



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование закона распределения амплитуды сигнала,
отраженного от слоистой облачности»

Исполнитель Крыленко Ксения Олеговна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Доктор физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Жуков Владимир Юрьевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« 8 » июня 2026 года

Санкт-Петербург
2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СЛОИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ.....	6
1.1 Физические механизмы формирования отражённого сигнала от слоистой облачности.....	6
1.1.1 Влияние слоистой облачности на распространение электромагнитных волн	6
1.1.2 Особенности рассеяния и поглощения в многослойных средах.....	8
1.1.3 Когерентные и некогерентные эффекты в сигнале, прошедшем через слоистую структуру	10
1.1.4 Влияние фазового состояния гидрометеоров.....	12
1.1.5 Синтез механизмов и переход к статистическим моделям.....	13
1.2 Теоретические основы радиолокационного зондирования метеообразования.....	14
1.3 Принципы работы метеорологических радиолокаторов (на примере МРЛ-5).....	16
1.4 Основные характеристики эхо-сигналов от облаков и осадков.	19
1.5 Факторы, влияющие на формирование и форму распределения амплитуд эхо-сигнала.....	21
1.6. Математические модели распределения амплитуд эхо-сигнала.....	24
1.7. Выводы по 1 главе.....	27
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ.....	28
2.1 Разработка схемы получения экспериментальных данных	28
2.2 Выбор массива данных	29
2.3 Программная реализация алгоритма обработки	30
2.4 Алгоритм проверки гипотезы с использованием критерия хи-квадрат	34
2.5 Расчет высоты разрешаемого объёма	35
2.6 Выводы по 2 главе.....	36
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУД СИГНАЛА ОТ СЛОИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ.....	37
3.1 Разделение данных по высотным слоям.....	37
3.2 Построение гистограмм распределения	38
3.3 Расчёт доли нерелеевских случаев	40
3.4 Построение графиков зависимости нерелеевских случаев от высоты.....	41

Заключение	45
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	47
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	50
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	54
Список литературы	58

ВВЕДЕНИЕ

Актуальностью данной темы является то, что радиолокационные методы исследования облачности занимают важное место в системе метеорологического мониторинга, позволяя получать информацию о пространственной структуре, интенсивности и фазовом состоянии облачных образований в режиме, близком к реальному времени. Среди всего многообразия типов облаков особое место занимают слоистые облака. Они характеризуются значительной горизонтальной протяжённостью, относительно малой вертикальной мощности и играют важную роль в формировании осадков и радиационном балансе Земли.

При интерпретации данных от распределённых метеоцелей предполагается, что амплитуды эхо-сигналов подчиняются релеевскому закону распределения. Такое предположение основано на центральной предельной теореме и справедливо для случая большого числа независимых хаотически движущихся рассеивателей. Но для слоистых облаков, характеризующихся наличием резких границ и зон фазовых переходов, в сигнале может присутствовать когерентная составляющая. Интерференция когерентной и некогерентной компонент приводит к трансформации релеевского закона в нерелеевское.

Объект и предмет исследования:

Объект – эхо-сигналы от слоистой облачности, зарегистрированные метеорологическим радиолокатором МРЛ-5.

Предмет – закон распределения амплитуд отражённых сигналов для двух каналов радиолокатора.

Целью дипломной работы является исследование закона распределения амплитуд сигнала от слоистой облачности и проверка гипотезы о наличии отклонений от релеевского распределения в зоне фазовых переходов, что теоретически может соответствовать райсовскому распределению.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать физические механизмы формирования отражённого сигнала от слоистой облачности.
2. Рассмотреть математические модели распределения амплитуд.
3. Изучить принципы работы и технические характеристики метеорологического радиолокатора МРЛ-5.
4. Разработать методику статистической обработки данных, реализованную в среде MATLAB, включающую извлечение выборок для заданных дальностей и проверку гипотезы о релеевском распределении с использованием критерия хи-квадрат.
5. Выполнить расчёт высоты центра разрешаемого объёма, разделение данных по слоям и построение гистограмм и графиков выполнить в среде Excel.
6. Определить положение нулевой изотермы по данным радиозондирования Университета Вайоминга.
7. Написать выводы о характере закона распределения амплитуд для разных высотных слоёв для каждого канала.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СЛОИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ

1.1 Физические механизмы формирования отражённого сигнала от слоистой облачности

Корректная интерпретация статистических свойств амплитуд эхо-сигналов невозможна без понимания физических механизмов его формирования. В отличие от отражения от точечных целей, сигнал, рассеянный слоистой облачностью, представляет собой результат суперпозиции нескольких физически разнородных процессов. Каждый из этих процессов вносит собственный вклад в формирование результирующего электромагнитного поля.

Слоистые облака (Stratus, Nimbostratus) представляют собой протяжённую атмосферную систему, состоящую из огромного числа взвешенных частиц (капель воды или кристаллов льда), распределённых в относительно тонком слое. С точки зрения электродинамики, такая среда является статистически однородной, но пространственно неоднородной дискретной средой.

Далее последовательно рассмотрены основные механизмы взаимодействия электромагнитной волны со слоистым облачным образованием.

1.1.1 Влияние слоистой облачности на распространение электромагнитных волн

Взаимодействие электромагнитной волны со слоистой облачной средой носит сложный характер и определяется совокупностью физических процессов, изменяющих амплитуду, фазу и поляризацию сигнала.

Ослабление электромагнитной волны

Суммарное ослабление мощности электромагнитной волны при распространении в облачной среде определяется двумя процессами: поглощением и рассеянием. Коэффициент экстинкции(ослабления) α выражается как (см. формулу 1):

$$\alpha = \alpha_{\text{погл}} + \alpha_{\text{рас}} \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{погл}}$ – коэффициент поглощения, связанный с переходом электромагнитной энергии в тепловую (диэлектрические потери в каплях воды или кристаллах льда), а $\alpha_{\text{рас}}$ – коэффициент рассеяния, характеризующий переизлучение волны во всех направлениях.

Для слоистой облачности, состоящей преимущественно из мелких капель (радиусом от 1 до 50 мкм), в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн преобладает релеевское рассеяние, при котором интенсивность рассеянного поля пропорциональна λ^{-4} . Это означает, что коротковолновые радары (3 см) испытывают значительно большее ослабление, чем длинноволновые (10 см), что необходимо учитывать при выборе зондирующей частоты.

Фазовые искажения волнового фронта

Неоднородности показателя преломления внутри облачного слоя, обусловленные флуктуациями плотности водности и температуры, приводят к искажениям фазового фронта проходящей волны. Характерный масштаб неоднородностей в слоистых облаках варьируется от нескольких сантиметров до сотен метров. При прохождении через такую турбулентную среду волна приобретает случайные фазовые набегі, что в дальнейшем, при отражении и обратном распространении, усиливает флуктуации амплитуды принимаемого сигнала.

Количественно степень фазовых искажений описывается структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления C_n^2 . Для слоистых облачных образований значение C_n^2 обычно ниже, чем для кучевых облаков из-за меньшей турбулентной активности.

1.1.2 Особенности рассеяния и поглощения в многослойных средах

Для понимания закономерностей формирования отражённого сигнала от слоистой облачности необходимо учитывать, что она представляет собой не просто однородный слой, а многослойную среду. В такой среде чередуются области с различными электрофизическими параметрами: водностью, размерами частиц, их фазовым состоянием. Это накладывает существенные особенности на процессы рассеяния и поглощения электромагнитных волн, которые выходят за рамки простой суммы эффектов от каждого слоя.

Рассеяние на отдельных частицах внутри слоя

Для типичных частиц слоистых облаков (капли радиусом 1-50 мкм, кристаллы льда размером 10-100 мкм) в диапазоне длин волн 3-10 см выполняется условие Релея (см. формулу 2):

$$\frac{2\pi r}{\lambda} \ll 1 \quad (2)$$

Где r – радиус частицы, λ - длина волны.

В этом приближении эффективная площадь рассеяния одной частицы $\sigma_{\text{рел}}$ определяется выражением (см. формулу 3):

$$\sigma_{\text{рел}} = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (3)$$

Где D – диаметр частицы, m – комплексный показатель преломления вещества. Обращает на себя внимание сильная зависимость от диаметра и длины волны. Это означает, что:

- Крупные капли (даже в небольшом количестве) вносят доминирующий вклад в рассеянный сигнал;
- Переход к более коротким волнам увеличивает рассеяние примерно в 100 раз.

Влияние многослойности на суммарное рассеяние

В отличие от однородного облачного массива, многослойная структура создаёт эффект усиления или ослабления рассеянного поля. Для простейшего случая двух слоёв, разделённых прослойкой воздуха, суммарный коэффициент обратного рассеяния η_{Σ} не является простой суммой вкладов отдельных слоёв (см. формулу 4):

$$\eta_{\Sigma} = \eta_1 + \eta_2 e^{-2\tau_1} + 2\sqrt{\eta_1 \eta_2} e^{-\tau_1} \cos(\Delta\phi) \quad (4)$$

Где η_1, η_2 – отражаемости слоёв, τ_1 – оптическая толщина первого слоя, $\Delta\phi$ – разность фаз между волнами, рассеянными первым и вторым слоями.

Интерференционный член (последнее слагаемое) может так увеличивать, так и уменьшать результирующий сигнал в зависимости от расстояния между слоями и длины волны.

Поглощение в многослойной структуре

Поглощение электромагнитной энергии в облачной среде определяется преимущественно жидкокапельной фазой, поскольку диэлектрические потери в воде на порядки выше, чем во льду. Для типичной слоистой облачности с водностью $W = 0,1 \text{ г/м}^3$ коэффициент погонного поглощения $\alpha_{\text{полг}}$ на волне 3 см составляет примерно 0,01-0,05 дБ/км, а на волне 0,8 см – уже 0,2-1 дБ/км.

Особенность многослойных сред заключается в неравномерности поглощения по высоте. Если нижний слой содержит крупные капли (например, подтаявшие при прохождении нулевой изотермы), то он поглощает значительно сильнее, чем вышележащие чисто ледяные или мелкокапельные слои. Это приводит к эффекту «самозранивания»: мощный сигнал от дальних (верхних) слоёв может быть ослаблен ближними (нижними) слоями.

1.1.3 Когерентные и некогерентные эффекты в сигнале, прошедшем через слоистую структуру

При взаимодействии электромагнитной волны со слоистым облачным образованием в отражённом (и прошедшем) сигнале присутствуют две статистически независимые составляющие: когерентная и некогерентная. Их соотношение определяет вид закона распределения амплитуд и является ключевым фактором для понимания статистических свойств эхо-сигнала.

Природа когерентной составляющей

Когерентная составляющая возникает при отражении от регулярных макроскопических структур, сохраняющих фазовые соотношения в пределах разрешаемого объема. В слоистой облачности основным источником когерентной компоненты являются границы раздела сред:

верхняя и нижняя кромки облачного слоя, где диэлектрическая проницаемость меняется скачкообразно.

Коэффициент отражения Френеля для границы «воздух – облако» при нормальном падении определяется выражением (см. формулу 5):

$$R = \left| \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right|^2 \quad (5)$$

Где $\epsilon_1 \approx 1$ (диэлектрическая проницаемость воздуха), а ϵ_2 – комплексный показатель преломления облачной среды. Для типичной водности $W = 0,1$ г/м³ на сантиметровых волнах $\epsilon_2 \approx 1 + i \cdot 10^{-4}$, что очень близко к единице. Поэтому когерентное отражение от границ слабое (коэффициент отражения порядка $10^{-8} - 10^{-6}$), но оно существует и формирует доминирующую когерентную волну. Вклады от других механизмов, таких как рассеяние на крупных каплях или упорядоченных турбулентных структурах, учитываются через изменение общего параметра структуры среды. Амплитуда когерентной составляющей $A_{\text{ког}}$ почти не флуктуирует во времени (меняется медленно).

Природа некогерентной составляющей

Некогерентная составляющая формируется в результате рассеяния на множестве хаотически расположенных мелких частиц (капель, кристаллов). Её ключевые свойства обусловлены тем, что фазы парциальных волн случайны и равномерно распределены в интервале $[0, 2\pi)$, а их амплитуды статистически независимы. Согласно центральной предельной теореме, результирующее поле подчиняется гауссовскому распределению; следовательно, его огибающая распределена по закону Релея.

Интерференция когерентной и некогерентной компонент

Полное поле в точке приёма представляет собой сумму когерентной волны и некогерентной частей (см. формулу 6):

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_{\text{ког}} \cdot e^{i\omega t} + \sum_{j=1}^N \vec{E}_j \cdot e^{i(\omega t + \phi_j(t))} \quad (6)$$

Поскольку когерентная составляющая имеет постоянную амплитуду s и фазу Θ_0 , а некогерентные парциальные волны создают гауссовский шум с дисперсией σ^2 , результирующая огибающая A (амплитуда) подчиняется распределению Райса (см. формулу 7):

$$p(A) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{As}{\sigma^2}\right), \quad A \geq 0 \quad (7)$$

Где I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка, s – амплитуда когерентной компоненты, σ^2 – мощность некогерентной компоненты.

1.1.4 Влияние фазового состояния гидрометеоров

С изменением высоты в слоистом облаке могут наблюдаться различные фазовые состояния гидрометеоров. Переход через нулевую изотерму сопровождается резким изменением отражаемости, что связано с увеличением диэлектрической проницаемости при таянии кристаллов и формированием водяной плёнки на их поверхности. В этой области

статистические свойства сигнала претерпевают наиболее существенные изменения.

Таблица 1. – Фазовое состояние гидрометеоров в зависимости от высоты

Высотный диапазон	Фазовое состояние	Особенности рассеяния
Ниже нулевой изотермы	Капли воды	Релеевское рассеяние, сильное поглощение
Вблизи нулевой изотермы	Смешанная фаза	Максимальная отражаемость, сложная статистика
Выше нулевой изотермы	Кристаллы льда	Анизотропное рассеяние, поляризационные эффекты

1.1.5 Синтез механизмов и переход к статистическим моделям

Обобщая рассмотренные механизмы, можно представить отраженный сигнал от слоистой облачности как сумму трёх основных составляющих (см. формулу 8):

$$\vec{E}_{\text{отр}} = \underbrace{\vec{E}_{\text{ког}}^{(\text{границы})}}_{\text{когерентная}} + \underbrace{\vec{E}_{\text{неког}}^{(\text{гидрометеоры})}}_{\text{некогерентная}} + \underbrace{\vec{E}_{\text{неког}}^{(\text{турбулентность})}}_{\text{некогерентная (малая)}} \quad (8)$$

Итоговое распределение амплитуд формируется в результате интерференции этих составляющих. Как будет показано далее, при наличии когерентной составляющей наиболее адекватной математической моделью для описания такого сигнала является райсовское распределение, которое в отсутствие когерентной компоненты переходит в релеевское.

1.2 Теоретические основы радиолокационного зондирования метеообразования

Радиолокационный метод исследования метеообразований основан на облучении цели зондирующим сигналом и приёме электромагнитных волн, рассеянных частицами, входящими в состав метеообразования. В отличие от точечных целей, метеообразования являются распределёнными целями, заполняющими значительный объём пространства, что определяет специфику их радиолокационного наблюдения.

Основное уравнение метеорологической радиолокации

Для распределённой метеоцели, заполненной множеством рассеивателей, средняя мощность отражённого сигнала определяется выражением (см. формулу 9):

$$\overline{P}_{\text{отр}} = P_{\text{изл}} \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \eta \cdot V_{\text{разр}} \quad (9)$$

Где $P_{\text{изл}}$ - импульсная мощность передатчика, G – коэффициент усиления антенны, λ – длина волны, R – дальность до цели, η – радиолокационная отражаемость, $V_{\text{разр}}$ – разрешаемый объём.

Радиолокационная отражаемость η

Центральным параметром, описывающим рассеивающие свойства метеообразования, является радиолокационная отражаемость η – суммарная эффективная площадь рассеяния всех частиц в единичном объёме (см. формулу 10):

$$\eta = \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (1.10)$$

Где σ_i – эффективная площадь рассеяния i -й частицы.

Для облаков и осадков, состоящих из сферических капель воды (в релеевском приближении, когда размер капли D намного меньше длины волны λ), σ_i выражается через диаметр капли D_i (см. формулу 11):

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D_i^6 \quad (1.11)$$

Где $|K|^2 = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ – комплексный множитель, зависящий от показателя преломления вещества частицы m .

Суммируя по всем каплям в единице объёма и вводя гидрометеорологический параметр $Z = \sum D_i^6$, получаем связь (см. формулу 12):

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z \quad (12)$$

Для воды в сантиметровом диапазоне $|K|^2 \approx 0.93$.

Особенности зондирования слоистых облачных образований

При зондировании слоистых облаков необходимо учитывать следующие особенности:

- Большая протяженность: Слоистые облака занимают огромные площади при небольшой толщине. Это приводит к тому, что на малых и средних дистанциях разрешаемый объём полностью заполнен рассеивателями. В этом случае мощность отражённого сигнала спадает пропорционально R^{-2} , а не R^{-4} , как для одиночной цели.
- Малая отражаемость: Водность слоистых облаков невелика, что даёт значения η на 2-4 порядка ниже, чем для ливневых осадков. Поэтому для их уверенного обнаружения требуются радиолокаторы с высокой чувствительностью.
- Ослабление сигнала: При прохождении через толщу облака зондирующий и отражённые сигналы ослабляются. В уравнение радиолокации необходимо вводить поправку на ослабление (см. формулу 13):

$$P_{\text{отр}} = P_{\text{отр}}^{\text{без_ослаб}} \cdot e^{-2 \int_0^R \alpha(r) dr} \quad (13)$$

Где $\alpha(r)$ – погонный коэффициент ослабления.

Уравнение радиолокации описывает среднюю мощность сигнала. Однако, реальный сигнал флуктуирует. Для полного описания сигнала необходимо знать закон распределения мгновенных амплитуд этих флуктуаций.

1.3 Принципы работы метеорологических радиолокаторов (на примере МРЛ-5)

Назначение и общие характеристики МРЛ-5

Метеорологический радиолокатор МРЛ-5 предназначен:

- для обнаружения и определение местоположение очагов гроз, града и ливневых осадков;
- Определение горизонтальной и вертикальной протяжённости метеообразований;
- Обеспечение градозащиты.

МРЛ-5 выпускается в двух модификациях: передвижной (МРЛ-5А) и стационарной (МРЛ-5Б).

Основные технические характеристики МРЛ-5 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – основные технические характеристики МРЛ-5

Параметр	1 канал (3 см)	2 канал (10 см)
Длина волны, см	3,13-3,14	10,15
Импульсная мощность, кВт	150-250	500-800
Длительность импульса мкс	1 или 2	1 или 2
Частота повторений, Гц	250 или 500	250 или 500
Ширина ДНА (градусы)	0,5/1,5	1,5
Чувствительность, дБ/Вт	-134	-136
Диаметр антенны, м	4,5	4,5
Максимальная дальность, км	300	300

Двухканальный принцип работы

Отличительной особенностью МРЛ-5 является наличие двух независимых рабочих каналов – коротковолнового (3 см) и длинноволнового (10 см).

Такое конструктивное решение обусловлено следующими соображениями:

- 1 канал (3 см) обладает высокой разрешающей способностью по угловым координатам и чувствителен к мелкокапельным облачным образованиям, но сильнее ослабляется в осадках.
- 2 канал (10 см) имеет меньшую разрешающую способность, но лучше проникает сквозь интенсивные осадки.

Режим градозащиты реализуется при совместной работе обоих каналов, что позволяет получать дополнительную информацию о фазовом состоянии гидрометеоров путем сравнения отражаемости на двух длинах волн.

Структурная схема и принцип действия

В основу работы МРЛ-5 положен импульсный метод радиолокации. Суть метода заключается в излучении коротких мощных зондирующих импульсов и последующем приеме отражённых от цели сигналов в интервалах между излучениями.

Рассмотрим принцип действия радиолокатора в соответствии с его структурной схемой. В состав МРЛ-5 входят следующие основные функциональные узлы:

- Синхронизатор
- Передающее устройство
- Антенная система с антенным переключателем
- Приёмное устройство
- Система индикации и регистрации

Принцип работы заключается в следующем: синхронизатор задаёт тактовую частоту; передатчик генерирует мощный СВЧ-импульс; антенна излучает его в пространство; после окончания зондирующего импульса антенна подключается к приёмнику; отражённый сигнал усиливается и поступает на индикаторы.

Значение особенностей МРЛ-5 для статистического анализа сигналов слоистой облачности

Для изучения закона распределения амплитуд от слоистой облачности конструктивные и схемотехнические особенности МРЛ-5 имеют принципиальное значение.

Ключевые факторы влияния:

- Логарифмический приёмник искажает истинный закон распределения амплитуд, что необходимо учитывать при анализе гистограмм;
- Наличие двух каналов позволяет сравнивать статистические свойства сигналов на 3 см и 10 см, что даёт информацию о размерах рассеивающих частиц.
- Ширина ДНА определяет размер разрешаемого объёма и, следовательно, количество независимых рассеивателей.
- Система калибровки и контроля необходима для нормировки амплитуд и отделения реальных эффектов от инструментальных искажений.

1.4 Основные характеристики эхо-сигналов от облаков и осадков.

Эхо-сигналы, получаемые метеорологическими радиолокаторами, несут ключевую информацию о физических свойствах метеообразований. Для корректной интерпретации статистических свойств амплитуд эхо-сигнала необходимо четкое понимание его основных характеристик.

Энергетические характеристики:

Основной энергетической характеристикой является средняя мощность отражённого сигнала $P_{отр}$, которая определяется уравнение

метеорологической радиолокации (см. раздел 1.2). Для слоистых облаков характерны низкие значения $P_{отр}$, вследствие малой водности, что на дальностях 50-100 км обычно составляет – 100...-70 дБ/Вт.

Флуктуации мгновенной мощности $P(t)$ является важной характеристикой относительно среднего значения. Причиной флуктуации является интерференция волн, рассеянных отдельными частицами внутри разрешаемого объёма. Относительная величина флуктуаций характеризуется нормированной дисперсией σ_p^2 . Для большого числа независимых рассеивателей это отношение стремится к единице.

Пространственно-временные характеристики

Ключевая пространственная характеристика – это разрешаемый объём $V_{разр}$ для радиолокатора с параболической антенной (см. формулу 14):

$$V_{разр} = \frac{\pi \cdot \theta \cdot \varphi \cdot R^2 \cdot c \cdot \tau}{8 \cdot \ln 2} \quad (14)$$

Для МРЛ-5 в режиме штормоповещения ($\Theta=0,5$ градусов, $\tau=1$ мкс) на дальности $R=50$ км разрешаемый объём составляет примерно $0,05 \text{ км}^3$.

Время корреляции флуктуаций амплитуды $\tau_{кор}$ обратно пропорционально ширине доплеровского спектра ΔF (см. формулу 15):

$$\tau_{кор} \approx \frac{1}{\Delta F} \quad (15)$$

Для слоистых облаков время корреляции составляет десятки-сотни миллисекунд, что обеспечивает независимость каждого отсчёта при зондировании.

Поляризационные характеристики

МРЛ-5 использует две линейные поляризации: вертикальную (3 см) и горизонтальную (10 см). Это приводит к различным статистическим свойствам эхо-сигналов:

- Сферические капли рассеиваются одинаково;
- Несферические частицы дают разный отклик;
- Отражение от границ зависит от поляризации.

Различие в статистиках двух каналов может служить признаком наличия когерентной составляющей.

1.5 Факторы, влияющие на формирование и форму распределения амплитуд эхо-сигнала

Форма распределения амплитуд эхо-сигнала от слоистой облачности не является фиксированной величиной. Она определяется совокупностью факторов. Которые можно условно разделить на три основные группы: внутренние (связанные со строением самого облака), внешние (связанные с условиями зондирования) и аппаратурные (связанные с особенностями радиолокационной системы).

Таблица 3 – Внутренние факторы (связанные со строением облака)

Фактор	Влияние на распределение
Концентрация и дисперсия частиц размеров частиц	Крупные капли дают непропорционально большой вклад из-за зависимости $\sigma \sim D^6$, что приводит к появлению «тяжёлых хвостов» в

	распределении и отклонению от релеевского закона.
Фазовое состояние	В зоне таяния (нулевая изотерма) частицы покрываются водной плёнкой, что вызывает резкое увеличение отражаемости и трансформацию распределения амплитуд.
Турбулентность	Слабая турбулентность в слоистых облаках не разрушает когерентную составляющую от границ.
Когерентная составляющая	Отражение от макроскопических границ облачного слоя создаёт регулярную компоненту поля. Сумма когерентной и некогерентной компонент приводит к формированию райсовского распределения.
Вертикальная неоднородность	Структура облака меняется с высотой: у верхней и нижней границ доминирует когерентное отражение, а в середине слоя – некогерентное рассеяние.

Таблица 4 – Внешние факторы (связанные с радиолокатором)

Фактор	Влияние на распределение
Отношение сигнал/шум (SNR)	При SNR <0 дБ наблюдаемое распределение определяется шумом (релеевское). При SNR >10-15 дБ искажениями от шума можно пренебречь.
Ширина ДНА	Узкая ДНА обуславливает меньшее количество независимых рассеивателей в объёме разрешения, что увеличивает разброс амплитуд и отклонения от релеевского закона.
Поляризация	Сравнение статистических свойств сигналов на разных поляризациях позволяет диагностировать форму частиц и оценивать вклад когерентной составляющей.

Аппаратурные факторы

Логарифмический приёмник МРЛ-5: Использование логарифмического усилителя приводит к нелинейному преобразованию исходного распределения амплитуд. Если на входе сигнал имел райсовское распределение, то на выходе он становится более симметричным, что необходимо учитывать при анализе гистограмм.

1.6. Математические модели распределения амплитуд эхо-сигнала

Анализ статистических свойств радиолокационных сигналов от метеообразований является ключевым этапом в определении их микроструктуры и фазового состава. Поскольку сигнал, регистрируемый приёмником, представляет собой суперпозицию большого числа элементарных отражений от отдельных частиц (капель воды, кристаллов льда), его амплитуда является случайной величиной. Для описания таких процессов в радиолокационной метеорологии применяются различные вероятностные модели.

Выбор конкретной модели зависит от физических условий зондирования: концентрации частиц, их распределения по размерам (спектра) и соотношения размеров частиц с длиной волны зондирующего сигнала.

Релеевское распределение

В случае, если размеры рассеивателей значительно меньше длины волны ($\lambda \gg D$, где D - характерный размер частицы) и их количество в объёме разрешения велико ($N \gg 1$), выполняется условие применимости центральной предельной теоремы. В этом случае мгновенные значения напряжённости электрического поля можно считать комплексными гауссовскими процессами с нулевым средним значением.

Для такого процесса огибающая (амплитуда) сигнала подчиняется *распределению Рэлея*. Плотность вероятности распределения амплитуды A описывается выражением (см. формулу 16):

$$f(A; \sigma) = \frac{A}{\sigma^2} e^{-\frac{A^2}{2\sigma^2}}, \quad A \geq 0 \quad (16)$$

Где:

A - амплитуда огибающей сигнала;

σ^2 - дисперсия квадратурных компонент сигнала (параметр масштаба).

Релеевское распределение хорошо описывает эхо-сигналы от ливневых осадков, града и кучево-дождевых облаков, где наблюдается высокая концентрация частиц и сильная турбулентность, разрушающая когерентную составляющую.

Райсовское распределение

Райсовское распределение описывает огибающую суммы гауссовского шума и детерминированного гармонического сигнала. Условия применимости: наличие регулярной составляющей. Ниже представлена формула плотности вероятности (см. формулу 17):

$$p_{\text{райс}}(A) = \frac{A}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{A^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{As}{\sigma^2}\right), \quad A \geq 0 \quad (17)$$

Где:

S – амплитуда когерентной составляющей;

I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Распределение Накагами (m-распределение)

Распределение Накагами является обобщением райсовского и релеевского распределений.

Плотность вероятности (см. формулу 18):

$$p_{\text{нак}}(A) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} \cdot A^{2m-1} \cdot \exp\left(-\frac{m}{\Omega}A^2\right), \quad A \geq 0 \quad (18)$$

Где: m – параметр формы ($m \geq 0,5$), $\Omega = E|A|^2$ – средняя мощность, $\Gamma(m)$ – гамма-функция.

- При $m = 1$ – релеевское распределение.
- При $m = (K+1)^2/(2K+1)$ – райсовское распределение.

Выбор модели для слоистой облачности

На основе анализа физических механизмов формирования отражённого сигнала и факторов, влияющих на распределение амплитуд, можно сделать следующий вывод.

Для слоистых облаков, характеризующихся:

- Наличие резких границ раздела сред
- Относительно слабой турбулентностью
- Присутствием зоны фазовых переходов

Наиболее адекватной математической моделью распределения амплитуд эхо-сигнала для слоистой облачности с учётом наличия границ раздела и зон фазовых переходов может считать райсовское распределение.

Релеевское распределение при этом является предельным случаем.

Для практической идентификации закона распределения по экспериментальным данным используется:

- Критерий согласия – для проверки соответствия выборочного распределения теоретическому (хи-квадрат).

1.7. Выводы по 1 главе

На основе проведённого теоретического анализа могут быть сформулированы следующие выводы:

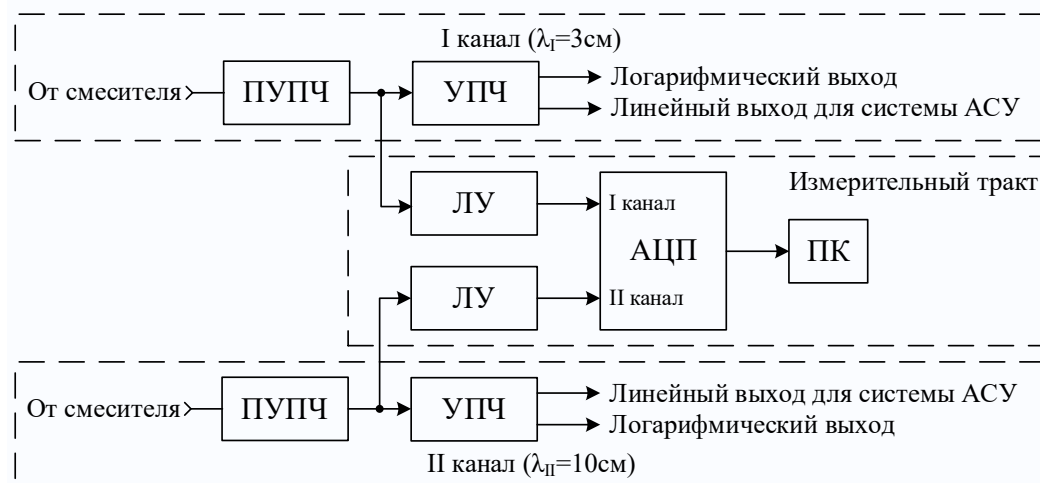
- Физические механизмы формирования сигнала: отражённый сигнал от слоистой облачности формируется в результате когерентной составляющей и некогерентной составляющих. Что приводит к отклонению от релеевского закона, и в теоретическом плане такое отклонение описывается райсовским распределением.
- Когерентная и некогерентная составляющие: в отражённом сигнале от слоистой облачности присутствуют как когерентная (отражение от границ), так и не когерентная (объёмное рассеяние). Интерференция этих составляющих приводит к трансформации классического релеевского распределения в нерелеевское (в частном случае – райсовское). Наибольшие отклонения от релеевского закона ожидаются вблизи границ облачного слоя и в зоне фазовых переходов.
- Выбор математической модели: на основе анализа механизмов и факторов влияние установлено, что для слоистых облаков наиболее адекватной является райсовское распределение. Релеевское является предельным случаем.
- Факторы, влияющие на распределение: концентрация крупных частиц, турбулентность, отношение сигнал/шум, ширина диаграммы направленности, поляризация зондирующего сигнала.
- Роль нулевой изотермы: в зоне фазовых переходов следует ожидать максимальных отклонений от релеевского закона, что будет проверено в практической части для 1-го и 2-го каналов МРЛ-5.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

2.1 Разработка схемы получения экспериментальных данных

Прямое измерение закона распределения амплитуды сигнала на выходе логарифмического приемника представляет собой нетривиальную задачу. Как отмечается в работах предшественников, многочисленные попытки провести такой эксперимент напрямую из-за методологических трудностей, связанными с нелинейностью характеристик приемного тракта и необходимостью высокоточной калибровки.

Для преодоления указанных сложностей авторами была разработана и апробирована специальная схема получения экспериментальных данных, которая позволила обойти ограничения логарифмического приемника и обеспечить необходимую точность измерений. Принципиальная схема регистрации сигнала представлена на рис.1.



ПУПЧ – предварительный усилитель промежуточной частоты; ЛУ – линейный усилитель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – компьютер.

Рис.1. Структурная схема измерительного канала для исследования закона распределения амплитуды сигналов, отраженных от метеоцели, на базе радиолокатора МРЛ-5

Суть предложенной методики заключается в том, что сигнал с выхода предварительного усилителя промежуточной частоты, где он ещё сохраняет линейные характеристики, поступает на линейный усилитель. Это позволяет работать с сигналом в линейном режиме, что критически важно для

корректного статистического анализа его амплитуды. Усиленный сигнал затем обрабатывается основным усилителем промежуточной частоты и оцифровывается с помощью 12-разрядного двухканального аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 80 МГц. Оцифровка проводилась на промежуточной частоте для двух каналов одновременно (3 и 10 см), что позволило получить данные для последующего цифрового детектирования и статистической обработки на персональном компьютере. Таким образом, использование данной схемы позволило перейти от косвенных оценок к прямому сбору данных об амплитуде сигнала в линейной области, что обеспечило высокую достоверность результатов. В дипломной работе для исследования закона распределения амплитуд сигнала от слоистой облачности была применена аналогичная методика. Это позволяет гарантировать корректность извлечения и анализа искомого закона распределения, что является ключевой целью данной работы.

2.2 Выбор массива данных

В качестве исходного материала для анализа был выбран массив данных за 25.04.2022 года, предоставленный научным руководителем. Критериями выбора послужили *репрезентативность выборки и высокое качество данных*. Указанный массив содержит достаточный объём наблюдений за слоистообразной облачностью, что является необходимым условием для проведения статистического анализа и построения эмпирической функции

распределения амплитуд. Использование этих данных позволяет с высокой степенью достоверности исследовать искомый закон распределения.

Запуск АЦП производился в момент излучения зондирующего импульса, после чего набирались данные в виде 33000 отсчетов дальности отраженного сигнала на каждый зондирующий импульс для 500 последовательных зондирующих импульсов. В результате чего формировался массив данных в виде ряда значений с диапазоном от 0 до 122 километров.

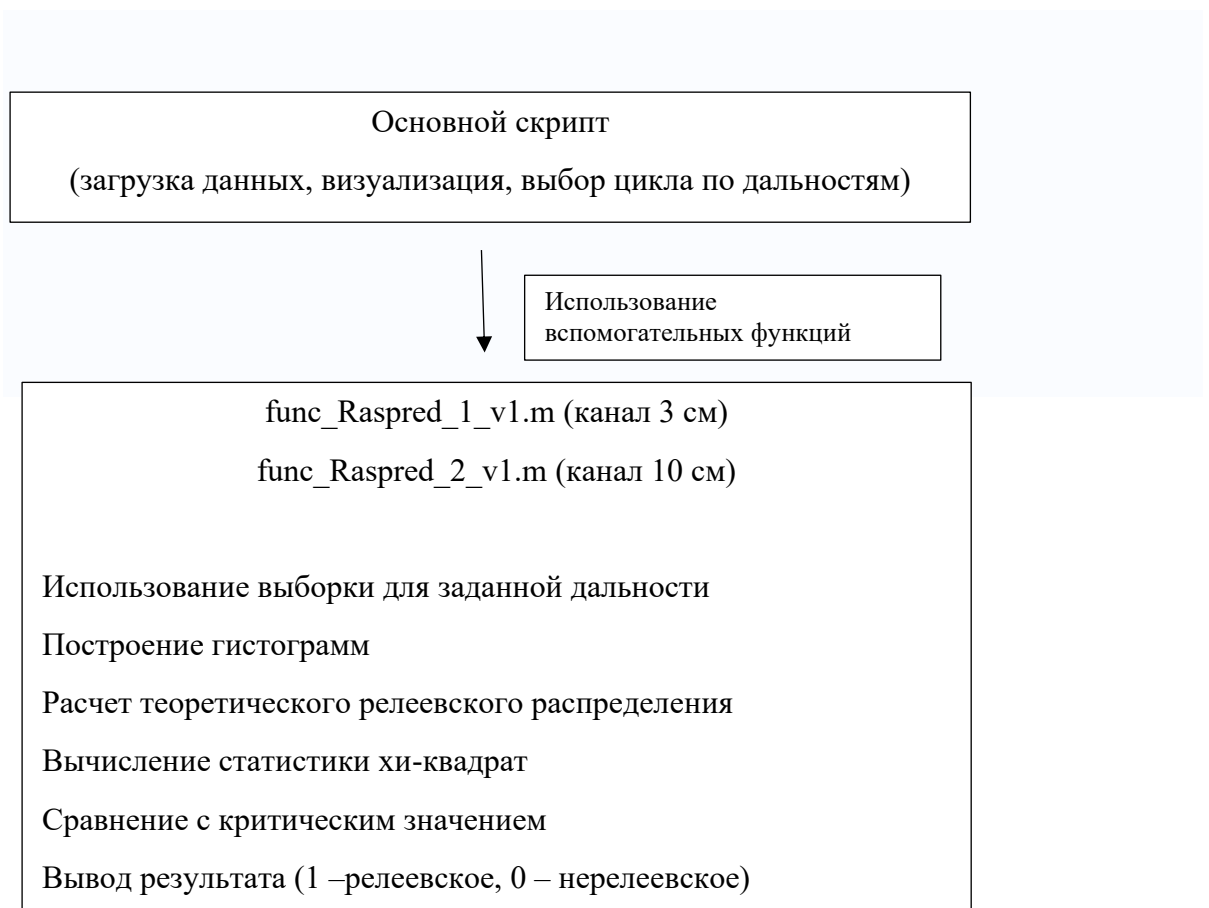
Массив данных состоит из 40 файлов(по 20 для каждого канала). Сами файлы содержат также данные азимута и угла установки антенны, при которых получены данные.

2.3 Программная реализация алгоритма обработки

Разработка программного обеспечения для обработки экспериментальных данных выполнена в среде MATLAB. Программный комплекс состоит из одного основного скрипта и двух вспомогательных функций, реализующих статистическую проверку гипотезы о релеевском распределении. Такая структура позволяет:

- Разделить задачи загрузки/визуализации данных и статистических расчётов;
- Повторно использовать функции для разных каналов и интервалов дальностей;
- Упростить отладку и модификацию алгоритмов.

Схема взаимодействия программных модулей представлена ниже:



Первый этап работы основного кода состоит в очистке рабочей среды MATLAB перед выполнением программы, чтобы исключить влияние предыдущих расчетов. Далее определяются основные физические параметры системы, такие как: частота и интервал дискретизации. Эти параметры важны для корректной интерпретации временных и пространственных масштабов сигнала. Затем производится загрузка экспериментальных данных из текстовых файлов, содержащих результаты регистрации сигнала от слоистой облачности для двух каналов МРЛ-5 (длина волны 3 см и 10 см). Переменная `N_per` хранит общее количество зарегистрированных импульсов (строк в матрице), которое составляет 500 протоколов.

Следующим этапом кода является визуализация пространственно-временных характеристик сигнала. В котором создаются трехмерные графики(развертки) для обоих каналов. Графики позволяют визуально оценить динамику изменений амплитуды сигнала во времени и пространстве. Оси имеют следующий физический смысл:

- Ось X – номер отсчета дальности
- Ось Y – номер прокола
- Ось Z – амплитуда сигнала

Полученные графики представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

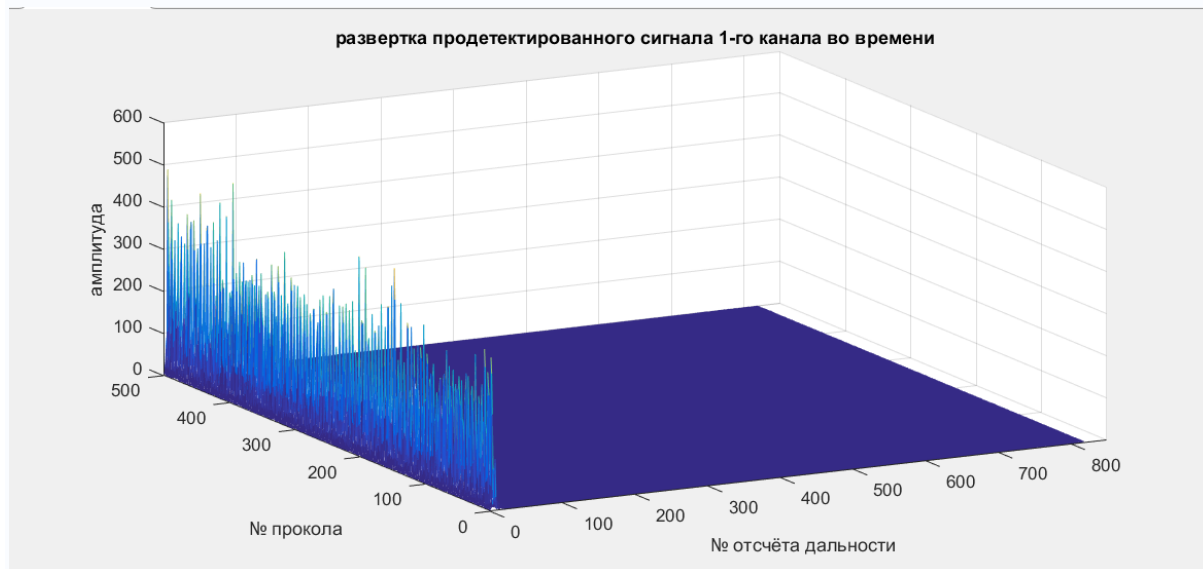


Рис.2 Пример ансамбля из 500 реализаций развертки во времени протектированного сигнала 1-го канала.

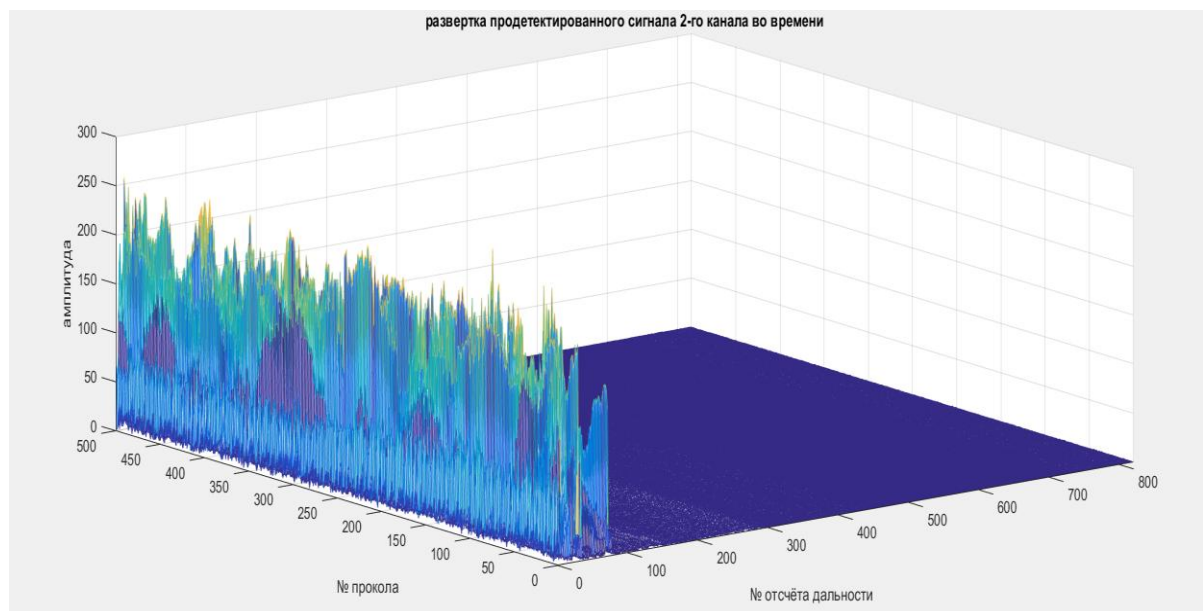


Рис.3 Пример ансамбля из 500 реализаций развертки во времени протектированного сигнала 2-го канала.

Далее по каждому графику продетектированного сигнала для был выбран диапазон с наибольшими выбросами. Использовались только отражения с расстояний, превышающих 20 километров, чтобы исключить воздействие местных мешающих объектов. Ниже приведены примеры полученных графиков.

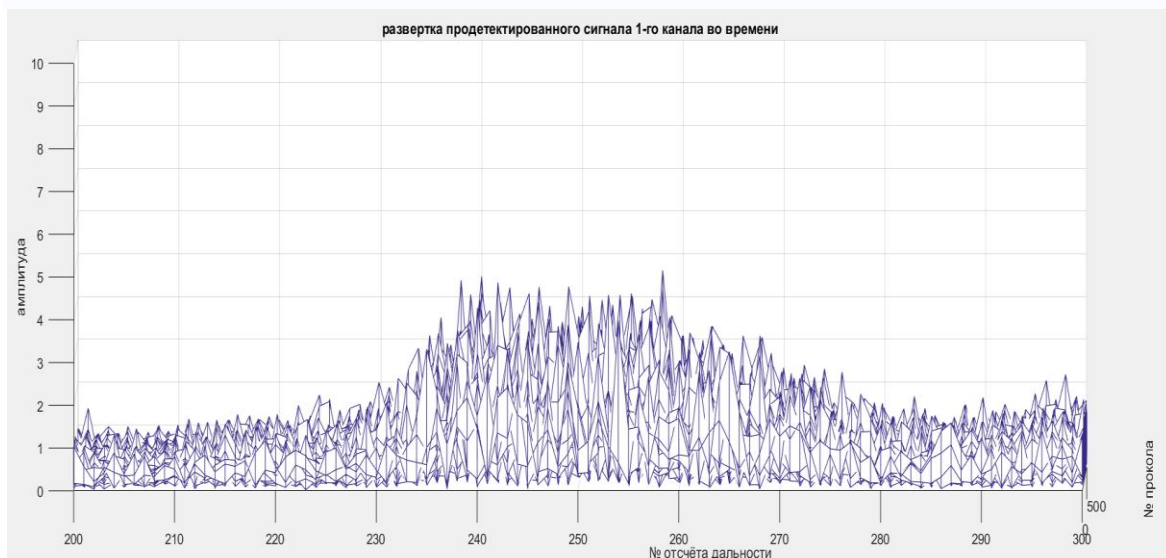


Рис.4. Пример ансамбля из 500 реализаций развертки во времени продетектированного сигнала 1-го канала (обрезанный, для выбранного диапазона)

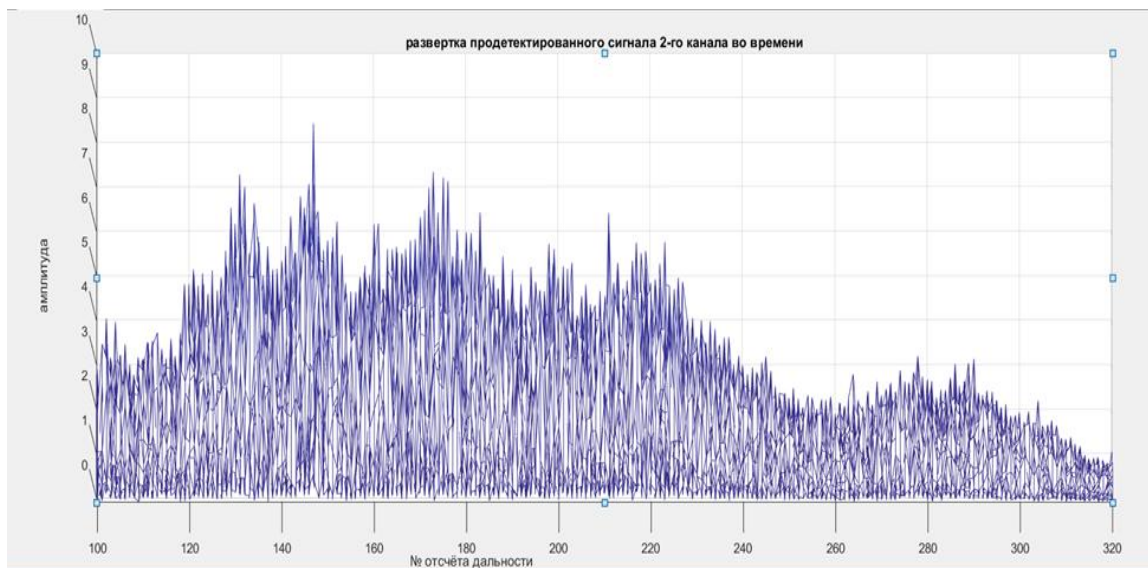


Рис.5. Пример ансамбля из 500 реализаций развертки во времени продетектированного сигнала 2-го канала (обрезанный, для выбранного диапазона)

На третьем этапе происходит анализ закона распределения амплитуд сигнала на отдельных дальностях. Основной скрипт не содержит внутри себя математические расчеты распределения, он лишь организует цикл по дальностям и вызывает специализированные функции, в которых проведена вся статистическая обработка.

Для каждой выбранной дальности основной скрипт выполняет вызов функции:

- `func_Raspred_1_v1/func_Raspred_2_v1` – функция, реализующая проверку релеевского распределения для 1-го/2-го канала;
- `AMP_mod_1` – матрица амплитуд загруженных данных;
- `Tdal_det` – номер столбца дальности, для которого выполняется проверка
- `N_per` – количество проколов

2.4 Алгоритм проверки гипотезы с использованием критерия хи-квадрат

Для проверки гипотезы о том, что распределение амплитуд на заданной дальности соответствует релеевскому закону, в разработанных функциях `func_Raspred_1_v1` и `func_Raspred_2_v1` используется хи-квадрат (χ^2). Критерий основан на сравнении эмпирической гистограммы распределения амплитуд с теоретической кривой релеевского распределения.

Алгоритм проверки включает следующие этапы:

- Извлечение выборки – извлечение вектора значений для заданной дальности.
- Построение эмпирической гистограммы – диапазон разбивается на интервалы, подсчитывается количество отчётов в каждом интервале.

- Расчет теоретических частот – по выборочному среднеквадратическому отклонению (СКО) оценивается параметр σ релеевского распределения.

$$\sigma = \frac{\text{СКО}}{\sqrt{2 - \frac{\pi}{2}}}$$

- Вычисление статистики хи-квадрат: $\chi^2 = \sum \frac{(Q-E)^2}{E}$
- Сравнение с критическим значением
- Принятие решения: $\chi^2 < \chi_{\text{крит}}$ – нулевая гипотеза о релеевском распределении принимается (функция выводит 1), $\chi^2 > \chi_{\text{крит}}$ – отвергается (функция выводит 0).

Благодаря тому, что статистическая обработка внесена в отдельные файлы, можно скрыть сложность вычислений от основного скрипта, из-за чего он становится более читабельным и лёгким для модификации. Его можно повторно использовать и легко модифицировать алгоритм проверки распределения без изменения основного скрипта.

Функции с статистической обработкой приведены в приложении 2 и 3.

2.5 Расчет высоты разрешаемого объёма

Следующим этапом для привязки полученных результатов статистического анализа к высоте был проведен расчет высоты центра разрешаемого объёма, в котором формируется отражённый сигнал. Расчет выполнялся по упрощенной формуле (см. формулу 19), без учета кривизны Земли и рефракции, поскольку для сравнительного анализа абсолютная погрешность не является критичной.

$$z = R * \sin(\beta) \quad (19)$$

Где R – наклонная дальность, β – угол места антенны.

2.6 Выводы по 2 главе

Во 2 главе описана методика экспериментального исследования, состоящая из разработки схемы регистрации сигнала, выбора массива исходных данных, реализации алгоритма статистической обработки в программе Matlab, с использованием проверки гипотезы о релеевском распределении с помощью критерия хи-квадрат, а также выполнения привязки полученных результатов к высоте.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУД СИГНАЛА ОТ СЛОИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ

3.1 Разделение данных по высотным слоям

В результате расчёта высоты центра разрешаемого объёма для анализируемых дальностей 1 канала был получен диапазон высот от 0,31 до 1,77 километров. А для 2 канала диапазон данных от 0,31 до 1,84 километров. Данные диапазоны охватывают нижнюю и среднюю тропосферу, где чаще всего наблюдаются слоистые образования.

Для анализа вертикальной структуры распределения амплитуд каждого диапазона высот для обоих каналов был разбит на 4 высотных слоя с шагом 500 метров.

Для каждого канала и высотного слоя было посчитано количество высот соответствующим функциям распределения, относящимся к релеевскому и нерелеевскому распределению.

Ниже приведены таблицы с количеством высот для каждого слоя:

Таблица 5 – Распределение количества дальностей по слоям для 1-го канала

Высота слоя	0-500	501- 1000	1001- 1500	1501- 2000
Релей	180	72	39	29
Не релей	45	11	13	2
Всего	225	83	52	31

Таблица 6 – Распределение количества дальностей по слоям для 2-го канала

Высота слоя	0-500	501- 1000	1001- 1500	1501- 2000
----------------	-------	--------------	---------------	---------------

Релей	122	49	128	46
Не релей	61	23	14	7
Всего	183	72	142	53

3.2 Построение гистограмм распределения

На основе данных из приведенных выше таблиц были построены гистограммы для каждого канала. Которые показывают распределение релеевских и нерелеевских дальностей по высотным слоям.

Параметры диаграмм:

- Ось X – высотные слои
- Ось Y – количество дальностей, попадающих в каждый слой.

Синим цветом выделены дальности с релеевским распределением, а оранжевым с нерелеевским распределением.

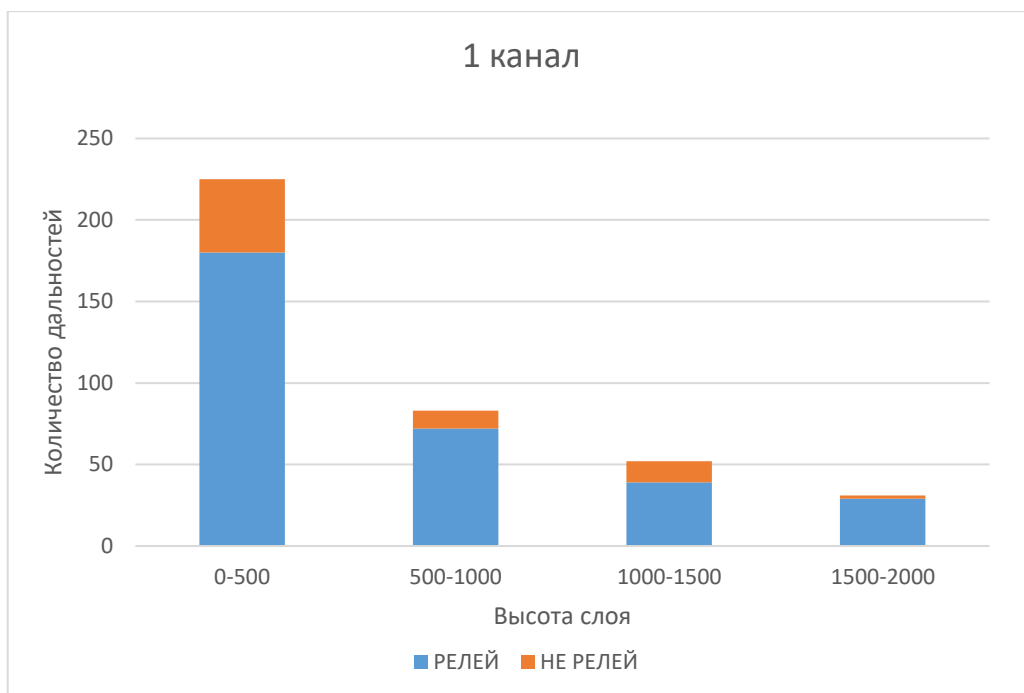


Рис.6 Распределение релейских и нерелейских дальностей по высотным слоям для 1-го канала

Из диаграммы наблюдаем, что нерелейское распределение присутствует во всех высотных слоях. Максимальное количество нерелейских дальностей наблюдается в нижнем слое 0-500 метров, это связано с большим количеством дальностей в данном слое. И минимальное значение в слое 1501-2000 метров. Для корректного сравнения в следующем пункте описан анализ доли нерелейских случаев, так как общее количество дальностей в слоях различается.

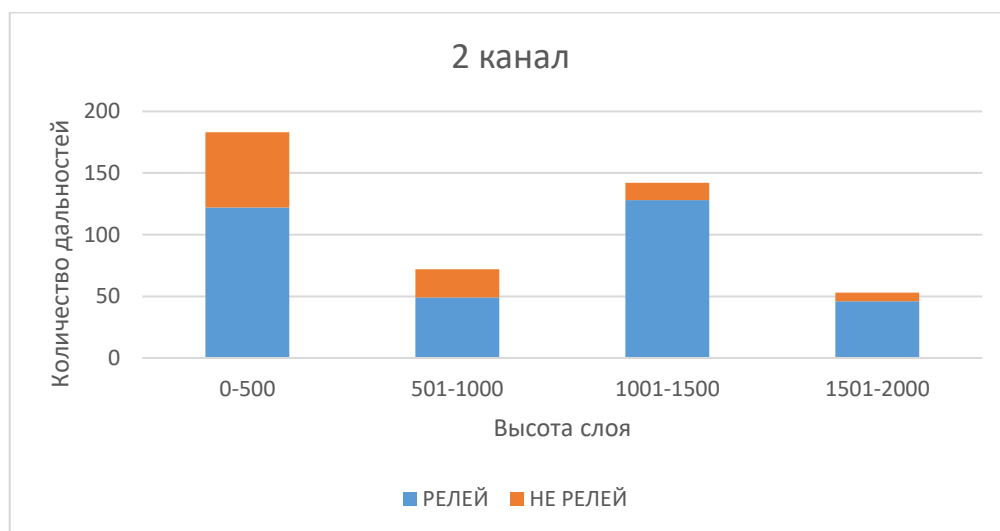


Рис. 7 Распределение релейских и нерелейских дальностей по высотным слоям для 2-го канала

На основе данного рисунка наблюдается присутствие нерелейских случаев во всех высотных слоях. Наибольшее количество нерелейских дальностей находится в слое 0-500 метров. И минимальное количество в слое 1501-2000 метров. Количество дальностей, относящихся к нерелейскому распределению во 2 канале намного больше, чем в 1. Для более точного и подробного анализа необходимо рассчитать долю нерелейских случаев, и это будет представлено в следующем пункте.

3.3 Расчёт доли нерелеевских случаев

Для построения итогового графика распределения была рассчитана доля нерелеевских случаев для каждого высотного слоя (см. формулу 20)

$$Q = \frac{N_{\text{нерел}}}{N_{\text{общ}}} * 100\% \quad (20)$$

Где:

Q — доля нерелеевских случаев;

$N_{\text{нерел}}$ — количество дальностей в слое, для которых распределение признано нерелеевским;

$N_{\text{общ}}$ - общее количество дальностей в слое.

На основе данных, представленных выше на рисунках 6 и 7, были рассчитаны доли нерелеевских случаев для обоих каналов. Полученные данные представлены в таблицах ниже:

Таблица 7 – Доля нерелеевских случаев по высотным слоям для 1-го канала

Высота слоя	0-500	501- 1000	1001- 1500	1501- 2000
Релей	180	72	39	29
Не релей	45	11	13	2
Доля не релея	20	13,3	25,0	6,5

Таблица 8 – доля нерелеевских случаев по высотным слоям для 2-го канала

Высота слоя	0-500	501- 1000	1001- 1500	1501- 2000
----------------	-------	--------------	---------------	---------------

Релей	122	49	128	46
Не релей	61	23	14	7
Доля не релея	33,3	31,9	9,9	13,2

3.4 Построение графиков зависимости нерелеевских случаев от высоты

Для анализа полученных результатов было определено положение нулевой изотермы на момент проведения эксперимента. Информация о вертикальном профиле температуры получена из архива данных радиозондирования Университета Вайоминга.

По данным радиозондирования, нулевая изотерма в день проведения эксперимента находилась на высоте 1349 метров. Это значение было отмечено на полученных графиках отношения нерелеевских случаев к общему значению случаев, которые представлены ниже на рисунках 8, 9 и 10:

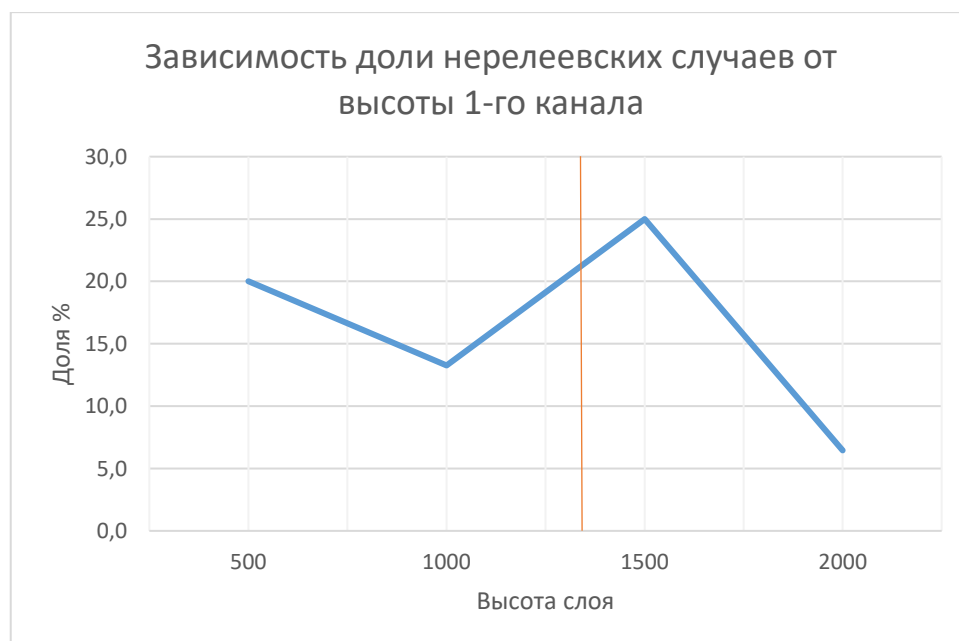


Рис. 8. Зависимость доли нерелеевских случаев от высоты 1-го канала

Анализ графика для первого канала выявляет ярко-выраженный максимум доли нерелеевских случаев (25%) в высотном слое 1001-1500 м, который совпадает с положением нулевой изотермы равной 1349 м.

Гипотеза дипломной работы заключалась в том, что для слоистой облачности закон распределения амплитуд эхо-сигналов не всегда является релеевским, а в зоне фазовых переходов (нулевой изотермы) наблюдается отклонение релеевского закона, что теоретически соответствует райсовскому.

Критерии подтверждения гипотезы:

1. Наличие максимума доли нерелеевских случаев в зоне нулевой изотермы – 25 % в слое 1001-1500 м.
2. Снижение доли нерелеевских случаев выше изотермы – 6,5 % в слое 1501-2000 м.
3. Снижение доли нерелеевских случаев ниже изотермы – 13,3 % в слое 500 – 1000 м.

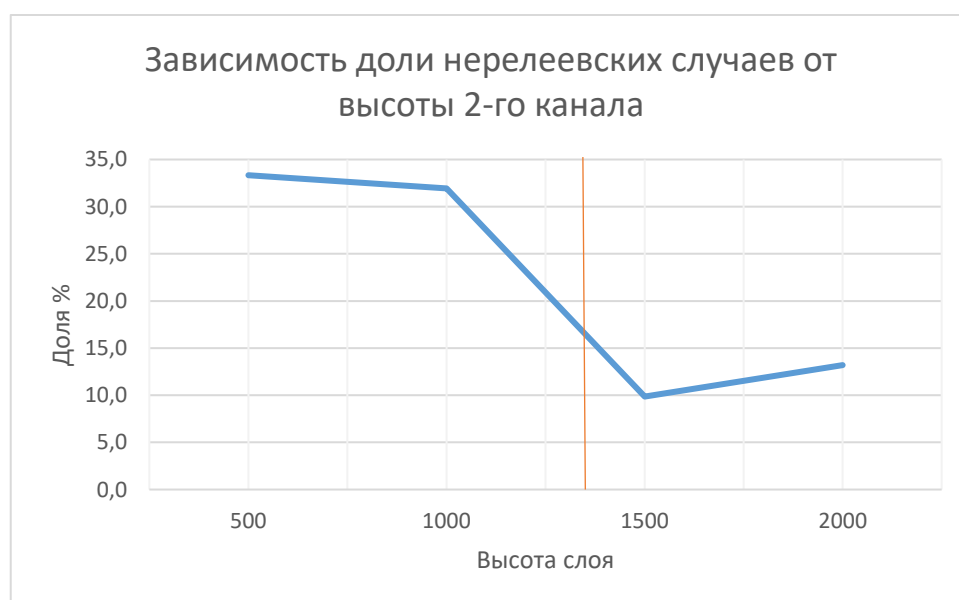


Рис.9. Зависимость доли нерелеевских случаев от высоты 2-го канала

По данному графику зависимости не наблюдается связи между долей нерелеевских случаев и положением нулевой изотермы. Так как в зоне нулевой изотермы доля нерелеевских случаев минимальна и равна 9,9 %.

А максимальные значения доли в нижних слоях. Это объясняется зависимостью рассеяния от длины волны: короткая волна (3 см) рассеивается на мелких частицах в 120 раз сильнее, чем длинная (10 см), что делает её чувствительнее к изменениям в зоне таяния. Кроме того, на длине волны 10 см когерентное отражение от границ зоны таяния проявляется слабее.

Ниже представлен совмещенный график для обоих каналов для наглядного сравнения двух каналов.

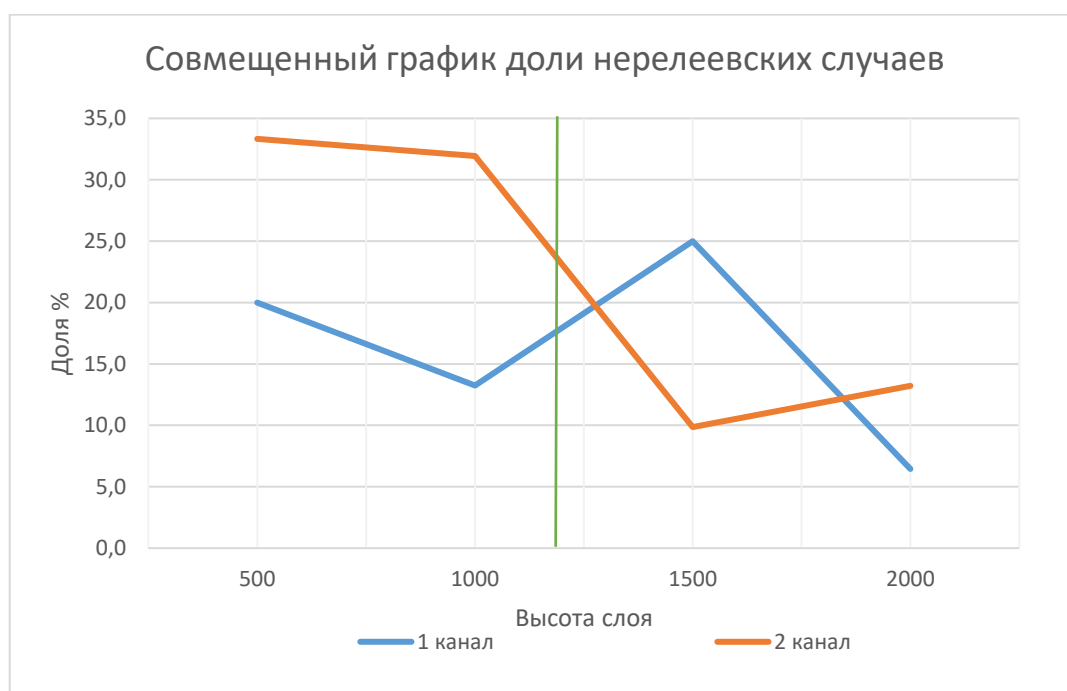


Рис. 10 Совмещенный график доли нерелеевских случаев для обоих каналов

Совмещенный график наглядно демонстрирует важное различие в поведении двух каналов МРЛ-5. По 1 каналу наблюдается чётко выраженный максимум доли нерелеевских случаев в слое 1001-1500 м, который содержит нулевую изотерму. Что свидетельствует об отвержении релеевского распределения и согласуется с предположением о райсовском распределении в данной области. Во 2 канале в этом же слое наблюдаются минимальные значения доли нерелеевских случаев, а максимальные значения приходятся на нижние слои. Это значит, что связи доли нерелеевских случаев с нулевой изотермой не обнаружено, что

объясняется маленькой чувствительностью 10-см волны к мелким частицам и большим разрешающим объёмом.

Следовательно, 1 канал является более информативным для обнаружения зоны таяния по статистическим характеристикам эхо-сигнала, в то время как 2 канал в силу своих физических и технических особенностей не позволяет выявить эту зону.

Заключение

В данной работе было проведено исследование закона распределения амплитуд сигнала от слоистой облачности, с использованием двухканального метеорологического радиолокатора МРЛ-5. Целью работы являлась проверка гипотезы о том, что для слоистой облачности распределение амплитуд не всегда соответствует релеевскому, а в зоне фазовых переходов (нулевой изотермы) наблюдается отклонение от релеевского закона (что теоретически соответствует райсовскому распределению).

В первой главе были рассмотрены физические механизмы формирования отражённого сигнала от слоистой облачности. Было установлено, что результирующее поле в точке приёма представляет собой суперпозицию когерентной составляющей и некогерентной. Интерференция этих компонент приводит к переходу релеевского распространения в райсовское. Наибольшие отклонения от релеевского закона ожидаются в зоне фазовых переходов. Рассмотрены основные математические модели распределения амплитуд и обосновано предположение о возможности описания сигналов от слоистой облачности райсовским распределением.

Во второй и третьей главах описана методика обработки полученных данных. Были использованы такие программы как: MATLAB (для извлечения выборок, проверки гипотезы с учетом критерия Пирсона) и Excel (для расчётов высоты центра разрешаемого объёма и построения графиков). Для анализа были использованы данные радиозондирования за 25 апреля 2022 года.

Результаты, полученные в ходе эксперимента:

Для 1-го канала (3 см) доля нерелеевских случаев по высоте имеет ярко выраженный немонотонный характер. В зоне нулевой изотермы наблюдается максимум – 25,0 %. Выше этой зоны, в ледяной фазе облака доля снижается до минимума в 6,5 %. Ниже изотермы, в капельной фазе, значение составляет

13,3 %. Такие данные показывают выраженное отклонение от релеевского распределения, этот результат не противоречит физической модели, согласно которой интерференция когерентной и некогерентной составляющих приводит к райсовскому распределению. Но для такого утверждения требуется дальнейшее исследование с прямой проверкой райсовской гипотезы.

Для 2-го канала (10 см) наблюдается противоположная тенденция. Доля нерелеевских случаев монотонно убывает с высотой, а в слое, содержащем нулевую изотерму, зафиксировано минимальное значение – 9,9 %. Такой результат не подтверждает выдвинутую гипотезу. Это объясняется двумя факторами: сильной зависимостью сечения рассеяния от длины волны, что делает её менее чувствительной мелким каплям воды; и большим разрешающим объёмом антенны.

Следовательно, экспериментальные данные согласуются с гипотезой об отклонении от релеевского распределения, и согласуется с предположением о райсовском распределении для 1-го (3 см) канала в зоне нулевой изотермы. Для 2-го канала такая связь не была обнаружена.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

```
clear all; % очистка рабочего пространства MATLAB
clc; % очистка командного окна

%В программе используется статистическая обработка продетектированного
%сигнала (проверка вида распределения амплитуд) для 2-х каналов
%Исходные данные
%Координаты
%дождь (Tcel)
%дождь 1 [7773 10320], дождь 2 [16260 17900]
%дождь (Tcel)
%T = 2*2^16; %2^14=16384, 2^15=32768, 2^16=65536
%T = 2^10; %кол-во отсчетов в одном проколе
fd = 80*10^6; %Частота дискретизации (80 МГц)
Td = 1/fd; %интервал дискретизации
%%1 Чтение данных 1-го канала
filename1 = 'LAn10_12USB_PG_010(1 и 2
кан_500проколов_33000отсч_аз272_ум_1.8_д30-50км)_det_1.txt';
[AMP_mod_1,delimiterOut]=importdata(filename1);
% Чтение данных 2-го канала
filename2 = 'LAn10_12USB_PG_010(1 и 2
кан_500проколов_33000отсч_аз272_ум_1.8_д30-50км)_det_2.txt';
[AMP_mod_2,delimiterOut]=importdata(filename2);
N_per = size(AMP_mod_1,1); %количество проколов
%%2 Построение разверток сигнала 1-го и 2-го каналов
figure(101)% развертка сигнала 1-го канала по дальности Tdal_det
mesh(AMP_mod_1);
title('развертка продетектированного сигнала 1-го канала во времени');% Подпись
графика
xlabel('№ отсчёта дальности');% Подпись оси x графика
```

```

ylabel('№ прокола');% Подпись оси y графика
xlabel('амплитуда');% Подпись оси x графика
figure(201) % развертка сигнала 2-го канала по дальности
mesh(AMP_mod_2);
title('развертка продетектированного сигнала 2-го канала во времени');% Подпись
графика
xlabel('№ отсчёта дальности');% Подпись оси x графикар
ylabel('№ прокола');% Подпись оси y графика
xlabel('амплитуда');% Подпись оси x графика
3_выбор дискрета на дальности Tdal_det_x (x - номер канала) для
детектированного сигнала и формирования вектора
значений сигнала с этой дальности
для 1-го канала для одной дальности
Tdal_det_1 = 240;
func_Raspred_1_v1( AMP_mod_1, Tdal_det_1, N_per )
для 1-го канала для интервала дальностей [Tdal_det_1; Tdal_det_1+Nmaxi-1]
Tdal_det=240;
Tdal_det_1 = Tdal_det;
Nmaxi1 = 21; % количество точек дальности для анализа
for n = 1:1:Nmaxi1
func_Raspred_1_v1( AMP_mod_1, Tdal_det_1, N_per );
Stat_01(n) = func_Raspred_1_v1( AMP_mod_1, Tdal_det_1, N_per );
Tdal_det_11(n) = Tdal_det_1;
Tdal_det_1 = Tdal_det_1+1;
end
для 2-го канала для одной дальности
Tdal_det_2 = 380;
func_Raspred_1_v1( AMP_mod_1, Tdal_det_1, N_per )
для 1-го канала для интервала дальностей [Tdal_det_1; Tdal_det_1+Nmaxi-1]
Tdal_det_2 = Tdal_det;

```

```

Nmaxi2 = Nmaxi1; % количество точек дальности для анализа
for n = 1:1:Nmaxi2
func_Raspred_2_v1( AMP_mod_2, Tdal_det_2, N_per );
Stat_02(n) = func_Raspred_2_v1( AMP_mod_2, Tdal_det_2, N_per );
Tdal_det_22(n) = Tdal_det_2;
Tdal_det_2 = Tdal_det_2+1;
end
Stat=[Tdal_det_11; Tdal_det_22; Stat_01; Stat_02]; %сводная статистика

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

```
function [ gipoteza1 ] = func_Raspred_1_v1( AMP_mod_1, Tdal_det_1 , N_per)
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
y1 = 1;
    for n = 1:1:N_per
        AMP_Tdal_det_1(y1) = AMP_mod_1(n,Tdal_det_1);
        n = n+1;
        y1 = y1+1;
    end
%AMP_Tdal_det = AMP_Tdal_det(:);
AMP_Tdal_det_1(1)=AMP_Tdal_det_1(2);
viborka_1=AMP_Tdal_det_1';

%% 6.1_стат. обработка для 1-го канала
%Построение распределения для 1-го канала
nbins = 10; %количество интервалов для построения гистограммы
% figure(103)
% hist(AMP_Tdal_det_1,nbins)
% %hist(AMP_Tdal_det(:,Ns/2),nbins)

%Нахождение числовых характеристик распределения для 1-го канала
mo_1 = mean(AMP_Tdal_det_1.');
SKO_1 = std(AMP_Tdal_det_1.');
K_1 = std(AMP_Tdal_det_1.)/mean(AMP_Tdal_det_1. ');
Stat_1 = [mo_1 SKO_1 K_1];
% Stat_1

raspred_1 = zeros(1,nbins);
```

```

Max_1=max(AMP_Tdal_det_1);
Min_1=min(AMP_Tdal_det_1);
delta_1=(Max_1-Min_1)/nbins;

for n = 1:1:N_per
    for k = 1:1:nbins
        if (Min_1+delta_1*(k-1)) < AMP_Tdal_det_1(n) && AMP_Tdal_det_1(n) <=
            (Min_1+delta_1*k)
            raspred_1(k) = raspred_1(k)+1;
        end
    end
end

raspred_1(1)=raspred_1(1)+1; %добавление в первый интервал 1 (включение
левого края интервала)

%raspred_norm = raspred./(N_per*delta);

%% Теоритическое распределение Релея для 1-го канала
%p1=Min:(Max-Min)/500:Max-(Max-Min)/500;
p1=Min_1+delta_1/2:delta_1:(Min_1+delta_1/2)+(nbins-1)*delta_1;
sigma_2_1=SKO_1/((2-0.5*pi)^0.5);
f_rel_teor_1 = (N_per*delta_1)*(p1./(sigma_2_1^2)).*exp(-
(p1.^2)/(2*sigma_2_1^2));

% %Построение теоритического распределения Релея для 1-го канала
% figure(104);% Создаем новое окно
% plot(p1,f_rel_teor_1);% развертка сигнала во времени
% axis([0 1.1*Max_1 0 1.1*max(f_rel_teor_1)]); % axis([XMIN XMAX YMIN
YMAX])
% title('теоритическая плотность распределения Релея с заданной sigma для 1-го
канала');% Подпись графика
% xlabel('значение случайной величины');% Подпись оси x графика

```

```

% ylabel('плотность распределения');% Подпись оси y графика

% %Построение экспериментального распределения для 1-го канала
% figure(105);% Создаем новое окно
% plot(p1,raspred_1);% развертка сигнала во времени
% axis([0 1.1*Max_1 0 1.1*max(raspred_1)]); % axis([XMIN XMAX YMIN YMAX])
% title('экспериментальная плотность распределения Релея с заданной sigma для 1-го канала');% Подпись графика
% xlabel('значение случайной величины');% Подпись оси x графика
% ylabel('плотность распределения');% Подпись оси y графика

hi_1=0;
for n = 1:1:size(raspred_1,1)
    hi_1=hi_1+(((raspred_1(n)-f_rel_teor_1(n))^2)/f_rel_teor_1(n));
end

%% 7_Формирование выходных векторов со статистикой
n1 = 1:1:nbins;
Statistica_1=[p1; raspred_1; f_rel_teor_1; n1];
%объединение интервалов, если количество в интервале меньше 5

%для 1-го канала
Statistica_11=Statistica_1;
for n = 1:1:nbins
    if (Statistica_11(2, nbins+1-n) < 5 || Statistica_11(3, nbins+1-n) < 5)
        Statistica_11(2, nbins-n)=Statistica_11(2, nbins-n)+Statistica_11(2, nbins-n+1);
        Statistica_11(3, nbins-n)=Statistica_11(3, nbins-n)+Statistica_11(3, nbins-n+1);
        Statistica_11(:, nbins-n+1)=0;
    end
end

```

```

end
j1= max(Statistica_11(4, :));

Statistica_1_done=zeros(3,j1);
for n = 1:1:j1
    for n1 = 1:1:3
        Statistica_1_done(n1,n)=Statistica_11(n1,n);
        n1=n1+1;
    end
    n=n+1;
end

%проверка по критерию хи-квадрат для 1-го канала
hi_1=0;
for n = 1:1:size(Statistica_1_done',1)
    hi_1=hi_1+(((Statistica_1_done(2, n)-Statistica_1_done(3,
n))^2)/Statistica_1_done(3, n));
end
% hi_1
%задание вектора критических значений распределения хи-квадрат с уровнем
%значимости alpha = 0.05
hi_crit=[3.84146, 5.99146, 7.81473, 9.48773, 11.0705, 12.59159, 14.06714,
15.50731, 16.91898, 18.30704, 19.67514, 21.02607, 22.36203, 23.68479, 24.99579];

if hi_1 < hi_crit(j1)
    gipoteza1=1;
else
    gipoteza1=0;
end
end

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

```
function [ gipoteza2 ] = func_Raspred_2_v1( AMP_mod_2, Tdal_det_2 , N_per)
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
y1 = 1;
    for n = 1:1:N_per
        AMP_Tdal_det_2(y1) = AMP_mod_2(n,Tdal_det_2);
        n = n+1;
        y1 = y1+1;
    end
%AMP_Tdal_det = AMP_Tdal_det(:);
AMP_Tdal_det_2(1)=AMP_Tdal_det_2(2);
viborka_1=AMP_Tdal_det_2';

%% 6.1_стат. обработка для 1-го канала
%Построение распределения для 1-го канала
nbins = 10; %количество интервалов для построения гистограммы
% figure(103)
% hist(AMP_Tdal_det_1,nbins)
% %hist(AMP_Tdal_det(:,Ns/2),nbins)

%Нахождение числовых характеристик распределения для 1-го канала
mo_2 = mean(AMP_Tdal_det_2.');
SKO_2 = std(AMP_Tdal_det_2.');
K_2 = std(AMP_Tdal_det_2.)/mean(AMP_Tdal_det_2. ');
Stat_2 = [mo_2 SKO_2 K_2];
% Stat_1

raspred_2 = zeros(1,nbins);
Max_2=max(AMP_Tdal_det_2);
```

```

Min_2=min(AMP_Tdal_det_2);
delta_2=(Max_2-Min_2)/nbins;

for n = 1:1:N_per
    for k = 1:1:nbins
        if (Min_2+delta_2*(k-1)) < AMP_Tdal_det_2(n) && AMP_Tdal_det_2(n) <=
            (Min_2+delta_2*k)
            raspred_2(k) = raspred_2(k)+1;
        end
    end
    % raspred_1(1)=raspred_1(1)+1;
end
%raspred_1(1)=raspred_1(1)+1; %добавление в первый интервал 1 (включение
левого края интервала)
%raspred_norm = raspred./(N_per*delta);

%% Теоритическое распределение Релея для 1-го канала
%p1=Min:(Max-Min)/500:Max-(Max-Min)/500;
p2=Min_2+delta_2/2:delta_2:(Min_2+delta_2/2)+(nbins-1)*delta_2;
sigma_2_1=SKO_2/((2-0.5*pi)^0.5);
f_rel_teor_2 = (N_per*delta_2)*(p2./(sigma_2_1^2)).*exp(-
(p2.^2)/(2*sigma_2_1^2));

% %Построение теоритического распределения Релея для 1-го канала
% figure(104);% Создаем новое окно
% plot(p1,f_rel_teor_1);% развертка сигнала во времени
% axis([0 1.1*Max_1 0 1.1*max(f_rel_teor_1)]); % axis([XMIN XMAX YMIN
YMAX])
% title('теоритическая плотность распределения Релея с заданной sigma для 1-го
канала');% Подпись графика
% xlabel('значение случайной величины');% Подпись оси x графика

```

```

% ylabel('плотность распределения');% Подпись оси y графика

% %Построение экспериментального распределения для 1-го канала
% figure(105);% Создаем новое окно
% plot(p1,raspred_1);% развертка сигнала во времени
% axis([0 1.1*Max_1 0 1.1*max(raspred_1)]); % axis([XMIN XMAX YMIN YMAX])
% title('экспериментальная плотность распределения Релея с заданной sigma для 1-го канала');% Подпись графика
% xlabel('значение случайной величины');% Подпись оси x графика
% ylabel('плотность распределения');% Подпись оси y графика

hi_2=0;
for n = 1:1:size(raspred_2',1)
    hi_2=hi_2+(((raspred_2(n)-f_rel_teor_2(n))^2)/f_rel_teor_2(n));
end

%% 7_Формирование выходных векторов со статистикой
n2 = 1:1:nbins;
Statistica_2=[p2; raspred_2; f_rel_teor_2; n2];

%объединение интервалов, если количество в интервале меньше 5

%для 1-го канала
Statistica_22=Statistica_2;
for n = 1:1:nbins
    if (Statistica_22(2, nbins+1-n) < 5 || Statistica_22(3, nbins+1-n) < 5)
        Statistica_22(2, nbins-n)=Statistica_22(2, nbins-n)+Statistica_22(2, nbins-n+1);
        Statistica_22(3, nbins-n)=Statistica_22(3, nbins-n)+Statistica_22(3, nbins-n+1);
        Statistica_22(:, nbins-n+1)=0;
    end
end

```

```

    end
end
j2= max(Statistica_22(4, :));

Statistica_2_done=zeros(3,j2);
for n = 1:1:j2
    for n2 = 1:1:3
        Statistica_2_done(n2,n)=Statistica_22(n2,n);
        n2=n2+1;
    end
    n=n+1;
end
%проверка по критерию хи-квадрат для 1-го канала
hi_2=0;
for n = 1:1:size(Statistica_2_done',1)
    hi_2=hi_2+(((Statistica_2_done(2, n)-Statistica_2_done(3,
n))^2)/Statistica_2_done(3, n));
end
% hi_2
%задание вектора критических значений распределения хи-квадрат с уровнем
%значимости alpha = 0.05
hi_crit=[3.84146, 5.99146, 7.81473, 9.48773, 11.0705, 12.59159, 14.06714,
15.50731, 16.91898, 18.30704, 19.67514, 21.02607, 22.36203, 23.68479, 24.99579];
if hi_2 < hi_crit(j2)
    gipoteza2=1;
else
    gipoteza2=0;
end
end
end

```

Список литературы

1. Горелик, А. Г. Распределение флуктуаций огибающей при обратном рассеянии простого радиоимпульса на частицах разреженных сред / А. Г. Горелик, Д. А. Денисенков, С. Ф. Коломиец // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2017. — Т. 20, № 6. — С.164-172.
2. Горелик, А. Г. Исследование микроструктуры рассеивающей среды при многоволновом зондировании / А. Г. Горелик, С. Ф. Коломиец // Распространение радиоволн: труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции, Казань, 1–6 июля 2019 года. — Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2019. — С. 286-289.
3. Charles A. Knight, L. Jay Miller. Early Radar Echoes from Small, Warm Cumulus: Bragg and Hydrometeor Scattering /National Center for Atmospheric Research,* Boulder, Colorado (Manuscript received 6 August 1997, in final form 9 January 1998)
4. Денисенков, Д. А. Экспериментальные радиолокационные исследования распределения амплитуды отражений от метеообразований / Д. А. Денисенков, В. Ю. Жуков, Г. Г. Щукин // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. — 2022. — № S685. — С.92-99.
5. Денисенков, Д. А. О распределении амплитуды радиолокационных отражений от дождевых облаков / Д. А. Денисенков, В. Ю. Жуков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. — 2022. — № 3 (51). — С. 5–11.
6. В.Ю.Жуков, Современные проблемы метеорологической радиолокации / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т.61, № 10. – С. 927-939.
7. Исследование статистических характеристик эхо-сигнала от метеообразований / В.Ю.Жуков, Д.А.Денисенков // Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского (Санкт-Петербург). — Санкт-Петербург: [б. и., б/г].

8. О распределении отражений от различных видов осадков / Д.А.Денисенков, В.Ю.Жуков // Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского (Санкт-Петербург). — Санкт-Петербург: [б. и., б/г].
9. Боровиков, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / В.А. Боровиков – М : Горячая линия – Телеком, 2019. – 270 с.
10. Горелик, А.Г. Простые радиолокационные критерии применимости классической модели рассеяния в разреженных средах / А.Г. Горелик, С.Ф. Коломиец // VIII Всероссийские Армандовские чтения. Материалы Всероссийской научной конференции. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. – С. 164–169.
11. Исследование распределения плотности вероятности отражений от осадков на базе радиолокатора МРЛ-5 / В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн, Муром, 28–30 мая 2019 года. – Муром: Муромский институт (филиал) Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых", 2019. – С. 285-290.
12. Касьянов В.А. Метеорологические радиолокационные станции и их применение / В.А. Касьянов, В.П. Самохвалов. – Л : Гидрометеиздат, 1984. – 215 с.
13. Скаляр, Дж. Радиолокационные отражения от наземных объектов / Дж. Скаляр, К. Уоттс. – М : Изд-во иностранной литературы, 1956. – 280 с.
14. Ахметов. А.С Физика радарного зондирования облаков / А.С. Ахметов. – Томск : Изд-во НТЛ, 2014. – 312 с.
15. Wyoming Weather Web // University of Wyoming. – URL: <https://weather.uwyo.edu/upperair/> (дата обращения: 26.05.2026).