигнала;

11) плотность потока мощности отраженного сигнала у антенны радиолокационной станции;

12) эффективная площадь приема антенны РЛС;

13) мощность отраженного сигнала на выходе антенны РЛС;

14) мощность отраженного сигнала на входе приемника РЛС при выключенной системе коррекции сигнала на расстояние;

15) постоянная радиолокационной станции C_A ;

16) выходное напряжение приемника РЛС при выключенной системе коррекции сигнала на расстояние;

17) мощность отраженного сигнала на входе приемника РЛС при включенной системе коррекции сигнала на расстояние;

18) выходное напряжение приемника РЛС при включенной системе коррекции сигнала на расстояние;

19) радиолокационная отражаемость облака в точке M , выраженная в различных единицах, которые применяются в метеорологической радиолокации — Z_r , Z_d , $lg(Z_r)$, $lg(Z_d)$, $n_{(dBz)}$.

По второму разделу необходимо вычислить коэффициент ослабления радиоволн (в дБ/км) за счет их рассеяния и поглощения и ослабление (в дБ) для разных точек пространства вдоль луча, исходящего от радиолокационной станции в направлении точки M , находящейся внутри облака.

В результате расчетов должна быть составлена таблица с данными о коэффициенте ослабления радиоволн (в дБ/км), ослаблении радиоволн (в дБ) и отражаемости различных точек облака (в m^{-1}). По результатам расчетов должны быть построены графики зависимости радиолокационной отражаемости, коэффициента ослабления радиоволн и ослабления радиоволн от расстояния.

По третьему разделу расчетной работы необходимо вычислить выходные напряжения приемного устройства РЛС. Напряжения определяются для двух различных условий распространения радиоволн (в предположении,

что при распространении радиоволн в облачной среде не происходит их ослабления и с учетом ослабления радиоволн за счет их поглощения и рассеяния в среде) и при двух различных режимах работы приемного тракта РЛС (с выключенной и включенной системой коррекции сигнала на расстояние). Вычисления проводятся для интервала расстояний, в пределах которого находится зондируемое облако, с шагом, равным одному километру для целочисленных значений расстояния. Результаты расчетов представляются в виде таблицы с данными о выходных напряжениях приемного устройства РЛС и радиолокационной отражаемости в зависимости от расстояний. Зависимости выходных напряжений приемника РЛС и радиолокационной отражаемости от расстояния должны быть представлены в виде графиков. Зависимости напряжений от расстояния на графиках соответствуют изображению отраженного от облака сигнала на экране индикатора типа дальность-амплитуда (ИДА).

Для каждого варианта расчетов определяется расстояние до точки, от которой наблюдается максимальный отраженный сигнал, и результаты расчетов сопоставляются с истинным расстоянием до точки максимальной отражаемости. Анализируются причины расхождения данных при разных условиях зондирования.

По четвертому разделу вычисления выполняются на ЭВМ по уже подготовленной для расчетов программе. В результате расчетов на мониторе ЭВМ формируются изображения облака. Эти изображения аналогичны формируемым на экранах индикаторов кругового обзора (ИКО) и типа дальность-высота (ИДВ) при условии, что технические характеристики РЛС и параметры зондируемого облака соответствуют приведенным в условиях задания (см. приложение на стр. 49).

При расчетах предполагается, что в радиолокаторе имеется и находится во включенном состоянии блок обработки и многоконтурного отображения (БОМО) метеорологической информации.

Для каждого типа индикатора выполняются 4 варианта расчетов:

1. При выключенной системе коррекции сигнала на расстояние в предположении, что радиоволны распространяются без ослабления.
2. При включенной системе коррекции сигнала на расстояние в предположении, что радиоволны распространяются без ослабления.
3. При выключенной системе коррекции сигнала на расстояние с учетом ослабления радиоволн в облачной среде.
4. При включенной системе коррекции сигнала на расстояние с учетом ослабления радиоволн в облачной среде.

По результатам расчетов на ЭВМ в отчете должны быть приведены изображения облака, наблюдаемые на экране монитора, и сделаны выводы о характере влияния системы коррекции сигналов на расстояние и ослабления радиоволн на структуру формируемых изображений.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФОРМИРОВАНИИ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА

Процессы, происходящие при радиолокационном зондировании, поясняются рис. 1, на котором изображена упрощенная функциональная схема РЛС и гипотетическое облако. Облако в данной расчетной работе задано в форме эллипсоида – геометрической фигуры, любое плоское сечение которой имеет форму эллипса. В этом облаке радиолокационная отражаемость и коэффициент ослабления радиоволн имеют максимальные значения в его центре (в точке O рис. 1) и монотонно уменьшаются в соответствии с гауссовской зависимостью к периферии.

Облака, подобного приведенному в задании, в природе не существует. В данном расчетном задании оно имеет детерминированные (не случайные) характеристики, однако его основные радиолокационные параметры близки к тем, что наблюдаются у реально существующих облаков. Заданным параметрам соответствует облако, имеющее в горизонтальном сечении размеры (10 – 25) км, а в вертикальном – (8 – 14) км. При длине волны 3,2 см радиолокационная отражаемость в его центре доходит до $(10^{-7} - 10^{-8}) \text{ см}^{-1}$, а коэффициент ослабления радиоволн до (2 – 3,5) дБ/км. Таким образом, оно по своим параметрам соответствует развитому кучево-дождевому облаку, в котором происходят грозовые и градовые процессы.

Детерминированные параметры облака позволяют легче проанализировать процесс формирования отраженного сигнала и понять механизмы появления искажений, возникающих в радиолокационном изображении облака на экранах индикаторов.

Рассмотрим более подробно особенности процесса радиолокационного зондирования с помощью метеорологической РЛС.

В радиолокационной станции (см. рис. 1) имеется блок запуска, который вырабатывает периодическую последовательность кратковременных импульсов. Эти импульсы, как показано на рис. 1, воздействуют на передатчик РЛС. Импульсы запуска поступают также и на другие системы РЛС, что не отображено на упрощенной функциональной схеме.

При поступлении импульса запуска на вход передатчика РЛС начинается генерация сверхвысокочастотной (СВЧ) мощности $P_{\text{пер}}^*$. Зондирующий импульс метеорологических радиолокационных станций, как правило, имеет малую длительность (обычно в интервале от 0,5 до 4,0 мкс). Импульсная мощность $P_{\text{пер}}$ от передатчика поступает через антенный коммутатор к антенне. Зондирующий импульс проходит по элементам волнового тракта. На упрощенной схеме (см. рис. 1) не показаны многие узлы, по которым СВЧ мощность передается к антенне. В цепи, передающей СВЧ энергию от передатчика к антенне, наряду с участками обычных волноводов, имеются также специальные устройства, в том числе:

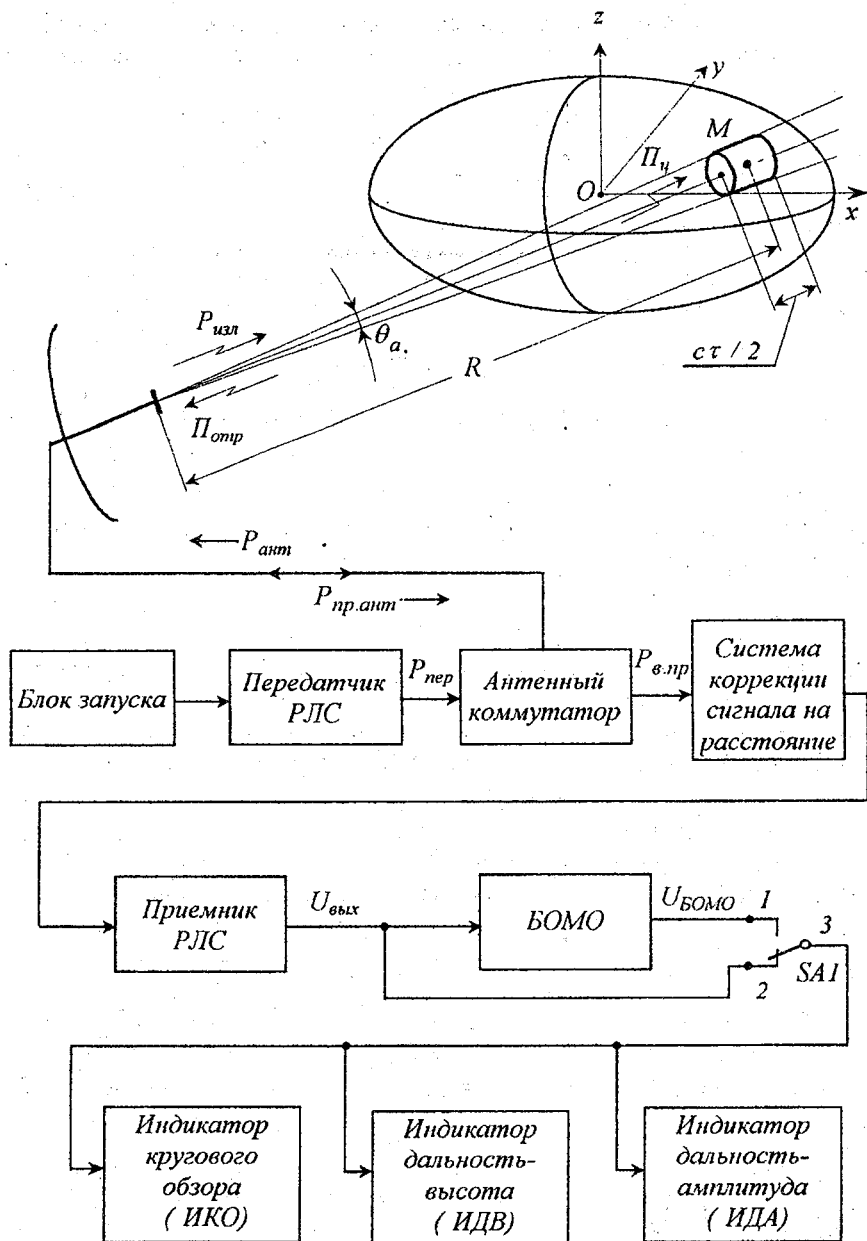


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема, поясняющая принцип формирования изображения на индикаторах радиолокационной станции.

– ферритовый циркулятор, обеспечивающий направленную передачу потоков энергии от передатчика РЛС к антенне и от антенны к приемнику РЛС;

– направленные ответвители для присоединения измерительных приборов;

– встроенные секции для измерения мощности $P_{ант}$ СВЧ импульса, поступающего к антенне;

– вращающиеся сочленения (азимутальное и угломестное).

Во всех этих устройствах теряется мощность, генерируемая передатчиком. Эти потери (в дБ), приведенные в исходных данных (см. приложение на стр. 49), определяются величиной затухания $\xi_{пер}$ в волноводном тракте в режиме передачи. Следовательно, до антенны доходит только часть выходной мощности $P_{пер}$ передатчика РЛС. На рис. 1 эта мощность обозначена на $P_{ант}$.

Антенна не является идеальным преобразователем энергии. Ее коэффициент полезного действия $\eta_{ант}$ обычно находится в интервале (0,5–0,6), т.е. излучаемая мощность $P_{изл}$ меньше мощности $P_{ант}$, подведенной к антенне.

В метеорологических радиолокационных станциях излучаемая мощность направляется антенной в пространство в виде узкого луча, имеющего форму слабо расходящегося конуса. Поэтому в точке M (см. рис. 1) возникает электромагнитное поле, интенсивность которого характеризуется плотность потока мощности Π_{λ} (плотность потока мощности в районе цели).

При зондировании облака в приемник поступают сигналы, которые отражаются от большого числа частиц. Каждая частица рассеивает падающую на нее электромагнитную волну во все стороны, в том числе назад к радиолокационной станции. Отраженный сигнал создает у антенны РЛС электромагнитное поле, характеризующееся плотностью потока мощности $\Pi_{отр}$. В результате на выходе антенны появляется отраженный сигнал, мощность которого обозначена $P_{пр.ант}$. Он проходит через волноводный тракт и антенный коммутатор, вносящие затухание в проходящий сигнал. В результате на систему коррекции сигнала на расстояние поступит несколько меньшая мощность $P_{в.пр}$, чем была на выходе антенной системы РЛС.

Система коррекции может быть выключена, и тогда отраженный сигнал проходит через нее практически без потерь. Но если система коррекции на расстояние включена, то чаще всего, как например, в радиолокационной станции МРЛ-5, она ослабляет проходящий через нее сигнал. Ослабление сигнала системой коррекции уменьшается с ростом расстояния до отражаю-

щего объекта и становится пренебрежимо малым, когда расстояние равно или превышает 100 км.

С выхода системы коррекции сигнала на расстояние отраженный сигнал подается на приемник с логарифмической амплитудной характери-

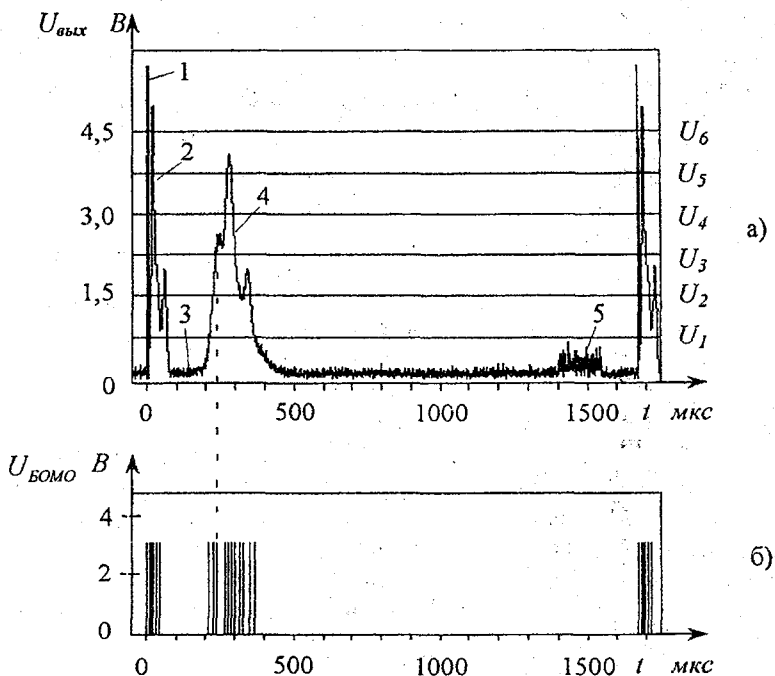


Рис. 2. К пояснению особенностей формирования сигналов БОМО метеорологической информации.

кой. Выходное напряжение приемника поступает на переключатель SA1 (на контакт 2) и на вход БОМО метеорологической информации. Выход БОМО метеорологической информации также соединен с переключателем SA1. Таким образом, к индикатору кругового обзора (ИКО), индикатору типа дальность-высота (ИДВ) и индикатору типа дальность-амплитуда (ИДА) поступает либо выходное напряжение приемника $U_{\text{вых}}$ (если в переключателе SA1 соединены контакты 2 и 3), либо выходное напряжение БОМО метеорологической информации $U_{\text{БОМО}}$ (если соединены контакты 1 и 3). Эти выходные напряжения функционально взаимосвязаны и характер их связи показан на рис. 2.

Выходное напряжение приемного тракта МРЛ на экране осциллографа имеет форму, представленную на рис. 2 а. В момент запуска передатчика, обозначенный как начальный момент ($t = 0$), происходит излучение

зондирующего импульса. В радиолокационных станциях предпринимаются меры защиты приемного устройства от проникновения на его вход мощности во время генерации зондирующего СВЧ импульса. Однако, при генерации СВЧ, напряжение зондирующего импульса обычно столь значительно, что на вход приемника все-таки проходит очень большая мощность, которая, как правило, приводит к насыщению приемного тракта. Поэтому в момент генерации зондирующего импульса на выходе приемника возникает кратко-временное напряжение большой амплитуды (фрагмент 1 выходного напряжения на рис. 2 а). Длительность фрагмента примерно равна длительности зондирующего импульса.

После завершения генерации СВЧ мощности наблюдается явление "парализации", — приемник на короткое время теряет чувствительность и выходной сигнал исчезает (пауза между фрагментами 1 и 2 на рис. 2 а). Когда чувствительность приемника восстанавливается, на его выходе сначала появляются сигналы, связанные с отражениями от близлежащих местных предметов (фрагмент 2 рис. 2 а). Это результат излучения антенной радиоволн не только в направлении главного максимума, но и в побочных направлениях называемыми "боковыми лепестками". В боковые лепестки уходит незначительная доля от общей излученной мощности. Но на небольшом удалении от РЛС зондирующий импульс создает во всех направлениях достаточно интенсивные электромагнитные поля. Поэтому сигналы, отраженные от близко расположенных объектов, могут иметь интенсивность, достаточную, чтобы наблюдаться радиолокационной станцией. Обычно сигналы, отраженные близкими местными предметами, наблюдаются на расстояниях до (2–6) км и не пропадают при изменении положения диаграммы направленности в пространстве. Эти сигналы, называемые "местниками", мешают проводить наблюдения за близкими облаками. Поэтому, как правило, стараются установить радиолокационную станцию так, чтобы ее антенна, по возможности, возвышалась. Обычно антенны РЛС устанавливают на крышах высоких зданий, на высоких холмах или насыпных буграх, что уменьшает пространственную протяженность "местников".

После того как исчезнут сигналы, отраженные от близлежащих местных предметов, начинают наблюдаться собственные шумы приемного тракта РЛС (фрагмент 3 рис. 2 а) и сигналы, отраженные от облачных образований (фрагмент 4 рис. 2 а). Шумовая составляющая представляет собой хаотически меняющееся напряжение малой амплитуды. Отраженный от облака сигнал характеризуется обычно большой пространственной протяженностью и относительно сильными флуктуациями амплитуды. Если облако имеет высокую отражаемость и находится на небольшом расстоянии от РЛС, то уровень отраженного сигнала велик. С увеличением расстояния и уменьшением отражаемости облака сигнал падает, и на значительном удалении от РЛС отражения от облаков наблюдаются не всегда, а лишь в тех случаях, когда об-

лака имеют достаточно высокую радиолокационную отражаемость и большую высоту верхней границы радиозаха.

Для того чтобы можно было контролировать чувствительность приемного тракта метеорологического радиолокатора и осуществлять автоматическую стабилизацию его усиления, в приемный тракт вводится еще одна компонента выходного сигнала, отображаемая фрагментом 5 на рис. 2 а. Для этого в радиолокационной станции с периодом повторения импульсов запуска включается специальный генератор, вырабатывающий калиброванное по мощности, широкополосное шумовое напряжение СВЧ. Его работа воспринимается в виде кратковременного увеличения шумоподобного напряжения на выходе приемного устройства РЛС. Начало генерации шумового калибровочного импульса запаздывает относительно момента посылки в пространство зондирующего импульса (в данном примере приблизительно на 1400 мкс). Временное запаздывание столь значительно, что соответствующее ему расстояние до отражающих объектов превышает максимальную дальность обнаружения целей. Поэтому появившийся калибровочный шумоподобный импульс практически суммируется только с собственным шумовым напряжением приемника.

Если на ИКО или ИДВ выходное напряжение приемника поступает без предварительной обработки, то формируемое изображение облака имеет вид засветки соответствующей части экрана, яркость свечения различных точек которой зависит от уровня отраженного сигнала. Судить о пространственном распределении отражаемости во внутренних частях облака по распределению яркости различных точек засветки практически невозможно. Достаточно точно можно оценить радиолокационную отражаемость лишь для тех точек пространства, которые находятся на границе области засветки и которым соответствует уровень мощности входного сигнала приемника, равный его реальной чувствительности. Для точек, находящихся на границе области засветки, радиолокационная отражаемость рассчитывается по известной реальной чувствительностью приемного тракта РЛС и расстоянию до соответствующей точки облака.

Для того, чтобы оценить пространственное распределение отражаемости во внутренней части облака, в волноводный тракт, по которому поступает сигнал к приемнику, вводится дополнительное ослабление. Оно вводится с помощью специального регулируемого ослабителя, не показанного на упрощенной принципиальной схеме рис. 1. Чем больше введенное ослабление, тем меньше будет амплитуда отраженного сигнала на выходе приемника и тем меньше будет площадь области засветки на экранах ИКО и (или) ИДВ. При таком способе наблюдения (без предварительной обработки выходного сигнала приемника РЛС), для того чтобы судить о распределении отражаемости в облаке, необходимо выполнить несколько циклов обзора пространства, меняя в каждом цикле уровень ослабления, вносимого в волноводный тракт сигнала.

Пространственное распределение отражаемости в облаке можно определить гораздо эффективнее, если использовать блок обработки и многоконтурного отображения (БОМО) метеорологической информации. В этом блоке выходное напряжение приемника сравнивается с совокупностью уровней постоянных напряжений $U_1, U_2, \dots, U_6$ (см. рис. 2 а). Напряжения $U_1, U_2, \dots, U_6$ подбираются при настройке радиолокатора и системы БОМО метеорологической информации. В момент, когда изменяющееся выходное напряжение приемника становится равным любому из этих уровней, на выходе БОМО появляется кратковременный импульс напряжения. Выходное напряжение БОМО ($U_{\text{БОМО}}$) в виде большой совокупности коротких импульсов представлено на рис. 2 б. На рис. 2 пунктирной линией, соединяющей рис. 2 а и 2 б, проиллюстрирован момент появления одного из импульсов на выходе БОМО. Импульс возникает в момент, когда выходное напряжение приемника пересекает уровень постоянного напряжения U_3 .

Как видно из приведенного рисунка, на выходе БОМО отсутствует шумовое напряжение, а сигнал имеет форму очень коротких импульсов одинаковой амплитуды и длительности. Если такие импульсы поступят на вход ИКО и ИДВ, то они приведут к появлению на экранах индикаторов небольших светящихся точек, имеющих одинаковую яркость свечения. При вращении антенны светящиеся точки сформируют совокупность изолиний равной мощности входного сигнала приемного устройства РЛС. Каждая изолиния связана со своим уровнем напряжения $U_1, U_2, \dots, U_6$ и, следовательно, со своим уровнем мощности входного сигнала приемника.

Однако, изображение, формируемое из сигнала, поступающего с выхода БОМО, все-таки содержит шумоподобную компоненту. Как известно, радиолокационное отражение от объемно-распределенных целей, имеет флуктуирующий характер [2 – 4]. Поэтому в различных циклах зондирования интервалы времени между моментом посылки зондирующего импульса и моментами появления выходных импульсов БОМО также флуктуируют. Следовательно, изображение, сформированное в течение нескольких циклов зондирования, будет иметь форму относительно широких линий, центральная часть которых просматривается более отчетливо и насыщено, а периферийная имеет характерную "размытость". Этим реальное изображение отличается от рассчитываемого на ЭВМ в данном задании. Поскольку анализируемое в задании "облако" определено как детерминированное и при расчетах на ЭВМ не учитываются флуктуации отраженного сигнала, то изображение облака формируется в виде тонких "не размытых" изолиний.

Как уже упоминалось, изолинии на экранах ИКО (ИДВ) соответствуют точкам облака, отражение от окрестности которых создает сигнал одинакового уровня мощности на входе приемного устройства РЛС. В облаке им, как правило, не соответствуют линии равной отражаемости. Соответствие изолиниям отражаемости могло бы наблюдаться лишь при отсутствии ос-

лабления радиоволн в облаке и работе радиолокатора с включенной системой коррекции сигнала на расстояние. Поскольку радиоволны при распространении в облаке всегда ослабляются, точного соответствия достичь невозможно. Но в дециметровом диапазоне радиоволн, в котором облака вносят очень малое ослабление, при включенной системе коррекции сигнала на расстояние получаемые изолинии практически соответствуют линиям равной отражаемости в облаке.

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ТОЧКИ M ОБЛАКА

(первый раздел расчетной работы)

С учетом вышеизложенного рассмотрим более подробно процесс формирования сигнала, отраженного от заданной точки M облака.

В расчетном задании положение точки M в пространстве определено координатами R, θ, φ в сферической системе координат, центр которой совпадает с положением фазового центра антенной системы РЛС.

Поясним понятие "фазовый центр антенны". В дальней зоне пространства наблюдается расходящийся от антенны поток электромагнитной энергии. Фазовый центр антенны – это точка, из которой как бы выходит расходящийся поток. Для параболических антенн метеорологических радиолокационных станций с некоторыми упрощениями можно предполагать, что как бы "источником" расходящегося потока радиоволн является точка, расположенная в вершине параболического отражателя антенны. В системе координат, начало которой совпадает с фазовым центром антенны, центр облака (точка O) имеет координаты R_0, θ_0, φ_0 , а точка M – координаты R, θ, φ . Но основные радиолокационные характеристики облака, – радиолокационная отражаемость и коэффициент ослабления радиоволн в его различных точках, в задании приведены в прямоугольной системе координат $Oxyz$. Начало системы координат $Oxyz$ совпадает с центром O облака, ось Oy направлена на север, Ox – на восток, а Oz – вертикально вверх. Поэтому для вычисления радиолокационных характеристик облака в заданной точке M необходимо найти ее координаты x_M, y_M и z_M в прямоугольной системе координат $Oxyz$.

Вывод соотношений, с помощью которых осуществляется переход от сферических координат точки M к ее декартовым прямоугольным координатам x_M, y_M и z_M той же точки M в координатной системе $Oxyz$, поясняется рис. 3.

Для перехода от сферических координат точки M к декартовым введена дополнительная декартовая прямоугольная координатная система O_1XYZ , центр O_1 которой совпадает с фазовым центром антенной системы РЛС, ось O_1Y направлена на север, ось O_1X – на восток и ось O_1Z – вер-

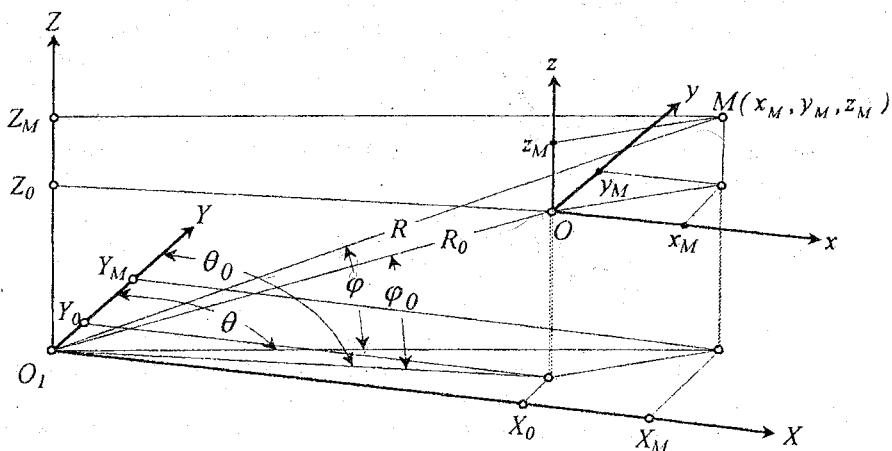


Рис. 3. К пояснению расчетных соотношений, определяющих переход от сферических координат к декартовым

тикально вверх. Центр облака O в системе прямоугольных координат O_1XYZ имеет декартовые координаты X_0, Y_0 и Z_0 равные:

$$X_0 = R_0 \cos \varphi_0 \sin \theta_0; \quad (1)$$

$$Y_0 = R_0 \cos \varphi_0 \cos \theta_0; \quad (2)$$

$$Z_0 = R_0 \sin \varphi_0. \quad (3)$$

Учитывая, что в системе координат O_1XYZ декартовые координаты точки M определяются через сферические координаты R, θ, φ соотношениями

$$X_M = R \cos \varphi \sin \theta; \quad (4)$$

$$Y_M = R \cos \varphi \cos \theta; \quad (5)$$

$$Z_M = R \sin \varphi, \quad (6)$$

получаем координаты точки M :

$$x_M = R \cos \varphi \sin \theta - R_0 \cos \varphi_0 \sin \theta_0; \quad (7)$$

$$y_M = R \cos \varphi \cos \theta - R_0 \cos \varphi_0 \cos \theta_0; \quad (8)$$

$$z_M = R \sin \varphi - R_0 \sin \varphi_0. \quad (9)$$

Соотношения (7) – (9) получились сравнительно простыми, так как координатные оси в системах координат $Oxyz$ и O_1XYZ параллельны. При произвольной ориентации координатных осей соотношения, определяющие переход из одной системы координат в другую, были бы сложнее.

Если передатчик РЛС генерирует мощность $P_{пер}$, то в волноводном тракте часть мощности теряется и к антенне поступает мощность $P_{ант}$ (см. рис. 1):

$$\sqrt{P_{ант}} = 10^{-\xi_{пер}/10} \sqrt{P_{пер}}, \quad (10)$$

где $\xi_{пер}$ – ослабление в волноводном тракте в режиме передачи, в дБ.

Антенна излучает не всю подаваемую на нее мощность. Ее коэффициент полезного действия $\eta_{ант}$ в типичных случаях, как уже упоминалось, находится в интервале (0,5 – 0,6). Поэтому излучаемая мощность будет меньше поступающей на вход антенны:

$$\sqrt{P_{изл}} = \eta_{ант} \sqrt{P_{ант}} \quad (11)$$

При изотропном излучении (т. е. равномерном во все стороны) плотность потока мощности на расстоянии R от антенны равнялась бы

$$\Pi_{изотр} = \frac{P_{изл}}{4\pi R^2}. \quad (12)$$

Однако антенна концентрирует поток излученной энергии в направлении цели. Излучаемая энергия сосредотачивается в пределах узкого телесного угла. Как известно, распределение интенсивности излучения в пространстве описывается функцией нормированной диаграммы направленности $F(\theta, \varphi)$. Эта функция показывает, как распределено в пространстве отношение плотности потока мощности на поверхности сферы, в центре которой находится антенна РЛС, к плотности потока мощности на этой же сфере в направлении максимального излучения. Функция $F(\theta, \varphi)$ отображается поверхностью в трехмерном пространстве (рис. 4). Так на рис. 4 а представлена диаграмма направленности идеализированной антенны, которая равномерно излучает в интервале углов ограниченных по азимуту значениями $0 < \theta < \theta_a$ и по углу места значениями $0 < \varphi < \varphi_a$, и равна нулю за пределами этих углов. Реальные антенны имеют диаграммы направленности достаточно сложных форм и их отображение на плоскости, как правило, трудно выполнимо. Поэтому чаще, при отображении функции $F(\theta, \varphi)$, ограничи-

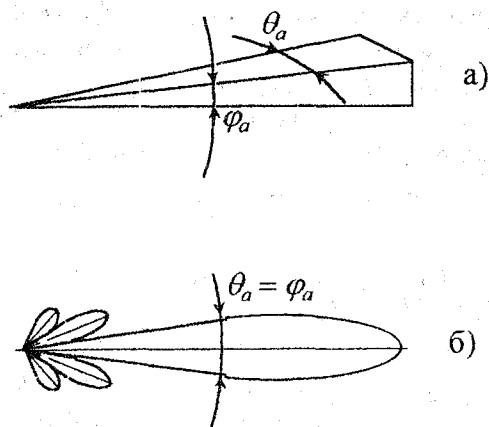


Рис. 4. Диаграммы направленности антенных систем

ваются сечениями диаграммы направленности. Обычно предполагается, что направление максимального излучения, в котором $F(\theta, \varphi) = 1$, находится в горизонтальной плоскости. Тогда направленные свойства антенн могут быть отображены сечениями диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Антенные системы метеорологических РЛС чаще всего имеют диаграмму направленности, характеризующуюся осевой симметрией, то есть они имеют одинаковые сечения в горизонтальной и вертикальной плоскости. Такие сечения диаграмм направленности легко отображаются на плоскости (см. рис. 4 б).

Еще более упрощенной характеристикой направленных свойств антенны является ширина угла диаграммы направленности или угол диаграммы направленности. Под ним понимается угол в секущей плоскости, проходящей через направление максимального излучения, между направлениями, в которых $F(\theta, \varphi) = 0,5$. Различают ширину угла диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскости. У антенн, обладающих осевой симметрией эти углы одинаковы. Тогда можно пользоваться понятием ширины угла диаграммы направленности антенной системы, не оговаривая плоскость, в которой он определяется (рис. 4 б).

Ширина угла диаграммы направленности параболических антенн зависит от диаметра параболического отражателя D_a и длины волны λ . Ширина угла диаграммы направленности θ_a (в градусах) определяется соотношением

$$\theta_a = (50 \div 70) \frac{\lambda}{D_a}. \quad (13)$$

Значение коэффициента зависит от распределения интенсивности облучающего поля по плоскости раскрытия параболического отражателя. Чем более слабо облучены края параболического отражателя, то есть чем менее эффективно используется площадь параболического отражателя, тем значительнее ширина угла диаграммы направленности. Но, как правило, при этом

у антенной системы получается меньший уровень боковых лепестков. Если облучающее поле на краях параболоида имеет высокую интенсивность, то ширина угла диаграммы направленности уменьшается, но диаграмма направленности характеризуется значительным уровнем боковых лепестков. При выполнении задания будем считать, что

$$\checkmark \theta_a = 60 \frac{\lambda}{D_a} \quad (14)$$

Поскольку радиолокационная антенна концентрирует поток мощности в пределах узкого угла, плотность потока мощности возле цели P_y будет превышать плотность потока мощности $P_{y, \text{изотр.}}$, которая наблюдалась бы при равномерном (изотропном) распределении излученной мощности в пространстве. Это превышение определяется безразмерной величиной, обозначаемой D и называемой коэффициентом направленного действия антенны. С учетом того, что в радиолокации угол места принято отсчитывать от горизонтальной плоскости коэффициент направленного действия определяется выражением, известным из теории антенных систем:

$$D = \frac{4\pi}{2\pi \int_0^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\theta, \varphi) \cos \varphi d\varphi d\theta}, \quad (15)$$

где $F(\theta, \varphi)$ – нормированная функция диаграммы направленности антенной системы.

Так, если предположить, что

$$F(\theta, \varphi) = \begin{cases} 1, & \text{при } \theta \in (0, \theta_a), \varphi \in (0, \varphi_a); \\ 0, & \text{при } \theta \in (\theta_a, \theta_b), \varphi \in (0, \varphi_a); \\ 0, & \text{при } \theta \in (0, \theta_a), \varphi \in (\varphi_a, \varphi_b); \\ 0, & \text{при } \theta \in (\theta_a, \theta_b), \varphi \in (\varphi_a, \varphi_b); \end{cases} \quad (16)$$

$$F(\theta, \varphi) = \begin{cases} 0, & \text{при } \theta \in (0, \theta_a), \varphi \in (0, \varphi_a), \end{cases} \quad (17)$$

то есть что функция $F(\theta, \varphi)$ соответствует изображенной на рис. 4 а, а также считать угол φ_a столь малым, что $\cos \varphi \approx 1$ для всех $\varphi < \varphi_a$, то выражение (15) после интегрирования принимает вид

$$D = \frac{4\pi}{\theta_a \varphi_a}, \quad (18)$$

где θ_a и φ_a выражены в радианах.

Если углы θ_a и φ_a определены в градусах, то выражение (18) преобразуется к виду часто встречаемому в литературе

$$D = \frac{4\pi}{\frac{\theta_a}{180} \cdot \pi \cdot \frac{\varphi_a}{180} \cdot \pi} = \frac{41253}{\theta_a \varphi_a}. \quad (19)$$

Однако реальные антенны, обладающие узкой, так называемой игольчатой диаграммой направленности, создают неравномерное распределение интенсивности потока мощности в пространстве и, как правило, имеют побочные направления излучения. Если сечение диаграммы направленности реальной антенны имеет форму, представленную на рис. 4 б, то часть энергии излучается в боковых направлениях, а в пределах главного максимума излученная энергия распределяется неравномерно. Поэтому коэффициент направленного действия антенны несколько ниже определяемого зависимостью (19). Он вычислен для различных функций диаграммы направленности и для инженерных расчетов более справедливо соотношение

$$\sqrt{D} = \frac{32000}{\theta_a^2}. \quad (20)$$

Таким образом, при последовательном использовании соотношении (14) и (20) определяется коэффициент направленного действия антенны D . С учетом усилительных свойств антенны можно вычислить плотность потока мощности зондирующего импульса в районе цели

$$P_{\eta} = D P_{\text{изотр}}. \quad (21)$$

Из приведенных соотношений, что для оценки плотности потока мощности в районе цели необходимо знать мощность излученного сигнала $P_{\text{изл}}$. Но, как правило, известной и измеряемой приборами встроенного контроля в радиолокаторе является мощность $P_{\text{пер}}$, поступающая от передатчика РЛС на вход антенны. Поэтому в радиолокации достаточно часто используется еще один параметр, характеризующий свойства антенны – коэффициент усиления антенны G , который в отличие от коэффициента направленного действия D , учитывает также к.п.д. антенны.

$$G = \eta_{\text{ант}} D. \quad (22)$$

Именно эта характеристика наиболее часто приводится в справочной литературе. При использовании коэффициента усиления антенны плотность потока мощности в районе цели определяется соотношением

$$\sqrt{P_u} = \frac{10^{-\xi_{\text{пер}}/10} P_{\text{пер}} G}{4\pi R^2} \quad (23)$$

Для определения мощности отраженного сигнала необходимо знать, чему равны плотность потока мощности в районе цели P_u , отражающий объем пространства $V_{\text{отр}}$ и распределение радиолокационной отражаемости

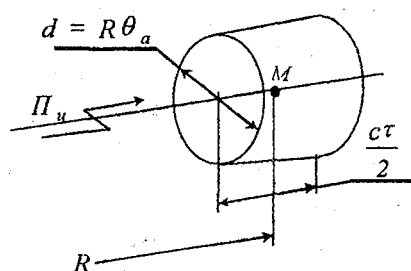


Рис. 5. К пояснению принципа определения отражающего объема пространства $V_{\text{отр}}$

в этом объеме. Отражающий объем — это та область пространства, из которой к радиолокационной станции одновременно приходят отраженные сигналы от всех находящихся внутри этого объема частиц. Представление об отражающем объеме пространства $V_{\text{отр}}$ дает рис. 5. Для антенн с игольчатой диаграммой направленности отражающий объем пространства $V_{\text{отр}}$ ограничен с боковых сторон конической поверхностью, вершина которой совпадает с фазовым центром антенны. Максимальный угол между образующими конуса предполагается равным

ширине угла диаграммы направленности антенной системы θ_a . Торцевыми поверхностями, ограничивающими отражающий объем пространства, являются две сферические поверхности, радиусы которых соответственно равны $R - ct/4$ и $R + ct/4$, где R — заданное расстояние до точки M . Как правило, точка M удалена на значительное расстояние от радиолокационной станции, существенно превышающее $ct/2$, а ширина угла диаграммы направленности θ_a невелика. Поэтому можно предположить, что отражающий объем пространства близок к цилиндрическому с длиной цилиндра $ct/2$. Поскольку на больших расстояниях от центра ограниченная часть сферической поверхности близка к плоскости, основания цилиндра можно считать плоскими и имеющими диаметр $d = R\theta_a$. В этой зависимости ширина диаграммы направленности антенной системы θ_a должна быть в радианах. Тогда отражающий объем пространства равен

$$\sqrt{V_{\text{отр}}} = \frac{\pi}{4} (R\theta_a)^2 \frac{c\tau}{2} \quad (24)$$

Данные о декартовых координатах точки M , полученные при расчетах (7) – (9), используются для определения радиолокационной отражаемости облака в точке M :

$$\eta(R, \theta, \varphi) = \eta(x_M, y_M, z_M) = \eta_0 \exp \left[- \left(\frac{x_M}{x_0} \right)^2 - \left(\frac{y_M}{y_0} \right)^2 - \left(\frac{z_M}{z_0} \right)^2 \right], \quad (25)$$

где η_0 – максимальное значение радиолокационной отражаемости в центре облака;
 x_0, y_0 и z_0 – параметры, характеризующие пространственные изменения отражаемости.

Предполагая, что радиолокационная отражаемость во всех точках отражающего объема пространства одинакова и равна $\eta(R, \theta, \varphi)$, находим эффективную отражающую поверхность цели – отражающего объема $V_{\text{отр}}$, в центре которого находится точка M с координатами R, θ, φ :

$$\sqrt{\sigma_{\text{ц}}} = \eta(R, \theta, \varphi) V_{\text{отр}}. \quad (26)$$

При проведении вычислений по формуле (26) следует учитывать, что в исходных данных η_0 приведена в см^{-1} , т.е. числом квадратных сантиметров эффективной отражающей поверхности цели в кубическом сантиметре объема облака ($\text{см}^2/\text{см}^3$). Поэтому перед тем, как выполнять вычисления, которые до сих пор производились с использованием всех измерений длины в метрах, необходимо полученную величину радиолокационной отражаемости $\eta(R, \theta, \varphi)$ (25) перевести из измеряемой в (см^{-1}), в величину, которая измеряется в ($\text{м}^2/\text{м}^3$), т.е. в (м^{-1}). Численно эта величина в 100 раз больше.

Если в районе цели известна плотность потока мощности $\Pi_{\text{ц}}$ (21), то, в соответствии с определением эффективной отражающей поверхности цели, облако изотропно рассеивает мощность

$$\sqrt{P_{\text{ц}}} = \sigma_{\text{ц}} \Pi_{\text{ц}}. \quad (27)$$

В результате на расстоянии R от цели, возле антенны радиолокационной станции, возникает отраженный сигнал, характеризующийся плотностью потока мощности $P_{отр}$

$$\sqrt{P_{отр}} = \frac{P_{\eta}}{4\pi R^2}. \quad (28)$$

Антенна имеет эффективную площадь

$$S_{эфф} = (0,6 \div 0,8) S_{раскр}, \quad (29)$$

где $S_{раскр} = \pi(D_a)^2/4$ – площадь раскрытия антенны. Здесь D_a – диаметр параболического отражателя.

При расчетах будем считать

$$\sqrt{S_{эфф}} = \frac{2}{3} S_{раскр}. \quad (30)$$

В результате на выходе антенны возникает сигнал, мощность которого равна

$$\sqrt{P_{пр. ант}} = P_{отр} S_{эфф}. \quad (31)$$

После прохождения по волноводному тракту, мощность отраженного сигнала уменьшится из-за потерь в волноводе и на выходе волноводного тракта станет равной

$$\sqrt{P_{в. пр}} = 10^{-0,1\xi_{пр}} P_{пр. ант}. \quad (32)$$

где $\xi_{пр}$ – потери в волноводном тракте в режиме приема, дБ.

Потери в волноводном тракте в режиме передачи мощности от передатчика РЛС к антенне не равны потерям в режиме прохождения отраженного сигнала от антенны к приемному тракту. Так, например, в радиолокационной станции МРЛ-5 в трехсантиметровом канале в режиме передачи потери мощности равны 2,3 дБ, а в режиме приема – 2,5 дБ. Причина в том, что только частично волноводный тракт является общим для прохождения мощности от передатчика к антенне и отраженного сигнала от антенны к приемнику. Имеются элементы волноводного тракта, по которым поступает мощность только от передатчика к антенне, и не проходят отраженные сигналы

от антенны к приемнику. Аналогично, имеются такие участки антенно-волноводного тракта, по которым проходят только отраженные сигналы и не проходит мощность, идущая от передатчика к антенне.

При отключенной системе коррекции сигнала на расстояние на вход приемного устройства РЛС поступает мощность P_c , практически не отличающаяся от мощности $P_{в.пр}$, определяемой выражением (32). Приемное устройство метеорологических радиолокаторов настраивается таким образом, что его амплитудная характеристика близка к линейной для слабых сигналов и к логарифмической для сильных. Поэтому ее удобно аппроксимировать функциональной зависимостью вида:

$$\sqrt{U_{np.l}} = U_0 \ln \frac{P_c + P_l}{P_l}, \quad (33)$$

- где $U_{np.l}$ — выходное напряжение приемника при выключенной системе коррекции сигнала на расстояние и отсутствии затухания радиоволн при их распространении в облаке;
 U_0, P_l — параметры, характеризующие амплитудную характеристику приемного устройства РЛС, которые приведены в условиях задания (см. приложение стр. 49);
 P_c — мощность отраженного сигнала на входе приемного устройства.

Для слабых сигналов, если выполняется условие $P_c \ll P_l$, зависимость выходного напряжения приемника (33) от мощности входного сигнала P_c асимптотически приближается к линейной, а при больших уровнях мощности, если $P_c \gg P_l$, зависимость выходного напряжения от мощности асимптотически приближается к логарифмической.

Амплитудная характеристика, описываемая соотношением (33), является идеализированной, не учитывающей шумовую компоненту напряжения на выходе приемного тракта. Если мощность входного сигнала приемника P_c стремится к нулю, выходное напряжение идеализированного, нешумящего приемника также стремится к нулю. В реальном приемнике, даже при отсутствии входного сигнала (т.е. когда $P_c = 0$ Вт), на выходе наблюдается хаотически меняющееся напряжение (компонента 3 на рис. 2 а). Шумовое напряжение не позволяет наблюдать очень слабые отраженные сигналы. Шумовое напряжение, являющееся случайной величиной, хаотически меняющейся во времени, оценивается обычно либо эффективным значением, либо, если его полярность не меняется, как это, например, имеет место в метеорологических радиолокаторах МРЛ, то средним значением. Слабые входные сигналы различимы, если суммарное напряжение отраженного сигнала и

шума заметно превосходит уровень шумового напряжения, наблюдаемого при отсутствии полезного отраженного сигнала.

Для оценки способности принимать слабые сигналы вводятся понятия «пороговой» и «реальной» чувствительности приемника. Под пороговой чувствительностью понимают мощность такого сигнала, при подаче которого на вход приемника эффективное значение выходного напряжения, содержащего сумму полезного сигнала и шума, вдвое превышает эффективное значение собственного шумового напряжения приемника. Под реальной чувствительностью понимают такую мощность входного сигнала, при которой эффективное значение суммарного напряжения на выходе приемника (полезного сигнала + шума) превышает эффективное значение шумового напряжения приемника в заданное число раз, обеспечивающее нормальное функционирование аппаратуры. Например, в радиолокации, если нужно обеспечить только обнаружение входного сигнала и определение координат цели на экранах индикаторов ИКО или ИДВ, то достаточно иметь трехкратное превышение. Но, если необходимо решать более сложные задачи, например, автоматического сопровождения цели по угловым координатам, измерения параметров отраженных сигналов, определения скорости перемещения цели вдоль линии наклонной дальности и т.д., то превышение должно быть более значительным – в некоторых случаях десятикратным и более.

Обычно в радиолокации чувствительность приемного устройства РЛС приводится в дБ/(1 Вт), т.е. величиной, соответствующей десяти логарифмам отношения реальной чувствительности приемника $P_{ш}$ к одному ватту. Следовательно, если в задании реальная чувствительность $P_{ш}$ приведена в значениях дБ/(1 Вт), то в ваттах она определяется величиной

$$\sqrt{P_{ш} (Вт)} = 10^{0,1 P_{ш} (дБ/1 Вт)} \quad (34)$$

Обычно в литературе, посвященной вопросам радиолокационной техники, не оговаривается уровень мощности в 1 Вт, относительно которого определяется количество дБ, т.е. данные о реальной (или пороговой) чувствительности, (иногда также данные о значении входной мощности сигнала) могут быть приведены просто в дБ.

Полученные соотношения позволяют определить постоянную радиолокационной станции

$$\sqrt{C_{\lambda}} = \frac{P_c R^2}{\eta P_{ш}} \quad (35)$$

Если P_c и $P_{ш}$ выражены в Вт, R – в м и η в м^{-1} , то размерность C_λ будет м^3 . Если выразить R в см и η в см^{-1} , то C_λ будет измеряться в см^3 и численно будет иметь в 10^6 раз большее значение. Для удобства последующих расчетов будем выражать в C_λ в м^3 .

Когда включена система коррекции сигнала на расстояние, мощность, поступающая на вход приемного устройства РЛС, будет, как правило, меньше. В метеорологических радиолокаторах при включенной системе коррекции сигнал, отраженный от объекта, расстояние до которого меньше 100 км, подвергается дополнительному ослаблению. Значение вносимого ослабления зависит от расстояния R до цели и меняется в соответствии с соотношением:

$$\sqrt{\xi_{кор}(R)} = \begin{cases} 0, & \text{при } R > 100 \text{ км;} \\ \frac{6}{\ln 2} \ln \frac{100}{R}, & \text{при } R \leq 100 \text{ км.} \end{cases} \quad (36)$$

Здесь R выражается в км. При расстоянии равном или превышающем 100 км, сигнал, отраженный от облака, как правило, слаб. Поэтому для этих расстояний система коррекции сигналов дополнительного ослабления не вносит. Если расстояние до отражающего объема облака меньше 100 км, что соблюдается в вариантах индивидуальных заданий, то отраженный сигнал ослабляется системой коррекции на величину $\xi_{кор}(R)$ и на вход приемника поступает мощность

$$\sqrt{P_{с.кор}} = 10^{-0,1\xi_{кор}(R)} P_{в.пр}. \quad (37)$$

Таким образом, с учетом коррекции сигнала на расстояние, на выходе приемного устройства напряжение определяется соотношением

$$\sqrt{U_{пр.2}} = U_0 \ln \frac{P_{с.кор} + P_I}{P_I}. \quad (38)$$

В заключение первой части расчетной работы необходимо вычисленное в соответствии с зависимостью (25) значение радиолокационной отражаемости точки M представить в других размерностях, используемых в современной метеорологической радиолокации.

Наиболее часто используется величина Z . Она определяется в предположении, что все отражающие частицы, имеют сферическую форму и очень малые размеры, много меньшие длины волны, благодаря чему отражение

радиоволн от них подчиняется закону рассеяния Релея. Как известно [1 - 4], если радиоволны отражаются от диэлектрической частицы сферической формы, радиус которой равен r , то при малых размерах этой частицы, когда $r \ll \lambda$, где λ - длина волны зондирующего импульса, ее эффективная отражающая поверхность определяется соотношением

$$\sigma_r = \frac{64\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 r^6, \quad (39)$$

В (39) m - комплексный показатель преломления диэлектрического вещества отражающей сферической частицы. Для атмосферных образований

величина $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 = 0,93$ для водяных частиц (в диапазоне длин волн зонди-

рующих импульсов $2 \text{ см} < \lambda < 10 \text{ см}$) и $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 = 0,19$ для сухих ледяных частиц (практически независимо от длины волны λ).

Если известен диаметр частицы d , то эффективная отражающая поверхность сферической частицы будет определяться зависимостью

$$\sigma_d = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 d^6. \quad (40)$$

Если в единице объема содержится n частиц различного радиуса r_i , где индекс $i = 1, 2, \dots, n$, то среднее значение его эффективной отражающей поверхности, которое по определению соответствует радиолокационной отражаемости η , будет равно сумме эффективных отражающих поверхностей всех частиц находящихся в этом объеме

$$\eta = \frac{64\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 \sum_{i=1}^n r_i^6. \quad (41)$$

При известном распределении диаметров d_i частиц в единице объема радиолокационная отражаемость определяется зависимостью

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 \sum_{i=1}^n d_i^6 \quad (42)$$

Под радиолокационной отражаемостью Z_r понимают величину $Z_r = \sum_{i=1}^n r_i^6$. Аналогично, под радиолокационной отражаемостью Z_d пони-

мают величину $Z_d = \sum_{i=1}^n d_i^6$. Если n — количество частиц облаков в 1 м^3 , а r_i выражается в (мм), то Z_r и Z_d будут измеряться в $(\text{мм}^6/\text{м}^3)$. При известной радиолокационной отражаемости η , величины Z_r и Z_d определяются из соотношений

$$Z_r = \eta \frac{\lambda^4}{64\pi^5} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^{-2}; \quad (43)$$

$$Z_d = \eta \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^{-2} \quad (44)$$

Предполагая, что все отражающие частицы в облаке водяные, т.е. что

$$\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = 0,93, \text{ получаем}$$

$$\sqrt{Z_d} = 3,52 \cdot 10^{-3} \lambda^4 \eta. \quad (45)$$

При длине волны, измеряемой в (см) и отражаемости в (см^{-1}) , размерность Z_d будет (см^3) . Для перевода в традиционно использующуюся размерность $(\text{мм}^6/\text{м}^3)$ необходимо полученную величину умножить на 10^{12} , т.е. использовать выражение

$$Z_{d(\text{мм}^6/\text{м}^3)} = 3,52 \cdot 10^9 \lambda_{(\text{см})}^2 \eta_{(\text{см}^{-1})}. \quad (46)$$

Величина Z_r будет в 64 раза меньше Z_d .

При известной длине волны λ функциональная связь величин Z_d и η_λ может быть еще более упрощена. Для наиболее часто применяющихся в метеорологических РЛС длинах волн 3,2 см и 10 см эти связи имеют вид:

$$\begin{cases} Z_d \approx 3,7 \cdot 10^{11} \eta_{3,2}; \\ Z_d \approx 3,6 \cdot 10^{13} \eta_{10}. \end{cases} \quad (47)$$

В соотношениях (47) результат получается в ($\text{мм}^6/\text{м}^3$), если η_λ будет в (см^{-1}).

В радиолокационной метеорологии, обычно, если нет особых оговорок, то для оценки отражающих свойств облаков используется величина Z_d , причем зачастую без индекса, т.е. просто Z (или z).

Поскольку при наблюдениях диапазон возможных значений Z_d очень велик (от значений, близких к нулю до $10^5 \text{ мм}^6/\text{м}^3$), то на практике гораздо чаще пользуются прологарифмированной величиной. Хотя логарифмировать можно только безразмерные величины и под знаком логарифма должно быть отношение Z_d / Z_0 , где Z_0 — величина, равная $1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, реально в литературе, посвященной вопросам радиометеорологии, выполняют логарифмирование величины Z_d , выраженной в традиционно используемых единицах измерения ($\text{мм}^6/\text{м}^3$) и записывают $\lg Z$ (или $\lg z$).

Необходимо отметить, что в последнем руководящем документе [5] приведено несколько иное определение радиолокационной отражаемости. В нем под радиолокационной отражаемостью понимается величина

$$\sum_{i=1}^n r_i^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2} \right|^2, \text{ где } n - \text{концентрация частиц (количество частиц в единице}$$

объема, как правило, в одном кубическом метре). Величина же $Z_r = \sum_{i=1}^n r_i^6$ в

этом документе называется эквивалентной радиолокационной отражаемостью. Это приводит к различиям в оценках. Для водяных частиц оно незначительно и при логарифмировании различие оценок равно $0,032 \text{ dBz}$. Для ледяных частиц оно значительно больше — приблизительно $0,71 \text{ dBz}$.

И, наконец, в радиометеорологии часто для оценки отражающих свойств облаков используется величина $n_{(\text{dBz})}$, измеряемая в (dBz) (децибелы z). Именно такая величина употребляется для представления отражающих свойств облаков в различных системах автоматической обработки радиолокационной информации, сопрягаемых с метеорологическими радиолокаторами (например, АКСОПРИ, МЕТЕОЯЧЕЙКА). Величина $n_{(\text{dBz})}$ определяется как

$$n_{(dBz)} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{np}}{P_{ш}} \right), \quad (48)$$

где P_{np} — мощность отраженного сигнала на входе приемника РЛС, а $P_{ш}$ — реальная чувствительность приемного устройства РЛС, заданная в исходных данных (см. стр. 48). В соотношении (48) мощности должны быть представлены в ваттах.

Вычислением величины $n_{(dBz)}$, выраженной в dBz, для точки M облака завершаются расчеты по первому разделу работы.

3. РАСЧЕТ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ОБЛАКЕ (второй раздел расчетной работы)

Выполненный выше расчет не учитывал ослабления радиоволн при их распространении в облаке. Из-за ослабления радиоволн, распространяющихся внутри облака, плотность потока мощности Π_{II} в точке M будет меньше, вычисленной по формуле (21). Следовательно, меньшим будет отраженный сигнал.

Здесь целесообразно внести некоторое пояснение в понятие "ослабление радиоволн".

При удалении зондирующего импульса от РЛС плотность потока мощности и, следовательно, напряженности электрического и магнитного полей всегда уменьшаются. Это происходит, даже если радиоволны распространяются в свободном пространстве, где нет вещества, способного их поглощать и рассеивать. Но, если на трассе распространения радиоволн имеется облако, то часть мощности зондирующего импульса будет поглощаться частицами облаков, а часть рассеиваться ими во все стороны, в том числе и в обратном направлении. В этом случае появляется дополнительное ослабление радиоволн, которое должно учитываться при расчетах.

Вычислительный процесс, связанный с определением ослабления радиоволн на трассе от радиолокатора до точки пространства, находящейся на расстоянии R_i , достаточно трудоемок. Для некоторых конфигураций облаков, в том числе для облака в виде эллипсоида, как это задано условиями задания, можно получить аналитическое решение. Однако, как правило, аналитические зависимости чрезвычайно сложны и значительно проще получить результат, используя численные методы анализа и средства вычислительной техники. Для того чтобы в децибелах определить ослабление радио-

волн $\xi_{np}(R_i)$, проходящих от радиолокационной станции до точки, удаленной на расстояние R_i , необходимо вычислить интеграл

$$\xi_{np}(R_i) = \int_0^{R_i} K_{осл}(R, \theta, \varphi) dR, \quad (49)$$

где $K_{осл}(R, \theta, \varphi)$ – коэффициент ослабления радиоволн (в дБ/км).

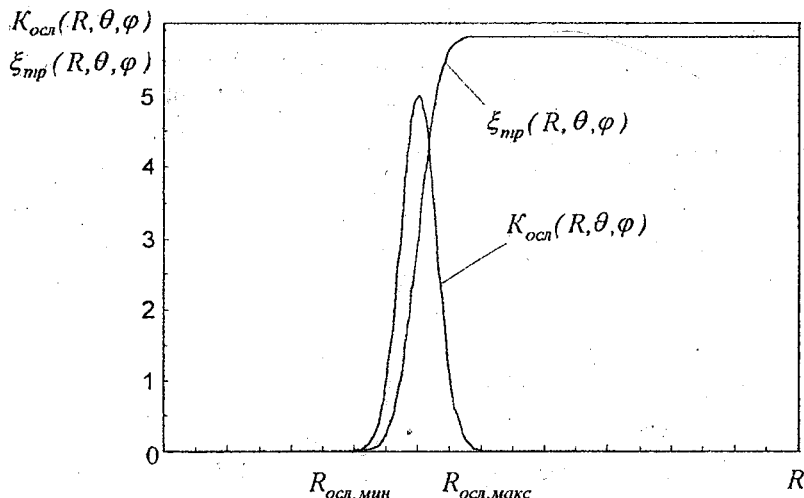


Рис. 6. К пояснению принципа вычисления ослабления радиоволн $\xi_{np}(R, \theta, \varphi)$ в зависимости от длины трассы.

Ослабление радиоволн, обусловленное их поглощением и рассеянием в среде, наблюдается (по условиям задания) только при распространении радиоволн в облаке. На трассе от радиолокатора до облака ослаблением будем пренебрегать. Поэтому интегрирование выражения (49) допустимо выполнять в пределах от некоторого расстояния $R_{осл.мин}$ до расстояния R_i . Это поясняется рис. 6, на котором представлены зависимости коэффициента ослабления радиоволн $K_{осл}(R, \theta, \varphi)$ и ослабления радиоволн $\xi_{np}(R, \theta, \varphi)$ от расстояния R . При расчетах предполагается, что зондирование производится в направлении точки M облака. Из рисунка видно, что область пространства, в которой наблюдается ослабление радиоволн, ограни-

чена интервалом расстояний от $R_{осл.мин}$ до $R_{осл.макс}$. За пределами этого интервала коэффициент ослабления радиоволн $K_{осл}(R, \theta, \varphi)$ практически равен нулю, и поэтому ослаблением радиоволн можно пренебречь. Таким образом, ослабление радиоволн $\xi_{тр}(R, \theta, \varphi)$ на трассе их распространения до расстояния $R_{осл.мин}$ практически равно нулю, а затем с увеличением расстояния оно начинает монотонно нарастать. Однако когда расстояние начинает превышать $R_{осл.макс}$ и коэффициент ослабления радиоволн $K_{осл}(R, \theta, \varphi)$ снова становится равным нулю, нарастание ослабления радиоволн $\xi_{тр}(R, \theta, \varphi)$ прекращается. Поэтому интегрирование следует начинать с нижнего предела, равного $R_{осл.мин}$. Минимальное $R_{осл.мин}$ и максимальное $R_{осл.макс}$ расстояния для облака, имеющего структуру, определенную заданием, можно найти, используя соотношения

$$R_{осл.мин}^* = R_0 - 5r_i, \quad (50)$$

$$R_{осл.макс}^* = R_0 + 5r_i, \quad (51)$$

где r_i — максимальное из трех чисел x_i , y_i и z_i .

Для нахождения $R_{осл.мин}$ величина $R_{осл.мин}^*$ уменьшается до ближайшего целого числа километров. Для нахождения $R_{осл.макс}$ величина $R_{осл.макс}^*$ увеличивается до ближайшего целого числа километров.

Для вычисления затухания радиоволн на трассе длиной $R_i > R_{осл.мин}$, необходимо численными методами найти интеграл

$$\xi_{тр}(R_i) = \int_{R_{осл.мин}}^{R_i} K_{осл}(R, \theta, \varphi) dR. \quad (52)$$

Для нахождения $\xi_{тр}(R_i)$ из (52) численными методами можно воспользоваться простейшей формулой прямоугольников. Для этого интервал расстояний от $R_{осл.мин}$ до R_i делится на равные части длиной Δr каждая. Рекомендуется установить интервал Δr равным 1 км.

Для всех расстояний $R_m = R_{осл.мин} + m \cdot \Delta r$, где $m = 1, 2, \dots, i$, вычисляются коэффициенты ослабления радиоволн $K_{осл.m} = K_{осл}(R_m, \theta, \varphi)$. То-

гда суммарное ослабление радиоволн на трассе длиной R_m определится соотношением

$$\xi_{mp}(R_m) = (K_{осл.1} + K_{осл.2} + \dots + K_{осл.i}) \cdot \Delta r. \quad (53)$$

Если известно ослабление $\xi_{mp}(R_i - \Delta r)$ на трассе протяженностью $R_i - \Delta r$, то для определения ослабления на более длинной трассе протяженностью R_i , необходимо вычислить

$$\xi_{mp}(R_i) = \xi_{mp}(R_i - \Delta r) + K_{осл.i} \cdot \Delta r, \quad (54)$$

где $K_{осл.i}$ — коэффициент ослабления радиоволн в точке облака, которая находится на луче, проходящем от радиолокатора в направлении точки M , и имеет координаты R_i, θ, φ .

Для определения коэффициента ослабления радиоволн $K_{осл.i}$ в этой точке необходимо вычислить ее координаты x_i, y_i и z_i , используя соотношения (7) — (9), после чего рассчитать

$$K_{осл.i} = K_0 \exp \left[- \left(\frac{x_i}{x_l} \right)^2 - \left(\frac{y_i}{y_l} \right)^2 - \left(\frac{z_i}{z_l} \right)^2 \right], \quad (55)$$

где K_0 — максимальный коэффициент ослабления радиоволн, наблюдаемый в центре облака (при координатах x_i, y_i и z_i равных нулю);

x_i, y_i, z_i — прямоугольные координаты точки, находящейся на расстоянии R_i в направлении точки M (азимут θ , и угол места φ) в системе координат, связанной с центром облака (см. рис. 3 стр. 13);

x_l, y_l, z_l — параметры, характеризующие пространственные изменения коэффициента ослабления радиоволн.

Приведенные выше соотношения позволяют рассчитать ослабление радиоволн $\xi_{mp}(R_i)$ на трассе длиной R_i .

Результаты расчетов должны быть представлены в виде таблиц и графиков зависимостей коэффициента ослабления радиоволн $K_{осл}(R_i)$ и ослабления радиоволн $\xi_{mp}(R_i)$ от расстояния R_i .

4. ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЫХОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА РЛС ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН (третий раздел задания)

Вычисляются зависимости выходных напряжений приемника РЛС от расстояний R_i при зондировании вдоль луча, проходящего от антенны РЛС через точку M облака. Полученные зависимости сопоставляются с распределением радиолокационной отражаемости $\eta(R_i)$ вдоль того же луча. Напряжения рассчитываются для четырех вариантов.

Напряжения $U_{np.1}(R_i)$ и $U_{np.2}(R_i)$ вычисляются для случаев включенной и выключенной системы коррекции сигнала на расстояние в предположении, что отсутствует ослабление радиоволн при их прохождении через облако. Напряжения $U_{np.3}(R_i)$ и $U_{np.4}(R_i)$ вычисляются для случаев включенной и выключенной системы коррекции на расстояние с учетом ослабления радиоволн при их прохождении через облако.

В завершении для всех четырех вариантов необходимо рассчитать расстояния до отражающих объемов пространства, формирующих на выходе приемника РЛС максимальное значение выходного напряжения. Результаты расчетов нужно сопоставить с расстоянием, на котором реально (по условиям задания) находится максимум радиолокационной отражаемости в этом направлении зондирования.

Для первых двух вариантов алгоритм вычисления совпадает с тем, который использовался при выполнении первого раздела расчетной работы (см. раздел 2 стр. 13 – 27). Различие лишь в том, что, в данном (третьем) разделе в расчетные соотношения должны подставляться не координаты точки M (как при выполнении первого раздела задания), а координаты точек, расположенных на разных расстояниях от РЛС на луче, проходящем от антенны РЛС через точку M .

Расчеты выполняются для интервала расстояний, в пределах которого находится облако. Для облака, имеющего форму, приведенную в задании, можно определить минимальное расстояние R_{min} , используя соотношение

$$R_{min}^* = R_0 - 5r_i^*, \quad (56)$$

где r_i^* – максимальный из параметров x_0 , y_0 или z_0 , характеризующих распределение радиолокационной отражаемости в пространстве. Минимальное расстояние R_{min} определяется уменьшением R_{min}^* до ближайшего целого числа километров.

Аналогично, для вычисления максимального расстояния R_{max} , следует, с учетом структурных особенностей облака, найти величину

$$R_{max}^* = R_0 + 5r_i^* \quad (57)$$

Максимальное расстояние R_{max} определяется увеличением R_{max}^* до ближайшего большего целого числа километров.

Расчет напряжений выполняется для точек со сферическими координатами R_i , θ и φ , где R_i меняется с шагом Δr от минимального R_{min} до максимального R_{max} . Шаг Δr устанавливается равным 1 км. Расчеты для первых двух вариантов выполняются по той же методике, которая применялась при расчете первого раздела задания, и в результате расчетов вычисляются выходные напряжения $U_{np.1}(R_i)$ и $U_{np.2}(R_i)$ приемника для случая выключенной и включенной системы коррекции сигнала на расстояние.

Учет ослабления радиоволн при вычислениях напряжений $U_{np.3}(R_i)$ и $U_{np.4}(R_i)$ осуществляется путем уменьшения мощности на входе приемного устройства на величину ослабления радиоволн при их прохождении в облаке. Если расстояние до точки R_i будет меньше, чем $R_{осл.мин}$, то следует считать ослабление радиоволн равным нулю. В этом случае выходные напряжения приемника $U_{np.3}(R_i)$ и $U_{np.4}(R_i)$ будут равными соответственно $U_{np.1}(R_i)$ и $U_{np.2}(R_i)$. Если расстояние R_i превышает $R_{осл.мин}$, то ослабление радиоволн должно учитываться при расчетах. Данные об ослаблении радиоволн берутся из таблиц, полученных по результатам расчетов, которые были выполнены в предыдущем разделе задания (см. стр. 27 – 31).

Пусть мощность, поступающая на вход приемного устройства с расстояния R_i при расчете без учета ослабления радиоволн и при выключенной системе коррекции сигнала на расстояние, равняется $P_c(R_i)$. Предположим, что вычисленное на втором этапе расчетов ослабление радиоволн для этого же расстояния равно $\xi_{mp}(R_i)$. Тогда мощность, поступающая на вход приемника РЛС при учете ослабления в облаке, будет равной

$$P_c^{осл}(R_i) = 10^{-0,2\xi_{mp}(R_i)} P_c(R_i) \quad (58)$$

В выражении (58) коэффициент 0,2 в показателе степени учитывает, что радиоволны проходят в облаке двойной путь – от РЛС до точки, находящейся в облаке на расстоянии R_i , и обратно от этой точки к радиолокации

онной станции. Тогда напряжение $U_{np.3}(R_i)$ на выходе приемного тракта определится из соотношения (59), подобном выражению (33), в котором вместо величины $P_c(R_i)$ будет мощность $P_c^{осл}(R_i)$.

$$U_{np.3}(R_i) = U_0 \ln \frac{P_c^{осл}(R_i) + P_I}{P_I} \quad (59)$$

Аналогично, если вычислена мощность сигнала, на входе приемного устройства при включенной системе коррекции сигнала на расстояние в предположении, что в облаке радиоволны не ослабляются, и она для расстояния R_i равна $P_{с.кор}(R_i)$, то, учитывая ослабление в облаке, получаем

$$P_{с.кор}^{осл} = 10^{-0,2\xi_{mp}(R_i)} P_{с.кор}(R_i) \quad (60)$$

Тогда напряжение $U_{np.4}(R_i)$ на выходе приемного тракта определится из соотношения (61), аналогичном выражению (38), в котором вместо величины $P_{с.кор}(R_i)$ будет подставляться мощность $P_{с.кор}^{осл}(R_i)$.

$$U_{np.4}(R_i) = U_0 \ln \frac{P_{с.кор}^{осл}(R_i) + P_I}{P_I} \quad (61)$$

Результаты расчетов по третьему разделу задания должны быть представлены в виде таблицы и графика, на котором отображаются зависимости радиолокационной отражаемости $\eta(R_i)$ и выходных напряжений приемника $U_{np.1}(R_i)$, $U_{np.2}(R_i)$, $U_{np.3}(R_i)$ и $U_{np.4}(R_i)$ от расстояния R_i .

В заключении с использованием параболической интерполяции определяются расстояния, на которых достигается максимальное значение радиолокационной отражаемости и максимальные значения выходных напряжений приемника для каждого из четырех вариантов расчета.

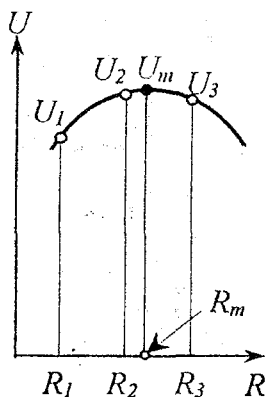


Рис. 7. К пояснению метода параболической аппроксимации.

расстояний представлено на рис. 7. Предположим, что зависимость напряжения U от расстояния R описывается полиномом второй степени

$$U = aR^2 + bR + c, \quad (62)$$

то есть при подстановке в (62) $R = R_1$ напряжение получается равным U_1 , если $R = R_2$, то напряжение равно U_2 и если $R = R_3$, то напряжение равно U_3 . Следовательно, коэффициенты a , b и c находятся при решении системы из трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} aR_1^2 + bR_1 + c = U_1 \end{cases} \quad (63)$$

$$\begin{cases} aR_2^2 + bR_2 + c = U_2 \end{cases} \quad (64)$$

$$\begin{cases} aR_3^2 + bR_3 + c = U_3 \end{cases} \quad (65)$$

После того как полученная система уравнений будет решена и найдены значения коэффициентов a , b и c , вычисление расстояния R_m , на котором напряжение становится максимальным, равным U_m , осуществляется обычным путем:

$$R_m = -\frac{b}{2a}. \quad (66)$$

Рассмотрим как рассчитывается расстояние, на котором достигается максимальное значение напряжения на выходе приемника. Из таблицы, в которой приведены результаты расчетов, определяется расстояние R_i , для которого напряжение $U_{пр,k}(R_i)$, где $k = 1, 2, 3$ или 4 имеет максимальную величину. Обозначим это расстояние R_2 , а напряжение U_2 . Ближайшее меньшее расстояние и соответствующее ему напряжение обозначим R_1 и U_1 , а ближайшее большее расстояние и соответствующее ему напряжение — R_3 и U_3 .

Распределение напряжений для разных

Вычисления расстояний R_m выполняются для всех пяти величин, рассматриваемых в третьем разделе задания, то есть для напряжений $U_{np.1}(R_i)$, $U_{np.2}(R_i)$, $U_{np.3}(R_i)$, $U_{np.4}(R_i)$ и радиолокационной отражаемости $\eta(R_i)$.

В результате расчетов по третьему разделу задания определяется пространственные смещения между реальным расстоянием до точки максимальной отражаемости и расстояниями, на которых становится максимальным выходное напряжение приемника при разных условиях зондирования.

5. ИЗОБРАЖЕНИЕ ОБЛАКА НА ИНДИКАТОРЕ КРУГОВОГО ОБЗОРА И ТИПА ДАЛЬНОСТЬ-ВЫСОТА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ РЛС (Четвертый раздел задания)

При вычислениях, осуществляемых по четвертому разделу задания, на быстродействующей ЭВМ многократно повторяются расчеты, подобные выполненным по третьему разделу. При этом моделируются разные режимы работы РЛС и разные условия распространения радиоволн в облаке. Для построения изображения пространство, занятое облаком, делится на 40 градаций по азимуту (при построении изображения на ИКО), либо по углу места (при построении изображения на ИДВ) и на столько же градаций по расстоянию. В результате образуется 1681 точка пространства ($41^2 = 1681$), для каждой из которых быстродействующая ЭВМ вычисляет выходное напряжение приемника. Затем осуществляется построение изолиний напряжений, соответствующих одинаковым уровням мощности входных сигналов приемника РЛС. В результате на экране монитора ЭВМ формируется изображение облака, подобное наблюдаемому на экранах ИКО и ИДВ метеорологической радиолокационной станции, работающей с включенным БОМО метеорологической информации. Конечно, подобие изображений возможно при условии совпадения технических характеристик метеорологической РЛС и параметров облака с приведенными в исходных данных для расчета.

Рассмотрим принципы формирования изображений облака на мониторе ЭВМ.

В программе построения изображения облака, которое осуществляется в несколько этапов, используются несколько разработанных процедур. Из предыдущих расчетов используются вычисленные значения R_{min} и R_{max} (см. стр. 32), а также $R_{осл.мин}$ и $R_{осл.макс}$ (см. стр. 29 - 30). Кроме того вычисляются также минимальное и максимальное значение угловых координат (азимутальных, при формировании изображения на ИКО, или угломестных, при формировании изображения на ИДВ).

Для облака с параметрами, приведенными в задании (то есть имеющего форму эллипсоида, с отражаемостью, меняющейся в пространстве по гауссовскому закону), граничные значения азимутальных углов, могут быть определены соотношениями:

$$\theta_{min} = \theta_0 - \arctg \left(\frac{4,6 \cdot r_0}{R_0} \right); \quad (67)$$

$$\theta_{max} = \theta_0 + \arctg \left(\frac{4,6 \cdot r_0}{R_0} \right). \quad (68)$$

В пределах $\theta_{min} < \theta \leq \theta_{max}$ радиолокационная отражаемость сохраняет высокие значения.

Аналогично граничные значения углов места определяются соотношениями:

$$\varphi_{min} = \begin{cases} 0, & \text{при } \varphi_0 < \arctg \left(\frac{4,6 \cdot r_0}{R_0} \right); \\ \varphi_0 - \arctg \left(\frac{4,6 \cdot r_0}{R_0} \right), & \text{при } \varphi_0 \geq \arctg \left(\frac{4,6 \cdot r_0}{R_0} \right). \end{cases} \quad (69)$$

$$\varphi_{max} = \varphi_0 + \arctg \left(\frac{4,6 \cdot r_0}{R_0} \right). \quad (70)$$

В интервале углов места $\varphi_{min} < \varphi \leq \varphi_{max}$ также сохраняется высокий уровень радиолокационной отражаемости. За пределами этих углов радиолокационная отражаемость пренебрежимо мала.

Последующие расчеты выполнены для четырех различных ситуаций – учитывающей и не учитывающей ослабление радиоволн при их распространении в облаках, а также при включенной и выключенной системе коррекции сигнала на расстояние.

Для построения изображения облака, наблюдаемого на ИКО сектор, ограниченный азимутальными углами от θ_{min} до θ_{max} , делится на 40 градаций. При построении изображения на ИДВ на 40 градаций делится интервал углов от φ_{min} до φ_{max} . Каждый луч делится на 40 градаций расстояний для интервала дальностей от R_{min} до R_{max} . В узлах полученной сетки для каждой узловой точки рассчитывается выходное напряжение приемного устройства.

Затем вычисляются выходные напряжения приемного устройства РЛС, соответствующие заранее задаваемым уровням мощности входного сигнала. Уровни мощности устанавливаются такими, чтобы по ним можно

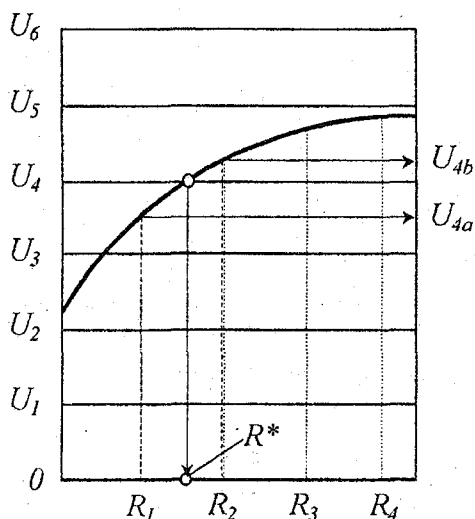


Рис.8. К пояснению принципа определения расстояния R^* .

было судить о радиолокационной отражаемости облачности в пространстве обзора РЛС. Обычно, если реальная чувствительность приемного тракта РЛС равна $P_{ин}$, то устанавливаются такие градации напряжения, чтобы им соответствовали мощности входных сигналов приемника, отличающиеся от $P_{ин}$ на целое число $10 \cdot k$ децибел, где $k = 1, 2, \dots, 6$ (или, что тоже самое, отличались бы от $P_{ин}$ в 10^k раз). Эти напряжения, обозначенные $U_1, U_2, \dots, U_6$, соответствуют отражаемостям $n_{(dBz)}$ (48), которые равны 10, 20, ..., 60 dBz. Уровни напряжений $U_1, U_2, \dots, U_6$, с которыми срав-

нивается выходное напряжение приемника РЛС, отображены на правой шкале рис. 2 а (см. стр. 9). Назовем их напряжениями сравнения. Как видно из приведенного на рис. 2 а графика, каждая реализация выходного напряжения приемника РЛС может пересекаться с каким-либо из напряжений сравнения $U_1, U_2, \dots, U_6$ четное число раз, либо не пересекаться вовсе. Так, например, напряжение U_6 превышает только импульсом, возникающим на выходе приемника в момент генерации мощности передатчиком РЛС (фрагмент напряжения 1) и при появлении сигналов, отраженных от местных предметов (фрагмент напряжения 2). Полезные отраженные сигналы, отображенные на рис. 2 фрагментом 4, не пересекаются с напряжением U_6 . Однако, они дважды пересекаются с напряжениями U_1, U_3, U_4 и U_5 , а также четыре раза с напряжением U_2 .

Для построения изолиний, соответствующих напряжениям сравнения $U_1, U_2, \dots, U_6$, необходимо определять расстояния, на которых выходное напряжение приемника становится равным одному из этих напряжений. Как правило, ни в одной из 41 точке, расположенных на конкретном азимуталь-

ном (или угломестном) направлении, вычисленные выходные напряжения приемного устройства РЛС не совпадают со значениями напряжений сравнения $U_1, U_2, \dots, U_6$. Для поиска координат точек, в которых выходные напряжения приемника совпадают с одним из шести напряжений сравнения, выполняются расчеты, использующие метод линейной интерполяции. Это поясняется рис. 8, на котором показана зависимость выходного напряжения приемника от расстояния вдоль одного из выбранных направлений зондирования. Как видно из приведенного рисунка, для расстояния, обозначенного R_1 выходное напряжение приемника РЛС равно U_{4a} . Это напряжение меньше напряжения сравнения БОМО метеорологической информации, ближайшее большее из которых равно U_4 . Для следующего расстояния R_2 выходное напряжение равно U_{4b} , которое превышает напряжение сравнения U_4 . Предположено, что в малом пространственном интервале $R_1 < R < R_2$ происходит линейное изменение выходного напряжения. Тогда расстояние R^* , для которого выходное напряжение приемника РЛС становится равным напряжению сравнения U_4 , определяется соотношением:

$$R^* = R_1 + \frac{U_4 - U_{4a}}{U_{4b} - U_{4a}} (R_2 - R_1). \quad (71)$$

Таким образом, определяются координаты всех точек пространства, в которых формируются отраженные сигналы, создающие на выходе приемника РЛС напряжения, соответствующие одному из напряжений сравнения $U_1, U_2, \dots, U_6$. Точки на расположенных рядом лучах с одинаковыми уровнями выходного напряжения приемника РЛС, равными $U_1, U_2, \dots, U_6$ соединяются, и таким образом формируются изолинии напряжений. Если на одном из лучей имеются две точки, в которых напряжение равно одному из уровней напряжения сравнения БОМО, а на соседнем луче таких точек нет, то эти две точки одного луча соединяются. В результате поле изолиний получается замкнутым.

В рассчитанном и построенном на экране ЭВМ изображении отдельные прямолинейные участки могут быть сведены к пренебрежимо малым отрезкам, если увеличить количество лучей и число градаций расстояния. Однако в этом случае неоправданно значительны затраты времени для расчетов и построения изображения облака. Поэтому, исходя из представлений о разумной достаточности, в области расчетов было выбрано 40 градаций азимутальных углов (или углов места) и 40 градаций расстояний.

Для формирования изображений облака на мониторе ЭВМ необходимо знать выходные напряжения приемника, возникающие при зондировании разных точек пространства при различных режимах работы РЛС (с коррекцией и без коррекции сигналов на расстояние) и при различных условиях распространения радиоволн (с учетом и без учета ослабления радиоволн в

облаках). Поэтому в программу расчета введен трехмерный массив выходного напряжения приемника $U_{m,j,i}$. В массиве индекс m меняется в интервале от 1 до 4, а индексы j и i – в интервале от 0 до 40.

Различным значениям индекса m соответствуют разные варианты расчета, представленные в таблице.

Таблица

Варианты расчета, соответствующие различным значениям индекса m

Значения индекса m	Состояние системы коррекции на расстояние	Учет ослабления радиоволн за счет поглощения и рассеяния в среде
1	Выключена	Не учитывается
2	Включена	Не учитывается
3	Выключена	Учитывается
4	Включена	Учитывается

Изменяющемуся индексу j соответствуют различные азимутальные (при формировании изображения ИКО) или угломестные (при формировании изображения для ИДВ) направления зондирования пространства, а индексу i – различные расстояния от РЛС. Шаг по угловым координатам определяется делением на 40 интервала от $\theta_{\min}$ до $\theta_{\max}$ (либо от $\varphi_{\min}$ до $\varphi_{\max}$ для построения изображения на ИДВ). Для вычисления шага по расстоянию на 40 делится интервал от $R_{\min}$ до $R_{\max}$. Таким образом, создаются 41 значение угловых координат и 41 значение расстояния, для каждого из которых вычисляются выходные напряжения приемника РЛС. Эти вычисления производятся четырехкратно для разных значений m .

Для вычисления напряжения $U_{m,j,i}$ при m , равном 3 или 4, необходимо знать ослабление радиоволн $\xi_{mp}(R_i)$, на трассе от радиолокатора до точки в облаке, находящейся на расстоянии R_i . Ослабление радиоволн при их прохождении через облако вычисляется с помощью разработанной процедуры **EpsOsmab**. В нее передаются данные о градициях азимутального направления θ_i , при формировании напряжения на ИКО, либо о градициях угломестного направления φ_i при формировании изображения на ИДВ, о максимальном значении коэффициента ослабления радиоволн K_0 , и о параметрах x_r , y_r и z_r , характеризующих пространственные изменения коэффициента ослабления радиоволн. Кроме того, в процедуру **EpsOsmab** передаются данные об интервале расстояний от $R_{\text{осл.мин}}$ до $R_{\text{осл.макс}}$, в пределах которого радиоволны испытывают существенное, требующее учета ослабление (см. стр. 29 – 30).

Для уменьшения погрешностей расчет ослабления радиоволн, требующий вычисления интеграла (52), выполняется с использованием формулы Симпсона, дающей более точные результаты, нежели примененная ранее формула прямоугольников. При вычислении ослабления для 40 значений расстояний R_i в интервале от $R_{осл.мин}$ до $R_{осл.макс}$ с использованием формулы Симпсона, этот интервал делится на 80 равных частей. Поэтому введена индексная переменная $R_{осл.i1}$, где $i1 \in (0, 80)$. Величины $R_{осл.i1}$ образуют арифметическую прогрессию, минимальный член которой равен $R_{осл.мин}$, а максимальный $R_{осл.макс}$. Число членов прогрессии равно 81, а разность прогрессии $\Delta r = (R_{осл.мин} - R_{осл.макс}) / 80$. Для каждого $R_{осл.i1}$ вычисляется коэффициент ослабления $K_{осл.i1}$ с использованием соотношений (7) – (9) и (52).

Затем определяется ослабление радиоволн $\xi_{тр.i2}$ на трассе от антенны РЛС до точки, удаленной на расстояние $R_{осл.i2}$. Индексы $i1$ и $i2$ связаны соотношением $i1 = 2 \cdot i2$, т. е. индекс $i2$ меняется в интервале от 0 до 40. Вычисление ослабления радиоволн для расстояния $R_{осл.i2}$ осуществляется в соответствии с формулой Симпсона:

$$\xi_{осл.i2} = (K_{осл.0} + 4 \cdot K_{осл.1} + 2 \cdot K_{осл.3} + \dots + K_{осл.i1}) \frac{\Delta r}{3}. \quad (72)$$

Если известно ослабление $\xi_{тр.i2}$ для расстояния $R_{осл.i2}$, то для расстояния $R_{осл.i2+1} = R_{осл.i2} + 2 \cdot \Delta r$ ослабление радиоволн вычисляется в соответствии с соотношением:

$$\xi_{осл.(i2+1)} = \xi_{осл.i2} + (K_{осл.i1} + 4 \cdot K_{осл.(i1+1)} + K_{осл.(i1+2)}) \cdot \frac{\Delta r}{3}. \quad (73)$$

Зависимость (73) позволяет организовать на ЭВМ итерационный процесс вычисления ослабления на трассе для расстояний, следующих с интервалом $2 \cdot \Delta r$ и получить 41 значение ослабления радиоволн для точек, эквидистантно расположенных в интервале от $R_{осл.мин}$ до $R_{осл.макс}$.

После вычисления ослабления радиоволн $\xi_{тр.i2}$ для разных расстояний результаты передаются в процедуру *Upriem*, в которой определяются выходные напряжения приемника РЛС для 41 точки, эквидистантно распределенных в интервале $R \in (R_{мин}, R_{макс})$. При этом учитывается, что данные об ослаблении радиоволн также получены для 41 значения расстояний. Но

для несколько иной области пространства, находящейся внутри облака. Данные об ослаблении радиоволн эквидистантно распределены в интервале от $R_{осл.мин}$ до $R_{осл.макс}$. Поскольку в общем случае $R_{мин} \neq R_{осл.мин}$, а $R_{макс} \neq R_{осл.макс}$, то, как правило, значения R_i и $R_{осл.i2}$ при $i = i2$ не совпадают. Это учитывается при расчетах. Предполагается, что в малом интервале расстояний от $R_{осл.i2}$ до $R_{осл.(i2+1)}$ ослабление радиоволн линейно меняется от $\xi_{mp.i2}$ до $\xi_{mp.(i2+1)}$. Тогда для вычисления ослабления радиоволн для трассы длиной R_i сначала находятся два смежных значения расстояний, для которых известны ослабления $\xi_{mp.i2}$ и $\xi_{mp.(i2+1)}$ и выполняются неравенства $R_{осл.i2} < R_i < R_{осл.(i2+1)}$. Затем с использованием метода линейной аппроксимации вычисляется:

$$\xi_{mp}(R_i) = \xi_{mp.i2} + \frac{\xi_{mp.(i2+1)} - \xi_{mp.i2}}{R_{осл.(i2+1)} - R_{осл.i2}} (R_i - R_{осл.i2}). \quad (74)$$

Если расстояние $R_i < R_{осл.0}$, то предполагается, что ослабления сигнала не было и $\xi_{mp}(R_i) = 0$. Это означает, что радиоволны еще не дошли до той зоны облаков, в которой наблюдается их ослабление.

Если расстояние $R_i > R_{осл.40}$, то предполагается, что ослабление радиоволн достигло своего максимального значения и радиоволны вышли за пределы той зоны облака, в которой происходит их ослабление. В этом случае считается, что $\xi_{mp}(R_i) = \xi_{mp.40}$.

После завершения вычислений $U_{m,j,i}$, где $m \in (1,4)$, $j \in (0,40)$ и $i \in (0,40)$, выполняется построение изображений облака в виде изолиний равной мощности отраженного сигнала на входе приемника РЛС. Для этого сначала вычисляются шесть напряжений $U_{нор,k}$, где индекс k меняется от 1 до 6. Величины $U_{нор,k}$ соответствуют выходным напряжениям приемника РЛС, возникающим при поступлении на вход приемника из волноводного тракта мощности СВЧ $P_{нор,k} = 10^k P_{ш}$, где $P_{ш}$ — реальная чувствительность приемника в ваттах. Пороговые уровни напряжения, таким образом, определяются соотношением:

$$U_{нор,k} = U_0 \cdot \ln \frac{P_{нор,k} + P_f}{P_f}, \quad (75)$$

где U_0, P_1 – параметры, характеризующие амплитудную характеристику приемного устройства РЛС.

Полученные $U_{\text{пор},k}$ вместе с данными о напряжениях $U_{m,j,i}$ на выходе приемника передаются в процедуру *Grafik* (формирование изображения ИКО), а затем в процедуру *GrafikV* (формирование изображения ИДВ). Принцип построения изолиний на экране монитора ЭВМ, подобных изолиниям, формируемым на индикаторах РЛС при включенном БОМО метеорологической информации, поясняется рис. 9.

На рис. 9 шестью лучами $O_1A_{j1}, O_1A_{j1+1}, O_1A_j, O_1A_{j+1}, O_1A_{j2}$ и O_1A_{j2+1} изображены разные ситуации, возникающие при построении изолиний. Наиболее часто возникает ситуация, соответствующая отображаемой смежными

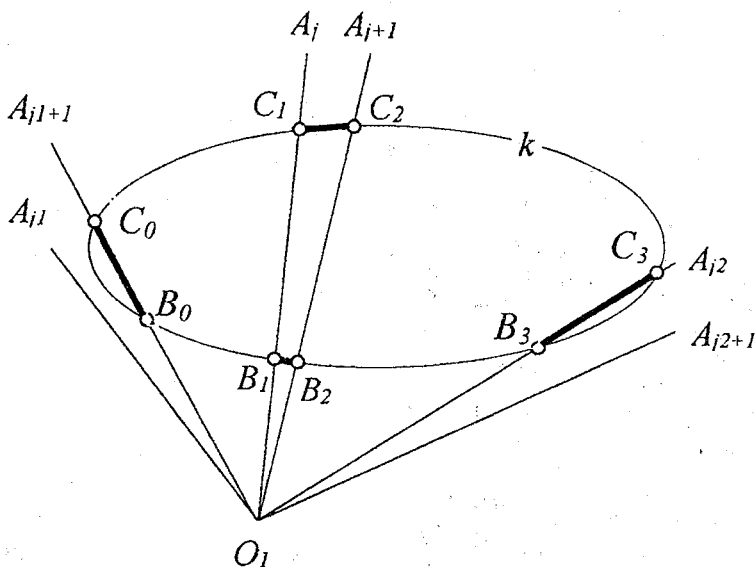


Рис. 9. Формирование одной из изолиний мощности отраженного сигнала на входе приемника РЛС

лучами O_1A_j и O_1A_{j+1} . В этой ситуации для каждого из направлений в результате предыдущих расчетов известны по 41 значению напряжений $U_{m,j,i}$ и $U_{m,j+1,i}$ для всех $m \in (1,4)$ и $i \in (0,40)$. Для построения отрезков прямых, принадлежащих k -ой изолинии, на луче находят два соседних расстояния R_i и R_{i+1} , для одного из которых выходное напряжение приемника

$U_{m,j,i}$ больше (либо меньше) $U_{nop,k}$, а другое $U_{m,j,i+1}$ меньше (либо, соответственно больше) порогового $U_{nop,k}$. Предполагая, что в интервале между расстояниями R_i и R_{i+1} выходное напряжение приемника меняется линейно от $U_{m,j,i}$ до $U_{m,j,i+1}$, производится вычисление расстояния R_k^* , на котором выходное напряжение приемника становится равным $U_{nop,k}$.

Расстояние до этой точки определяется из уравнения

$$R_k^* = R_i + \frac{R_{i+1} - R_i}{U_{m,j,i+1} - U_{m,j,i}} \cdot (U_{nop,k} - U_{m,j,i}). \quad (76)$$

Как уже упоминалось (со ссылкой на рис. 2 стр.9), выходное напряжение приемника может оказаться в процессе зондирования равным любому пороговому напряжению $U_{nop,k}$ только четное число раз (0, 2, 4 и т. д.). Структура облака, определенная условиями задания, такова, что для любых направлений зондирования с ростом расстояния наблюдается сначала монотонное нарастание, а затем монотонное убывание радиолокационной отражаемости. Следовательно, равенство выходного напряжения приемника и $U_{nop,k}$ может либо не выполняться вовсе (если при любых m, j и i напряжение $U_{m,j,i}$ меньше $U_{nop,k}$), либо выполняться дважды (если есть такие i , при которых $U_{m,j,i} > U_{nop,k}$). Во втором варианте один раз выходное напряжение приемника становится равным $U_{nop,k}$, когда с увеличением расстояния наблюдается рост радиолокационной отражаемости облака. Эта ситуация соответствует точкам B_0, B_1, B_2 , и B_3 на рис. 9. Во второй раз выходное напряжение приемника становится равным $U_{nop,k}$, когда с ростом расстояния происходит уменьшение отражаемости облака. Это наблюдается в точках C_0, C_1, C_2 и C_3 формируемого напряжения (см. рис. 9).

Для построения изолиний в программу введен четырехмерный массив расстояний $R_{n,m,j,k}$, в котором индексы меняются в интервалах $n \in (1,2)$, $m \in (1,4)$, $j \in (0,40)$ и $k \in (1,6)$. Индексу $n=1$ соответствуют те расстояния $R_{1,m,j,k}$ на любом луче $O_i A_j$, в которых выходное напряжение приемника становится равным пороговому уровню $U_{nop,k}$ при условии увеличения выходного напряжения с ростом расстояния. Индексу $n=2$ соответствуют такие расстояния $R_{2,m,j,k}$, в которых соблюдаются те же условия, но выходное напряжение приемника с увеличением $R_{2,m,j,k}$ убывает. Для вычисления

$R_{n,m,j,k}$ организуется цикл, в котором, индекс i меняется от 0 до 40. Цикл вычислений завершается, когда становится известным $R_{2,m,j,k}$. При расчетах выходные напряжения приемника РЛС $U_{m,j,i}$ сравнивают с пороговыми уровнями $U_{\text{пор},k}$. Если при некоторых i выполняются неравенства $U_{m,j,i} < U_{\text{пор},k} < U_{m,j,i+1}$, то с использованием зависимости (76) определяется расстояние $R_{1,m,j,k} = R_k^*$. При этом обязательно существует еще одно расстояние $R_{2,m,j,k}$, на котором выходное напряжение приемника равно $U_{\text{пор},k}$. Оно находится в области расстояний от РЛС, где наблюдается убывание радиолокационной отражаемости с увеличением дальности и выполняются неравенства $U_{m,j,i} > U_{\text{пор},k} > U_{m,j,i+1}$. Расстояние $R_{2,m,j,k}$ вычисляется также с использованием соотношения (76).

После того как для всех направлений зондирования $j \in (0, 40)$, всех условий зондирования $m \in (1, 4)$ и всех пороговых уровней $k \in (1, 6)$ вычислены все расстояния $R_{2,m,j,k}$ и $R_{1,m,j,k}$ ($R_{2,m,j,k} > R_{1,m,j,k}$), в программе производится пересчет полярных координат точек пространства, в которых выходное напряжение приемника становится равным $U_{\text{пор},k}$, в экранные координаты. Затем смежные точки, относящиеся к соседним лучам $O_r A_j$ и $O_r A_{j+1}$ (см. рис. 9) и имеющие одинаковые индексы n , m и k , (в данном примере смежные точки $B_1 - B_2$ и $C_1 - C_2$) соединяются отрезками прямых. Отрезки прямых линий $B_1 B_2$ и $C_1 C_2$ показаны на рис. 9 утолщенными. В результате формируются совокупность изолиний, отвечающих требованиям, оговоренным в условиях задачи. Они соответствуют изолиниям, формируемым на экранах ЯКО и ИДВ при включенном БОМО метеорологической информации.

Имеются особенности при построении отрезков прямых на краях области, ограниченной изолинией. На рис. 9 представлены такие варианты для левого и правого края области. Рассмотрим в качестве примера принцип построения изолинии на левом краю области. Пусть имеются два смежных направления зондирования $O_r A_{jl}$ и $O_r A_{j+1}$. В одном из этих направлений $O_r A_{j+1}$ есть интервал расстояний, в пределах которой отраженный сигнал создает на выходе приемника напряжение, превышающее $U_{\text{пор},k}$. На изображении ему соответствует отрезок между точками B_0 и C_0 на рис. 9. На другом, смежном направлении зондирования $O_r A_{jl}$ выходное напряжение не достигает уровня $U_{\text{пор},k}$. В таком случае для построения замкнутого контура соединяются точки B_0 и C_0 . Аналогично выполняется построение отрезка прямой $B_3 C_3$ на правой границе изображения изолинии.

В результате работы программы формируется изображение облака один из вариантов которого представлен на рис. 10. Увеличенное изображение облака на экране монитора представлено отдельно на рис. 11. На увеличенном изображении облака отчетливее видно как на краях областеі проявляется замена выпуклых линий отрезками прямых. На нем также более наглядно просматривается влияние ослабления радиоволн на структуру формируемого изображения. Если бы ослабление радиоволн отсутствовало то сформированное изображение характеризовалось симметрией относительно центра облака. В результате ослабления радиоволн тыловая (по отношению к радиолокатору) часть облака оказывается в значительной степени заэкранированной его передней частью, и, как следствие, искаженной. Облако существенно ослабляет радиоволны и от тыловой части возвращает ся сильно ослабленный сигнал.

В программе построения изображения облака предусмотрена возможность изменения размеров и расположения облака на экране монитора ЭВМ. Для увеличения масштаба изображения на 20 % нужно нажать клавишу * (умножение). Для уменьшения ранее увеличенного изображения нужно нажать на клавишу / (деление). В результате масштаб изображения будет уменьшен на 20 %. Если использовать клавиши управления положением курсора ←, ↑, → и ↓ (смещение), то изображение будет сдвигаться на 10 км при каждом нажатии соответственно налево, вверх, направо и вниз. На все перечисленные клавиши управления изображением можно нажимать многократно.

На экран монитора выводится одно из четырех рассчитанных и сформированных изображений. Для того, чтобы перейти от одного изображения к другому, нужно нажать клавишу Enter.

С помощью клавиши **Г** можно в облаке и без коррекции сигнала на рас-
стояние.

Полученное изобра-
жение можно перемещать
по экрану и менять его
масштаб. Для перемещения
изображения нужно пользо-
ваться клавишами переме-
щения курсора. Для изме-
нения масштаба изображе-
ния - клавишами * (увели-
чение) и / (уменьшение)
масштаба изображения.

Для возврата к началь-
ному изображению нажмите
на клавишу **r** (return)

Для ввода прямоугольной
сетки, либо её удаления
нажмите клавишу **Shift** и,
удерживая ее, клавишу **G**.

Для смены изображения
нажмите клавишу **Enter**.

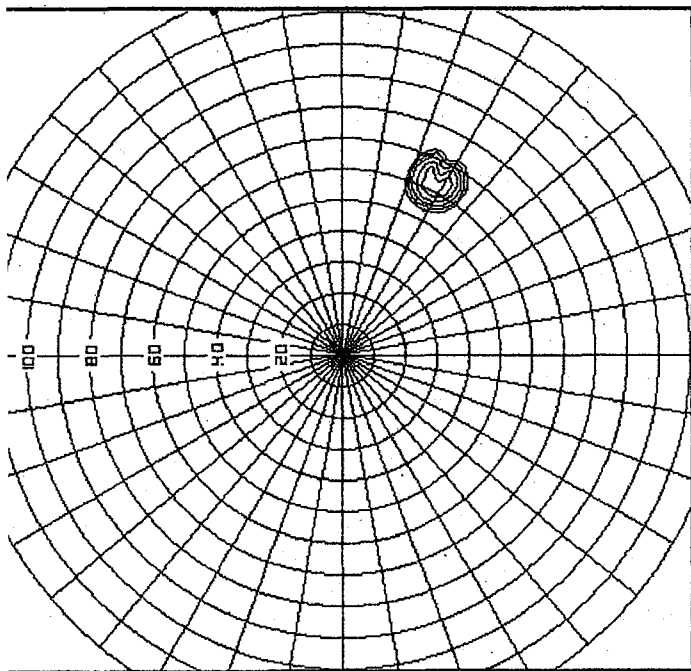


Рис. 10. Типичное изображение облака на экране монитора
по результатам расчета на ЭВМ

Если возникла необходимость возвратиться к предыдущему изображению, следует нажать клавишу г (от слова *getup* – возврат).

После вывода на экран очередного изображения нужно изменять его масштаб, используя клавиши *, /, ←, ↑, → и ↓, до тех пор, пока изображению

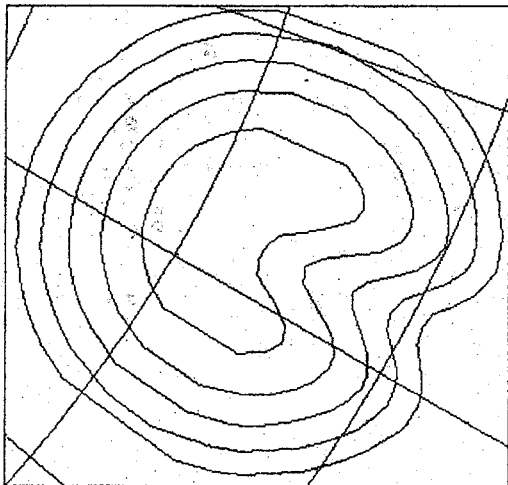


Рис. 11. Увеличенное изображение облака на экране монитора ЭВМ.

облака не займет большую часть экранного поля. Нормальным можно считать такое изображение, при котором попытка дальнейшего увеличения его размеров приведет к тому, что часть изображения облака перестанет просматриваться, так как выйдет за пределы экранной области.

После того, как будет получено нормальное изображение облака, оно должно быть перерисовано с экрана монитора и приведено в расчетном задании для каждого из че

тырех рассчитанных вариантов. Чтобы можно было удобнее и точнее срисовывать с экрана изображение облака, программа предусматривает возможность формирования прямоугольной сетки, на фоне которой наблюдается изображение. Для появления прямоугольной сетки надо нажать клавишу Shift и, удерживая ее в нажатом состоянии, нажать клавишу G. При повторном нажатии на клавишу Shift, а затем на клавишу G (при удерживаемой клавише Shift) сетка исчезает с экрана монитора. Количество вызовов и гашений сетки не ограничено.

После того как будет завершена работы с четырьмя изображениями ИКО, нужно нажать клавишу Enter. При этом происходит переход программы к вычислениям, необходимым для построения вертикального радиолокационного разреза облака, проходящего через точку максимальной отражаемости, т.е. формируется изображение радиолокационного сечения облака, аналогичное тому, которое наблюдается на экране индикатора типа дальность–высота (ИДВ).

В расчетном задании нужно привести также все изображения вертикального разреза облака для разных режимов приема отраженных сигналов и

условий распространения радиоволн, определяемых таблицей, приведенной на стр. 40.

В заключительной части расчетного задания по четвертому разделу должен быть проведен сопоставительный анализ различных изображений одного и того же облака, полученных при разных условиях распространения радиоволн и различных режимах работы системы коррекции сигналов на расстояние. Анализ должен быть проведен для изображений на экранах ИКО и ИДВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 280 с.
2. Теоретические основы радиолокации/ Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Советское радио, 1970. – 560 с.
3. Справочник по радиолокации (т. 1 – т. 4) //Под ред. М. Скольника. – М.: Советское радио, 1976. – 455 с.
4. Айвазян Г. М. Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в облаках. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 480 с.
5. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5 / Руководящий документ РД 52.04.320-91. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 358 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Вариант № xxx

Мощность передатчика в кВт	230
Длительность зондирующего импульса в мкс	1.3
Длина волны зондирующего импульса в см	3.2
Затухание в волноводном тракте в режиме передачи в дБ	2.5
Затухание в волноводном тракте в режиме приема в дБ	2.2
Диаметр параболического отражателя антенны в метрах	4.6
Коэффициент полезного действия антенны в процентах	55
Реальная чувствительность приемника РЛС в дБ/(1 Вт)	-137
Параметр приемника U_0 в В	0.43
Параметр приемника P_i в Вт	1.7E-12
Расстояние до центра облака в км	46
Азимут центра облака в градусах	224
Угол места центра облака в градусах	5.5
Максимальная радиолокационная отражаемость облака 1/см	5.5E-08
Параметр x_0 в км	3.3
Параметр y_0 в км	3.5
Параметр z_0 в км	2.4
Макс. значение коэф. ослабления радиоволн в дБ/км	3.1
Параметр x_i в км	2.2
Параметр y_i в км	2.5
Параметр z_i в км	2.1
Расстояние до точки М в км	48
Азимут точки М в градусах	222
Угол места точки М в градусах	5.3

В таблице приведены параметры радиолокационной станции, параметры, характеризующие облако и координаты точки М.

В пространстве обзора РЛС наблюдается облако. Известны сферические координаты его центра. Центр сферической системы координат совпадает с фазовым центром антенной системы РЛС. Отражаемость облака меняется в пространстве в соответствии с зависимостью

$$\eta(x, y, z) = \eta_0 \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^2 - \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 - \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right],$$

- где η_0 — радиолокационная отражаемость в центре облака;
 x, y, z — координаты точки в декартовой системе, центр которой совпадает с центром облака, ось z ориентирована вертикально вверх, ось y направлена на север, а ось x — на восток;
 x_0, y_0, z_0 — параметры, характеризующие пространственное изменение радиолокационной отражаемости.

Коэффициент ослабления радиоволн меняется в пространстве в соответствии с зависимостью

$$K(x, y, z) = K_0 \exp \left[- \left(\frac{x}{x_I} \right)^2 - \left(\frac{y}{y_I} \right)^2 - \left(\frac{z}{z_I} \right)^2 \right],$$

- где K_0 — коэффициент ослабления радиоволн в центре облака;
 x_I, y_I, z_I — параметры, характеризующие пространственное изменение коэффициента ослабления радиоволн.

Внутри облака имеется точка M , положение которой задано в сферической системе координат.

Выполнить расчеты в соответствии с пунктами, приведенными в данном учебном пособии.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение	3
1	Общие сведения о формировании отраженного сигнала	6
2	Расчет параметров сигнала, отраженного от точки M облака (первый раздел задания)	13
3	Расчет ослабления радиоволн, распространяющихся в облаке (второй раздел расчетной работы)	28
4	Вычисление выходных напряжений приемного устройства РЛС для различных условий распространения радиоволн (третий раздел задания)	32
5	Изображение облака на индикаторе кругового обзора и типа дальность-высота метеорологической РЛС (четвертый раздел задания)	36
	Литература	49
	Приложение	50
	Оглавление	52