



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)

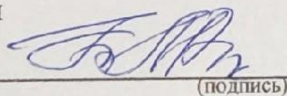
На тему: «Исследование закона распределения амплитуды сигнала,
отраженного от кучевой облачности»

Исполнитель Курова Вера Дмитриевна
(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.....	3
Теоретическая часть	6
1.1 Современное состояние исследований в метеорологической радиолокации	6
1.2 Схема метеорологического радиолокатора МРЛ-5.....	8
1.3 Процесс сбора и анализа радиолокационных данных:	10
1.4 Теоретические основы критерия согласия Пирсона	11
Практическая часть	14
2.1 Сбор и первичная обработка данных.....	14
2.2 Принцип работы кода	16
2.3 Пример применения:	17
2.4 Описание кода	20
2.5 Получение и описание таблиц с 0 и 1	26
2.6 Описание полученных гистограмм и графиков	30
Вывод	38
Список литературы	41
Приложение	43

Введение

Современные радиолокационные методы в основном опираются на прямые измерения мощности отраженного сигнала. Хотя этот подход позволяет получить простые и непосредственные, но не всегда точные метеорологические оценки, он широко применяется для определения интенсивности осадков и их количества, а также для краткосрочного прогнозирования погоды. Данные методы сейчас носят скорее наблюдательный и приблизительный характер.

Большие объёмы информации, поступающие с радаров, открывают возможности для улучшения существующих и создания передовых методов анализа. Ярким примером служат успехи в применении спектральных параметров радиосигнала, которые обеспечивают надёжный количественный анализ даже в тех условиях, где традиционные подходы бессильны. Это способно значительно повысить прогностическую точность и расширить понимание физики атмосферы. Однако разработка таких технологий — ресурсоёмкий процесс, включающий как сложную обработку данных, так и формирование новой теоретической базы. Основой для этого служат точные и актуальные данные о микроструктуре объектов рассеяния. Поскольку эта характеристика крайне нестабильна во времени и пространстве и сильно зависит от угла обзора, опора на усреднённые или предустановленные модели приводит к существенным ошибкам и неоправданно широким диапазонам неопределённости.

Таким образом, отсутствие на данный момент действенных инструментов для быстрой оценки микроструктуры делает задачу получения достоверных оперативных измерений одной из наиболее актуальных и сложных, стоящих перед исследователями.

В современных алгоритмах обработки данных метеорологических радаров в качестве базовой гипотезы принимается нормальность распределения отражённого сигнала. Данное допущение опирается на центральную предельную теорему, так как итоговый сигнал формируется путем суперпозиции множества независимых эхо-сигналов от дискретных частиц в элементе разрешения локатора. Тем не менее, ряд ранних экспериментальных исследований в области радиометеорологии ставит под вопрос универсальность этой модели. В частности, сомнения возникают при анализе гистограмм амплитуды сигнала после его обработки логарифмическим приемником, где фиксируется наличие отрицательной асимметрии. Несмотря на то, что эти эмпирические данные заслуживают внимания, делать окончательные выводы о характеристиках исходного стохастического процесса исключительно по результатам нелинейной обработки (такой как логарифмирование и последующее детектирование) представляется методологически преждевременным.

Разрешение сложившейся проблемы требует проведения экспериментальных исследований с применением современного оборудования, которое не было доступно исследователям прошлого века. Современные когерентные доплеровские радары теоретически позволяют анализировать непосредственно распределение самого сигнала, а не только его огибающей. Однако в рамках данной работы доступ к таким системам отсутствовал, что обусловило необходимость использования альтернативного технологического преимущества — применения высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с большой разрядностью. Данный подход обеспечил возможность получения точных цифровых оценок амплитуды сигнала. По своему качеству такая оцифровка эквивалентна идеальному детектированию, поскольку позволяет избежать дополнительных искажений, неизбежно вносимых физическими детекторами.

Целью исследования является выявление статистических характеристик отраженного сигнала, что позволит улучшить методы обработки данных и повысить точность метеорологических прогнозов. Проблема заключается в недостаточном понимании влияния облачной структуры на параметры отраженного сигнала, что требует более детального анализа и моделирования.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности систем удаленного зондирования атмосферы, что особенно важно в условиях изменения климата и увеличения частоты экстремальных погодных явлений.

Для достижения поставленной цели в рамках работы выделены три основные задачи:

Во-первых, провести моделирование процесса отражения сигнала от облачности и составить библиотеку данных.

Во-вторых, проанализировать полученные данные и выявить закономерности распределения амплитуды.

В-третьих, визуализировать результаты в виде графиков, таблиц и гистограмм для наглядного представления статистики.

Теоретическая часть

1.1 Современное состояние исследований в метеорологической радиолокации

Классические методы обработки данных, используемые в радиолокационной метеорологии со времён её появления, были основаны на информации от стандартных радиолокаторов. Стоит отметить, что базовые методики, включая основное уравнение радиолокации, были сформулированы до Второй мировой войны и демонстрируют удивительную стабильность, оставаясь частью современных алгоритмов.

Дальнейшее развитие теории привело к созданию модели Керра и Райса, которая является развитием рэлеевского приближения. Её суть состоит в новом взгляде на рассеивающий объект: концепция элементарного объёма трансформировалась из кубической в слоистую. Практическим подтверждением корректности данного подхода послужил анализ данных, собранных во время зондирования интенсивных метеоявлений и облаков с помощью пассивных маркеров на десятисантиметровой длине волны.

Использование экспоненциального закона для описания флуктуаций мощности сигнала создало прямую параллель с классической рэлеевской моделью, описывающей колебания интенсивности. Этот метод имеет строгое математическое обоснование: если мгновенная амплитуда (A) подчиняется распределению Рэля, то мгновенная мощность (P), которая пропорциональна квадрату амплитуды ($P \sim A^2$), будет распределена по экспоненциальному закону со средним значением (формула 1).

$$w(P) = \frac{1}{\langle P \rangle} \exp \left(- \frac{P}{\langle P \rangle} \right) \quad (1)$$

где P — средняя мощность сигнала.

Данная математическая эквивалентность позволила установить прочную связь между традиционной теорией рассеяния и моделями зондирования гидрометеоров. Ещё в конце 1940-х годов Д. Е. Керр выдвинул гипотезу о том, что ансамбли дождевых капель и ледяных частиц функционируют как «облако вибраторов», что впоследствии нашло подтверждение в экспериментальных исследованиях. Важно отметить, что сами физические принципы когерентного рассеяния от совокупности случайно расположенных и движущихся объектов были изначально сформулированы лордом Рэлеем для молекул газа. Следовательно, распространение этих фундаментальных принципов на случай макроскопических отражателей при обратном рассеянии узкополосных когерентных импульсов является ключевым теоретическим достижением радиолокационной метеорологии.

Хотя простота является главным достоинством рэлеевской модели, именно она скрывает внутреннее противоречие, мешающее созданию логически завершённой теории. Практика оптических исследований свидетельствует о том, что выход из подобных тупиков лежит через проведение строго контролируемых экспериментов. Применительно к радиолокации сложность заключается в невозможности управлять физическими характеристиками исследуемого объёма атмосферы. Тем не менее, развитие аналитических методик открывает перспективу решения этой проблемы. Оно даёт надежду на извлечение ценных сведений о среде из стандартного массива данных, собираемого действующими метеорологическими радарными по всему миру, без необходимости проведения специальных лабораторных тестов.

1.2 Схема метеорологического радиолокатора МРЛ-5

Чтобы исследовать, как распределяется амплитуда сигнала на выходе приемника метеорологического радиолокатора МРЛ-5, создали новую схему для сбора данных, которая представлена на рисунке 1.

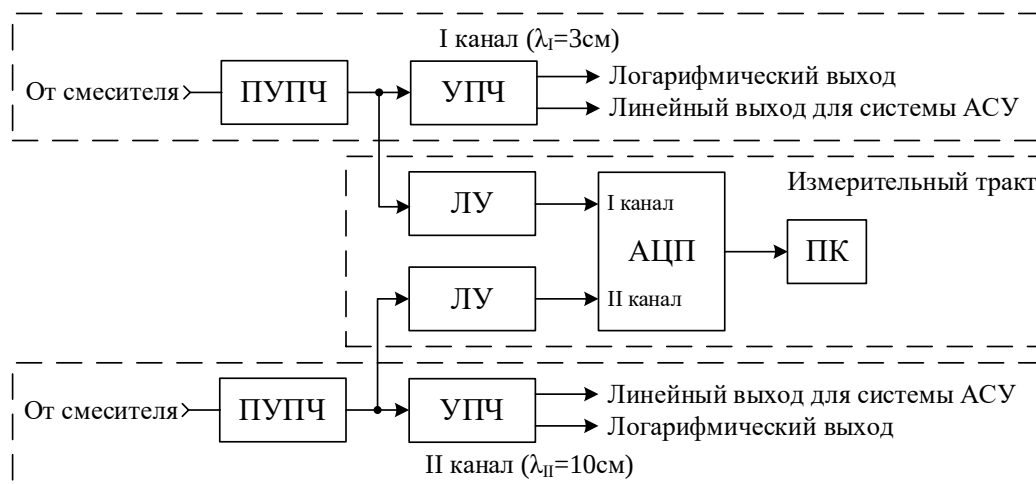


Рис.1. Структурная схема измерительного тракта для оценки закона распределения амплитуды отражений от метеоцели для радиолокатора МРЛ-5.

ПУПЧ – предварительный усилитель промежуточной частоты;

ЛУ – линейный усилитель;

УПЧ – усилитель промежуточной частоты;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ПК – компьютер.

Ключевой особенностью реализованной схемы было то, что она являлась щадящей по отношению к оборудованию, позволяя проводить измерения без модификации радара и сохраняя его работоспособность для выполнения основных задач. Сбор требуемых параметров осуществлялся параллельно по

отдельному, более точному каналу, ключевым элементом которого являлся высокоскоростной АЦП.

Такой подход обеспечил бесперебойную работу МРЛ-5 по прямому назначению — детектированию осадков. Применение специализированного 12-разрядного АЦП с частотой дискретизации 80 МГц позволило вести синхронную запись сигнала на двух частотах (3 и 10 см).

В рамках исследования была проведена обработка 78 выборок эхо-сигналов от метеообразований, зафиксированных 6 августа 2022 года. Для минимизации влияния местных помех и объектов в анализ включались только те отражения, дальность до которых превышала 20 километров.

1.3 Процесс сбора и анализа радиолокационных данных:

Процесс сбора данных был синхронизирован с моментом излучения зондирующего импульса. Для каждого отдельного импульса производилась регистрация 65 500 дискретных отсчётов отражённого сигнала.

Экспериментальная серия включала в себя 500 последовательных импульсов, следующих с периодом 2 мс (что соответствует частоте повторения 500 Гц).

В совокупности это позволило сформировать единый массив данных, перекрывающий дистанцию от нуля до 122 км.

Последующая цифровая обработка на ЭВМ имитировала работу идеального линейного детектора.

На первом этапе выполнялся перенос спектра сигнала в низкочастотную область путём комплексного смещения: исходные данные умножались на гармонические колебания с частотой, равной промежуточной ($\omega_{\text{пр}} = 30$ МГц), — отдельно на синус (Sin) и косинус (Cos).

Затем полученные компоненты подвергались усреднению по интервалу, равному длительности зондирующего импульса (1 мкс), что позволяло выделить их низкочастотные составляющие.

Финальным шагом являлось вычисление огибающей (модуля) сигнала для каждой временной метки в соответствии с формулой (2).

$$S_i = \sqrt{S_{\sin i}^2 + S_{\cos i}^2} \quad (2)$$

Статистический анализ полученных данных выполнялся отдельно для каждого канала по многоступенчатому алгоритму.

Первоначально из набора в 500 временных срезов выделялась область, соответствующая метеообразованию, и фиксировался отсчёт дальности (N_d) с экстремальным значением сигнала.

Далее для этой дальности извлекалась последовательность из 500 амплитудных отсчётов, образуя выборку для анализа. Распределение этих значений визуализировалось с помощью гистограммы, для которой рассчитывались математическое ожидание (m) и дисперсия (σ^2). Чтобы подтвердить соответствие экспериментальных данных теоретической модели, применялся критерий согласия Пирсона для проверки гипотезы о рэлеевском законе распределения амплитуды.

1.4 Теоретические основы критерия согласия Пирсона

Критерий согласия Пирсона χ^2 — это классический статистический тест, который применяется для проверки гипотезы о распределении случайной величины. Его используют, когда нужно сравнить теоретическое распределение с экспериментально наблюдаемыми данными.

Пусть у нас есть выборка объемом N , разбитая на K интервалов. Мы хотим проверить, подчиняется ли она заданному закону (нормальному, равномерному и т.п.). Гипотеза выглядит так:

H_0 : Данные соответствуют выбранному распределению.

H_a : Распределение отличается от ожидаемого.

Вычисляется статистика теста:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (3)$$

где

O_i — число наблюдений в i -м классе,

E_i — ожидаемое число (рассчитанное по теории).

Критерии принятия решений

Полученная величина сравнивается с критическим значением

$\chi_{\alpha, k}^2$

Из таблицы распределения Пирсона. Число степеней свободы рассчитывается во формуле (4)

$$k = K - p - 1 \quad (4)$$

Здесь p — число оцениваемых параметров (среднее, дисперсия и т. д.).

Если $\chi^2 < \chi_{\alpha}^2$, гипотезу принимают.

Если $\chi^2 > \chi_{\alpha}^2$, гипотезу отвергают.

Преимущества метода:

1. Простота расчета.
2. Универсальность — подходит для любых непрерывных и дискретных распределений.
3. Высокая чувствительность к отклонениям в хвостах распределения.

Практическая часть

2.1 Сбор и первичная обработка данных

Для проведения исследования была сформирована экспериментальная выборка, представляющая собой библиотеку данных объёмом 78 файлов.

Пример одного из файлов данной библиотеки проиллюстрирован на Рис. 2.



Рис.2. Пример одного из файлов содержащего результаты зондирования

Первичный анализ показал, что из-за значительного объёма информации и машинно-ориентированного формата её обработка в ручном режиме практически невозможна.

С целью обеспечения воспроизводимости результатов и автоматизации аналитических процедур был разработан и реализован алгоритм обработки данных. Программная реализация данного алгоритма выполнена в виде скрипта в среде MATLAB. Данный код обеспечивает автоматизированный парсинг файлов, предобработку данных и их приведение к виду, пригодному для дальнейшего статистического анализа и построения моделей.

MATLAB (сокращение от MATrix LABoratory — «матричная лаборатория») представляет собой высокоуровневый язык программирования и интерактивную среду для научно-технических вычислений, разработанную компанией MathWorks. Принцип её работы строится на концепции «матрицы как фундаментального элемента данных».

Ядро системы: матрично-векторные вычисления

В отличие от традиционных языков, в MATLAB любая операция трактуется как работа с матрицами. Скаляры рассматриваются как матрицы 1×1 .

Благодаря этому обеспечивается высокая производительность и лаконичность кода.

Основные компоненты ядра:

Матричные операции: умножение, транспонирование, обращение.

Линейная алгебра: решение систем уравнений, спектральный анализ.

Функциональный подход: поддержка рекурсии, анонимных функций.

Интерактивная среда и рабочий процесс

MATLAB построен вокруг рабочей сессии. Все переменные хранятся в оперативной памяти и доступны в любой момент.

Command Window: интерактивный режим для быстрых экспериментов.

Editor: создание и отладка М-файлов.

Workspace Browser: просмотр текущих переменных и их свойств.

Библиотечная экосистема

Система включает сотни специализированных пакетов:

Signal Processing Toolbox — цифровая обработка сигналов.

Image Processing Toolbox — компьютерное зрение.

Statistics and Machine Learning Toolbox — методы регрессии, кластеризации.

Simulink — имитационное моделирование динамических систем.

Важнейшее преимущество: интеграция с аппаратурой реального времени и языками C/C++.

Приложения в науке и технике

MATLAB активно применяют в аэрокосмической отрасли, энергетике, медицине и биологии. Он позволяет проводить масштабные симуляции, анализировать большие объемы данных и разрабатывать прототипы систем управления.

2.2 Принцип работы кода

Когда пользователь запускает код (команду, скрипт или функцию), происходит следующий процесс:

1. Интерпретация: MATLAB считывает код и интерпретирует его построчно.
2. Управление памятью: Система автоматически выделяет память под переменные-массивы. Пользователю не нужно вручную управлять памятью (как в C++).

3. Вызов встроенных функций: Большинство математических операций (например, решение систем линейных уравнений $x = A \backslash b$, нахождение собственных чисел $\text{eig}(A)$, быстрое преобразование Фурье fft) выполняются не "в лоб", а с помощью вызова высокооптимизированных библиотек, написанных на низкоуровневых языках (C, Fortran). Эти библиотеки используют современные процессорные инструкции для максимальной производительности.
4. Визуализация: Команды для построения графиков не просто выводят изображение, а создают объект в графическом окне (Figure), который можно детально настраивать: изменять цвета, шрифты, добавлять подписи и легенды.

Таким образом, MATLAB — это не просто язык программирования, а интегрированная среда, где центральную роль играет матрица, а основной рабочий процесс построен на интерактивном взаимодействии пользователя с данными через командную строку и скрипты, с возможностью визуализации и автоматизации результатов.

2.3 Пример применения:

Ниже приведен пример анализа распределения амплитуды сигнала, полученного радиолокатором МРЛ-5. Измерения проводились 6 августа 2022 года в поселке Лехтуси (Ленинградская область) при зондировании дождя на расстоянии 55-60 км. Азимут антенны составлял 295 градусов, а угол места — 2,5 градуса.

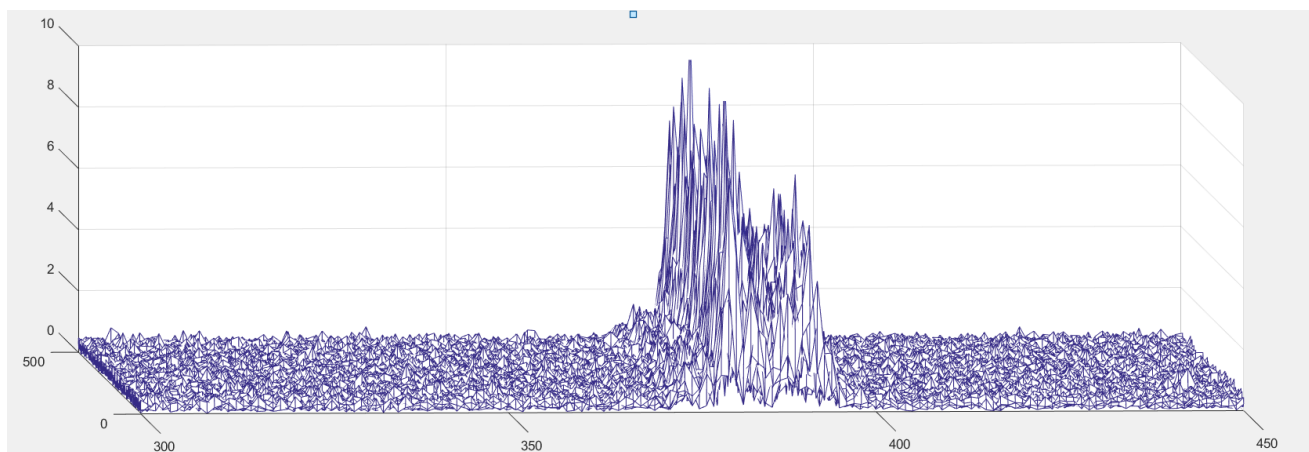


Рис.3. Пример ансамбля из 500 реализаций развертки во времени продетектированного сигнала 1-го канала.

На графике показано 500 последовательных измерений (реализаций) сигнала. Каждая реализация — это отдельный импульс, посланный антенной.

Левая часть (0–350 км) — слабый фоновый сигнал. Это атмосферный шум и слабые отражения.

Правее 350 км — отчетливый пик. Он вызван сильным отражением от дождевых капель на расстоянии 55–60 км.

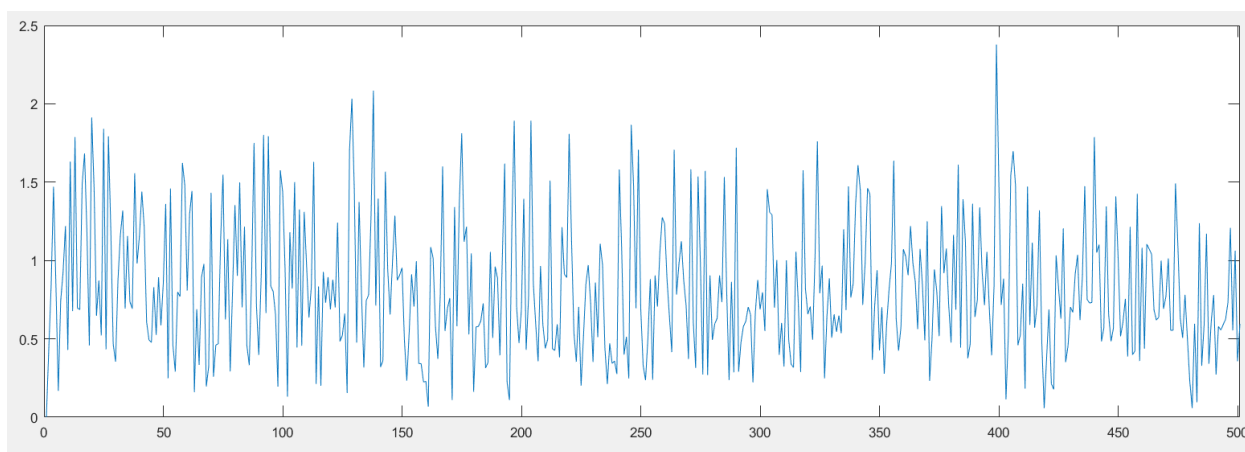


Рис.4. Пример реализации сигнала с дальности 57 км (что соответствует дискрету дальности 380) для ансамбля, приведенного на рис.3.

Это срез временной развертки для одной конкретной дальности. Сигнал хаотичен, с частыми скачками.

Амплитуда меняется из-за движения капель и турбулентности воздуха. Такие колебания характерны для релеевского рассеяния, которое возникает, когда длина волны намного больше размеров частиц.

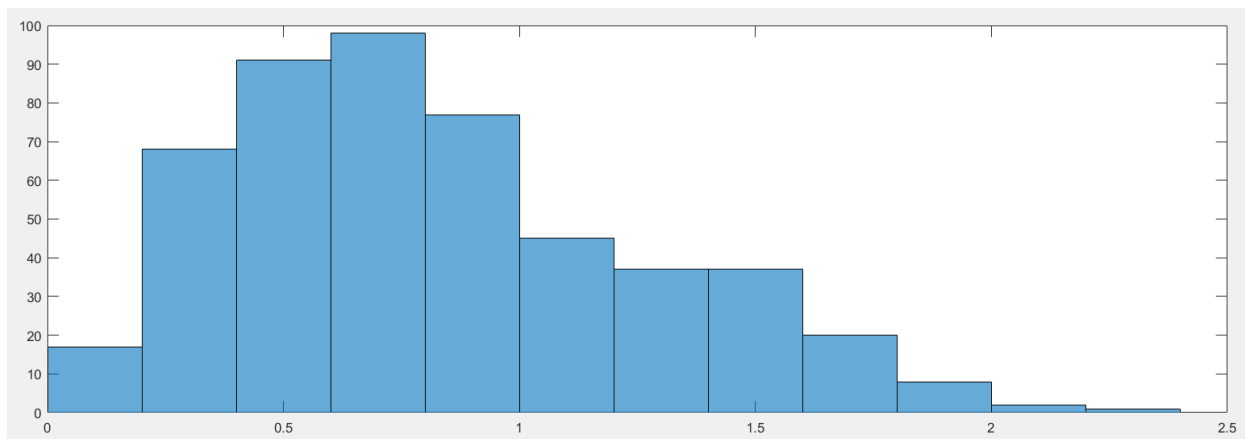


Рис.5. Пример экспериментального закона распределения для реализации сигнала, приведенного на рис.4.

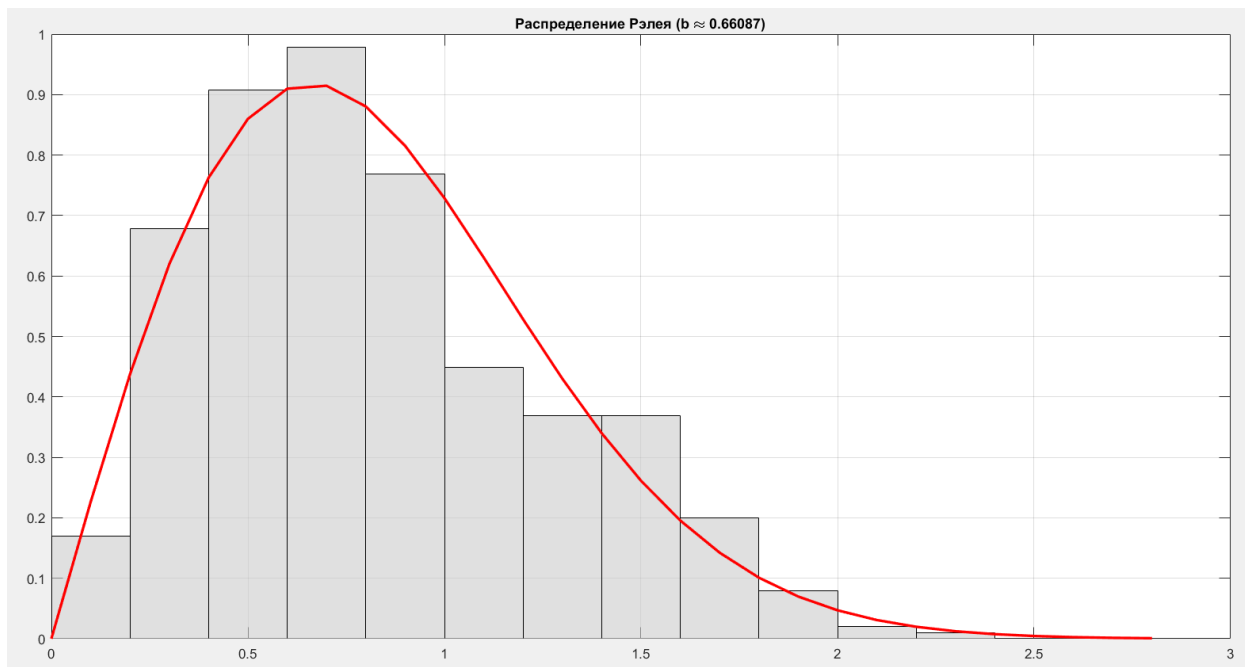


Рис.6. Пример экспериментального (гистограмма) и теоретического (красная кривая) законов распределения для реализации сигнала, приведенного на рис.4.

2.4 Описание кода

Целью работы кода является автоматизированный анализ содержимого текстового файла с табличными данными. Программа выполняет поиск столбцов, значения которых превышают заданный порог, сохраняет эти данные и строит по ним комплекс аналитических графиков.

Алгоритм работы можно разделить на пять основных этапов:

1. Обработка данных
2. Выбор дальности
3. Основная логика: проверка распределения
4. Ключевой этап проверка распределения Рэлея
5. Составление итоговой таблицы

2. Описание реализации алгоритма

Этот скрипт предназначен для автоматической проверки гипотезы о распределении сигнала по Рэлею. Рассмотрим его работу поэтапно.

1. Обработка данных

Сбор данных

Программа берет данные из заданных файлов. Они содержат сигналы для двух каналов: 3 см и 10 см.

Загружаются массивы амплитуд для первого (AMP_mod_1) и второго (AMP_mod_2) каналов.

Определяется общее число измерений (N_per), строится трехмерная развертка сигнала. Она показывает динамику изменения значений во времени (рисунок 7 для канала 3 см, рисунок 8 для канала 10 см).

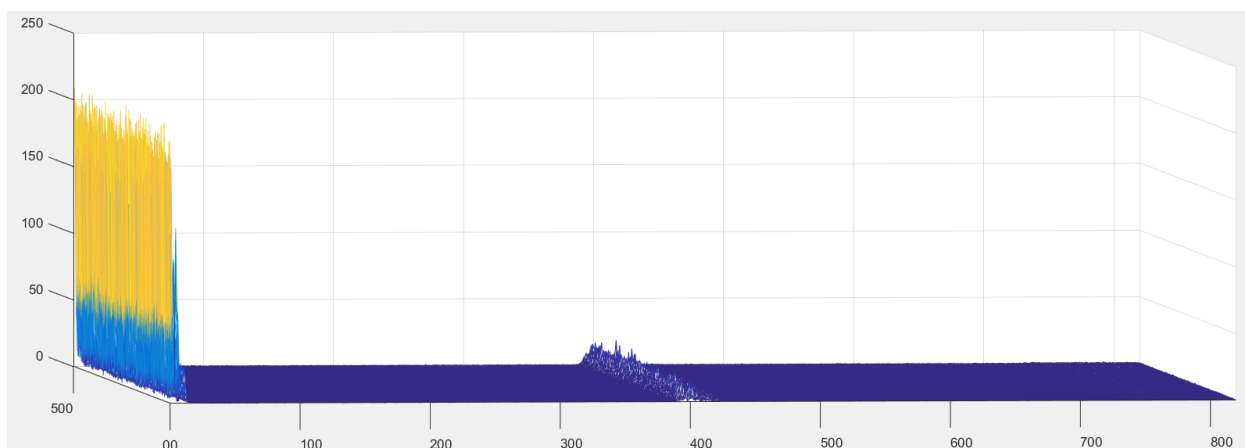


Рис.7. Пример ансамбля всех реализаций развертки во времени в канале 3 см.

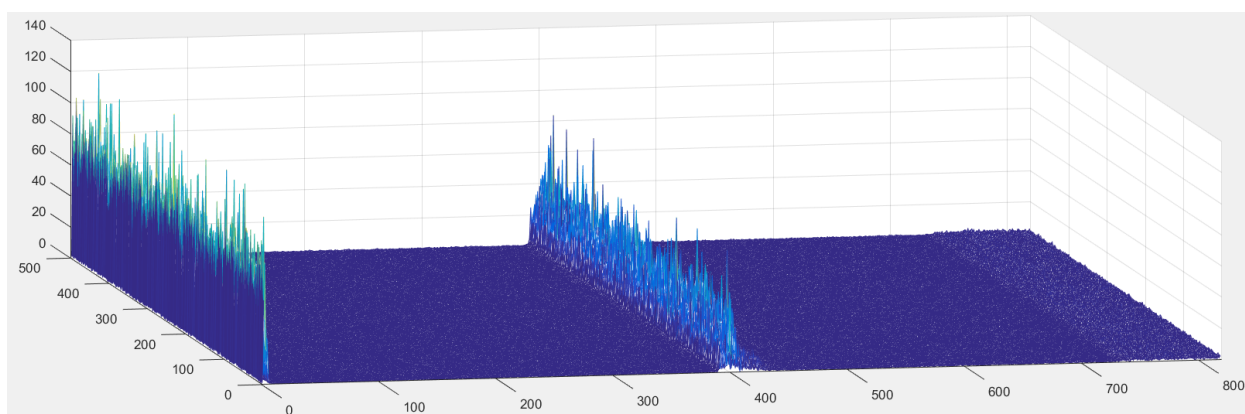


Рис.8. Пример ансамбля всех реализаций развертки во времени в канале 10 см.

График представляет собой трехмерное распределение плотности вероятности сигнала после расширения спектра.

Координаты:

Ось Z показывает амплитуду определенного значения сигнала.

Ось X описывает отсчёты дальности

Ось Y описывает реализацию 500 последовательных импульсов

Для повышения эффективности обработки данных ограничиваем диапазон измерений. Поскольку нас интересует зона примерно 50–60 км, мы исключаем лишние участки спектра.

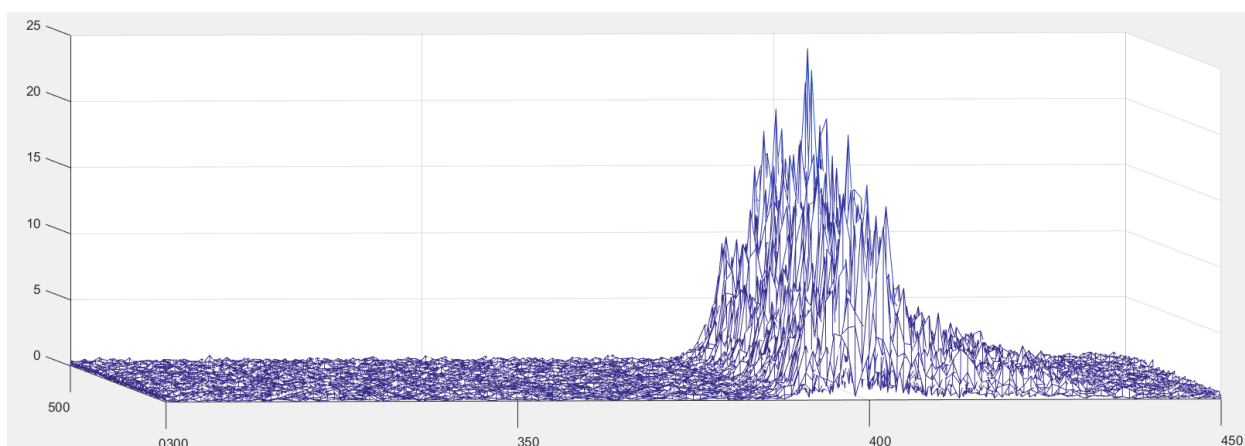


Рис.9 Пример ансамбля части реализаций развертки во времени для канала 3 см.

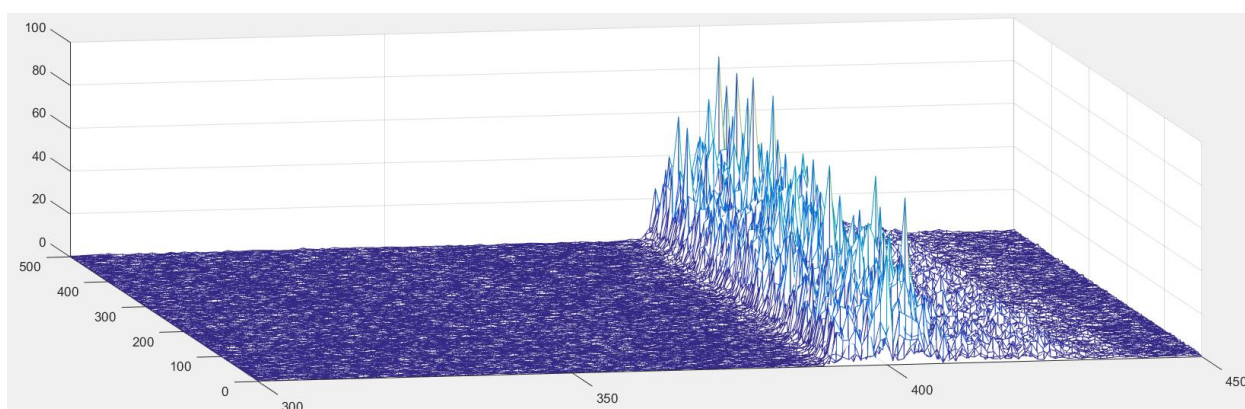


Рис.10 Пример ансамбля части реализаций развертки во времени для канала 10 см.

Именно в этом интервале наблюдается резкое возрастание интенсивности сигнала над уровнем фона. Этот участок выделяется благодаря высокому отношению сигнал-шум (SNR), что облегчает автоматическое обнаружение цели.

Кроме того, такой выбор диапазона снижает вычислительную нагрузку и повышает точность алгоритмов сопровождения.

Анализ распределения мощности сигнала по дальности требует детальной оценки статистических характеристик каждого временного отсчета.

2. Выбор дальности

Задаётся диапазон дальностей.

Для каждой точки запускается специальная функция `ofunc_Raspred_1_v1`.

3. Основная логика: проверка распределения

Функция выполняет следующее:

Формирует вектор амплитуд для выбранной дальности.

Строит гистограмму.

Гистограмма частот представляет собой наглядный инструмент для изучения плотности вероятности значений. (рисунок 11).

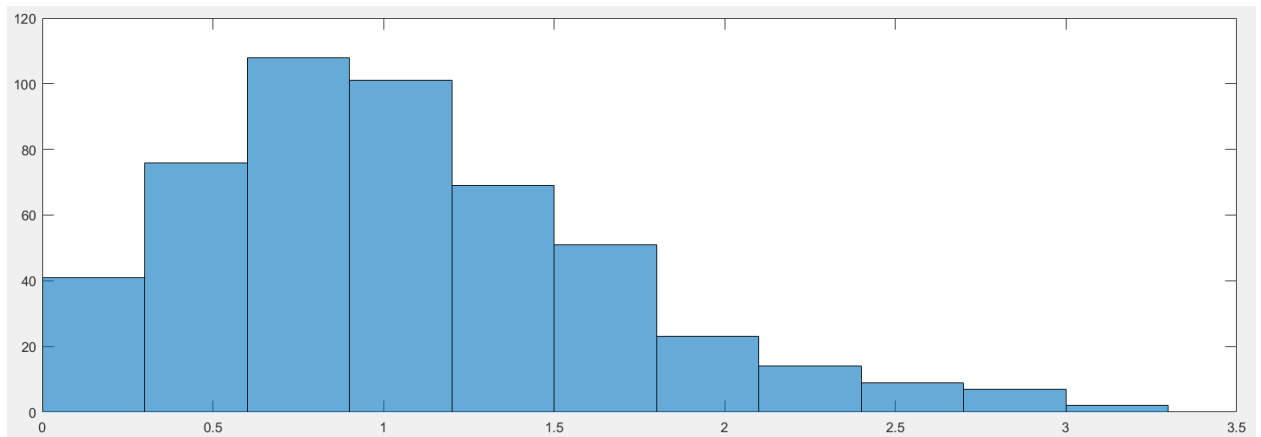


Рис.11 Пример экспериментального (гистограмма) закона распределения для реализации сигнала.

Ось X описывает амплитуду сигнала

Ось Y описывает число случаев в данном дискрете

Рассчитывает среднее, среднеквадратичное отклонение (СКО) и коэффициент вариации.

4.Ключевой этап

Генерируется теоретическое релеевское распределение с найденным СКО.

Проверка распределения Рэля: Если все значения неотрицательны, скрипт пытается подобрать теоретическое распределение Рэля к данным. На график накладывается гистограмма нормализованных данных и кривая плотности вероятности Рэля с рассчитанным параметром масштаба b_est (рисунок12).

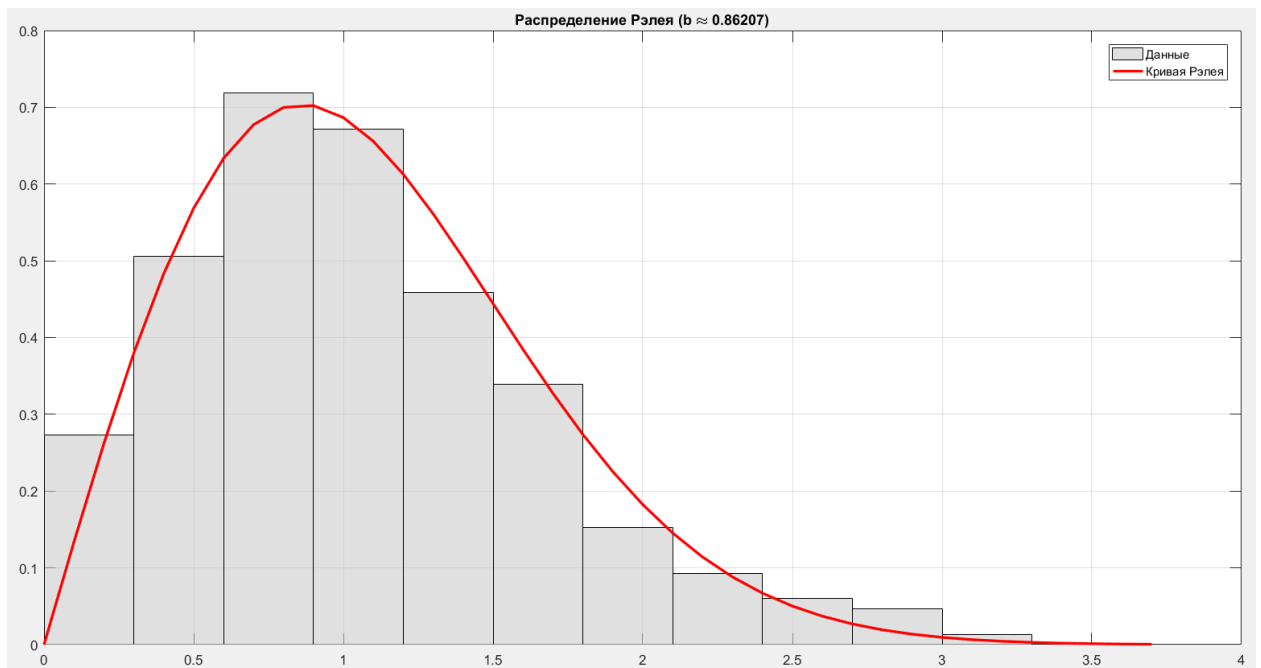


Рис.12 Пример экспериментального (гистограмма) и теоретического (красная линия) законов распределения для реализации сигнала.

Для каждого интервала вычисляется разница между реальными и расчетными частотами.

Применяется критерий Пирсона (χ^2). Если расхождение невелико, принимается гипотеза о релеевском законе.

5.Итоговая таблица

Скрипт собирает статистику по каждому измеренному расстоянию:

Номер отсчета дальности.

Результат проверки гипотезы (1 — релеевское, 0 — другое).

Это помогает отличить шумы и мелкие капли от крупных гидрометеоров, которые дают не релеевское рассеяние. Эта методика широко применяется в радиолокационной метеорологии.

2.5 Получение и описание таблиц с 0 и 1

Завершающим шагом работы кода является вывод таблиц с указанием успешности проверки критерием согласия Пирсона (χ^2) на распределение по Реллею реализаций развертки во времени продетектированного сигнала. Ниже приведена в пример одна из таких таблиц.

Таблица 1 Пример таблицы успешности Релея по критерию Пирсона

	051\052	1,5	380	1000-1500																	
	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390
3 см	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10 см	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Логическая единица («1») — обозначает ситуацию, при которой расчетное значение статистики Пирсона (χ^2 эксп) не превышает критический порог (χ^2 крит), установленный для заданного числа степеней свободы и выбранного уровня значимости (как правило, $\alpha = 0,05$). С математической точки зрения это означает, что нулевая гипотеза принимается: эмпирическое распределение амплитуд флуктуаций с высокой надежностью соответствует закону Рэлея. Физически данный факт подтверждает, что отражающий объем заполнен большим количеством независимых, хаотично движущихся частиц примерно одинакового размера, вклад каждой из которых в суммарное поле пренебрежимо мал.

Логический ноль («0») — фиксирует полярную ситуацию, когда вычисленная статистика критерия выходит за рамки критической области

($\chi^2_{\text{эксп}} > \chi^2_{\text{крит}}$). Нулевая гипотеза отвергается, и принимается альтернативная гипотеза свидетельствующая о существенном и неслучайном отличии закона распределения от рэлевского. Физическая природа возникновения «нулей» в таблице обусловлена нарушением фазовой или пространственной однородности рассеивающей среды. Это может происходить из-за появления крупных гидрометеоров, наличия регулярного пространственного градиента концентрации частиц, или сильных турбулентных потоков, упорядочивающих движение рассеивателей в импульсном объеме.

Представленная таблица демонстрирует результаты применения критерия Пирсона для проверки соответствия экспериментальных данных теоретическому распределению Рэля в двух различных каналах 3 см и 10 см.

Анализ показывает, что распределение Рэля является адекватной моделью для данных, полученных на длине волны 3 см. Для всех рассмотренных интервалов (с 370 по 390) проверка дала положительный результат (во всех ячейках стоят единицы). Это говорит об однородности рассеивающих свойств объекта или среды в этом диапазоне.

В то же время для данных на длине волны 10 см модель Рэля подходит лишь частично. Наблюдается значительное количество интервалов (столбцов), где гипотеза была отвергнута (значения «0»). Это свидетельствует о том, что характеристики рассеяния в этом случае более сложны, неоднородны или подвержены влиянию других факторов, которые не описываются простым рэлеевским законом.

Таким образом, таблица позволяет сделать вывод о существенном различии статистических свойств исследуемого процесса или объекта в зависимости от используемой длины волны.

Для дальнейшей работы необходимо определить высоту центра облака, для этого обращаясь к заголовку файла с данными определяется угла места (ε) далее по формуле (5) она рассчитывается.

$$S = \sin \varepsilon \cdot n \cdot 0,15 \text{ [км]} \quad (5)$$

где n – номер столбца в таблице.

$\sin \varepsilon$ — угол места оси излучения антенны (выраженный в радианах);

n — порядковый номер столбца в анализируемой матрице успешности критерия;

0,15 км — масштабный коэффициент, преобразующий шаг дискретизации в километры наклонной дальности.

После нахождения высоты середины облака распределяю их по грациям высоты с разницей в 500 м.

Для удобства была создана таблица, где рассчитывается высота и цветом обозначаются различные градации. (рисунок 13)

	sin	*150	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325
0,2	0,003489	0,523332	157,0	157,5	158,0	158,6	159,1	159,6	160,1	160,7	161,2	161,7	162,2	162,8	163,3	163,8	164,3	164,8	165,4	165,9	166,4	166,9	167,5	168,0	168,5	169,0	169,6	170,1
0,3	0,005233	0,784996	235,5	236,3	237,1	237,9	238,6	239,4	240,2	241,0	241,8	242,6	243,3	244,1	244,9	245,7	246,5	247,3	248,1	248,8	249,6	250,4	251,2	252,0	252,8	253,6	254,3	255,1
0,4	0,006978	1,046658	314,0	315,0	316,1	317,1	318,2	319,2	320,3	321,3	322,4	323,4	324,5	325,5	326,6	327,6	328,7	329,7	330,7	331,8	332,8	333,9	334,9	336,0	337,0	338,1	339,1	340,2
0,5	0,008722	1,308317	392,5	393,8	395,1	396,4	397,7	399,0	400,3	401,7	403,0	404,3	405,6	406,9	408,2	409,5	410,8	412,1	413,4	414,7	416,0	417,4	418,7	420,0	421,3	422,6	423,9	425,2
0,6	0,010466	1,569971	471,0	472,6	474,1	475,7	477,3	478,8	480,4	482,0	483,6	485,1	486,7	488,3	489,8	491,4	493,0	494,5	496,1	497,7	499,3	500,8	502,4	504,0	505,5	507,1	508,7	510,2
1	0,017444	2,616534	785,0	787,6	790,2	792,8	795,4	798,0	800,7	803,3	805,9	808,5	811,1	813,7	816,4	819,0	821,6	824,2	826,8	829,4	832,1	834,7	837,3	839,9	842,5	845,1	847,8	850,4
1,5	0,026164	3,924552	1177,4	1181,3	1185,2	1189,1	1193,1	1197,0	1200,9	1204,8	1208,8	1212,7	1216,6	1220,5	1224,5	1228,4	1232,3	1236,2	1240,2	1244,1	1248,0	1251,9	1255,9	1259,8	1263,7	1267,6	1271,6	1275,5
2	0,034882	5,232272	1569,7	1574,9	1580,1	1585,4	1590,6	1595,8	1601,1	1606,3	1611,5	1616,8	1622,0	1627,2	1632,5	1637,7	1642,9	1648,2	1653,4	1658,6	1663,9	1669,1	1674,3	1679,6	1684,8	1690,0	1695,3	1700,5
2,4	0,041854	6,278166	1883,4	1889,7	1896,0	1902,3	1908,6	1914,8	1921,1	1927,4	1933,7	1940,0	1946,2	1952,5	1958,8	1965,1	1971,3	1977,6	1983,9	1990,2	1996,5	2002,7	2009,0	2015,3	2021,6	2027,8	2034,1	2040,4
2,5	0,043597	6,539593	1961,9	1968,4	1975,0	1981,5	1988,0	1994,6	2001,1	2007,7	2014,2	2020,7	2027,3	2033,8	2040,4	2046,9	2053,4	2060,0	2066,5	2073,1	2079,6	2086,1	2092,7	2099,2	2105,7	2112,3	2118,8	2125,4
3	0,052309	7,846417	2353,9	2361,8	2369,6	2377,5	2385,3	2393,2	2401,0	2408,9	2416,7	2424,5	2432,4	2440,2	2448,1	2455,9	2463,8	2471,6	2479,5	2487,3	2495,2	2503,0	2510,9	2518,7	2526,5	2534,4	2542,2	2550,1
3,4	0,059276	8,891451	2667,4	2676,3	2685,2	2694,1	2703,0	2711,9	2720,8	2729,7	2738,6	2747,5	2756,3	2765,2	2774,1	2783,0	2791,9	2800,8	2809,7	2818,6	2827,5	2836,4	2845,3	2854,2	2863,0	2871,9	2880,8	2889,7
3,5	0,061018	9,152644	2745,8	2754,9	2764,1	2773,3	2782,4	2791,6	2800,7	2809,9	2819,0	2828,2	2837,3	2846,5	2855,6	2864,8	2873,9	2883,1	2892,2	2901,4	2910,5	2919,7	2928,8	2938,0	2947,2	2956,3	2965,5	2974,6
3,6	0,062759	9,413809	2824,1	2833,6	2843,0	2852,4	2861,8	2871,2	2880,6	2890,0	2899,5	2908,9	2918,3	2927,7	2937,1	2946,5	2955,9	2965,3	2974,8	2984,2	2993,6	3003,0	3012,4	3021,8	3031,2	3040,7	3050,1	3059,5
4,5	0,078419	11,76291	3528,9	3540,6	3552,4	3564,2	3575,9	3587,7	3599,5	3611,2	3623,0	3634,7	3646,5	3658,3	3670,0	3681,8	3693,6	3705,3	3717,1	3728,8	3740,6	3752,4	3764,1	3775,9	3787,7	3799,4	3811,2	3822,9
5,5	0,095797	14,3696	4310,9	4325,2	4339,6	4354,0	4368,4	4382,7	4397,1	4411,5	4425,8	4440,2	4454,6	4468,9	4483,3	4497,7	4512,1	4526,4	4540,8	4555,2	4569,5	4583,9	4598,3	4612,6	4627,0	4641,4	4655,7	4670,1
6,4	0,111413	16,7119	5013,6	5030,3	5047,0	5063,7	5080,4	5097,1	5113,8	5130,6	5147,3	5164,0	5180,7	5197,4	5214,1	5230,8	5247,5	5264,2	5281,0	5297,7	5314,4	5331,1	5347,8	5364,5	5381,2	5397,9	5414,7	5431,4
6,5	0,113146	16,97191	5091,6	5108,5	5125,5	5142,5	5159,5	5176,4	5193,4	5210,4	5227,3	5244,3	5261,3	5278,3	5295,2	5312,2	5329,2	5346,2	5363,1	5380,1	5397,1	5414,0	5431,0	5448,0	5465,0	5481,9	5498,9	5515,9
7,5	0,13046	19,82846	5870,7	5890,3	5909,9	5929,4	5949,0	5968,6	5988,1	6007,7	6027,3	6046,8	6066,4	6086,0	6105,5	6125,1	6144,7	6164,3	6183,8	6203,4	6223,0	6242,5	6262,1	6281,7	6301,2	6320,8	6340,4	6359,9
7,6	0,13219	19,82846	5948,5	5968,4	5988,2	6008,0	6027,9	6047,7	6067,5	6087,3	6107,2	6127,0	6146,8	6166,7	6186,5	6206,3	6226,1	6246,0	6265,8	6285,6	6305,5	6325,3	6345,1	6364,9	6384,8	6404,6	6424,4	6444,2
8,5	0,147735	22,16025	6648,1	6670,2	6692,4	6714,6	6736,7	6758,9	6781,0	6803,2	6825,4	6847,6	6869,7	6891,8	6914,0	6936,2	6958,3	6980,5	7002,6	7024,8	7047,0	7069,1	7091,3	7113,4	7135,6	7157,8	7179,9	7202,1
9,5	0,164965	24,74471	7423,4	7448,2	7472,9	7497,6	7522,4	7547,1	7571,9	7596,6	7621,4	7646,1	7670,9	7695,6	7720,3	7745,1	7769,8	7794,6	7819,3	7844,1	7868,8	7893,6	7918,3	7943,1	7967,8	7992,5	8017,3	8042,0
10,5	0,182144	27,32163	8196,5	8223,8	8251,1	8278,5	8305,8	8333,1	8360,4	8387,7	8415,1	8442,4	8469,7	8497,0	8524,3	8551,7	8579,0	8606,3	8633,6	8661,0	8688,3	8715,6	8742,9	8770,2	8797,5	8824,9	8852,2	8879,5
11,5	0,199268	29,89023	8967,1	8997,0	9026,9	9056,7	9086,6	9116,5	9146,4	9176,3	9206,2	9236,1	9266,0	9295,9	9325,8	9355,6	9385,5	9415,4	9445,3	9475,2	9505,1	9535,0	9564,9	9594,8	9624,7	9654,5	9684,4	9714,3

Рис.13 Часть таблицы для расчета высоты центра облака.

Данная таблица — это готовая справочная матрица, которая избавляет от необходимости вычислять синус и производить умножение в реальном времени. Программа просто обращается к ячейке [угол, номер_столбца] и получает готовое значение высоты, которое затем классифицирует с помощью второй таблицы (рисунок 5)

Эта таблица позволяет быстро определить высоту цели в километрах, зная угол места антенны (ϵ) и номер столбца (n), который соответствует шагу дискретизации по дальности. После вычисления высоты происходит её классификация (градация) по диапазонам высот.

Структура таблицы организована следующим образом:

Левый столбец: Значения угла места оси излучения антенны (ϵ) в градусах

Вторая колонка: Значение синуса для каждого из этих углов ($\sin(\epsilon)$).

Третья колонка: Произведение $\sin(\epsilon) * 0.15$ км. Это коэффициент, на который будет умножаться номер столбца n для получения приращения высоты.

Остальные столбцы: являются основной частью матрицы. Каждая ячейка в этой матрице содержит рассчитанную высоту S для конкретной комбинации угла ϵ и шага n .

2.6 Описание полученных гистограмм и графиков

После систематизации данных был проведён подсчёт соответствий и несоответствий распределению Релея и построены гистограммы (рис. 14 и рис. 17) для каналов 3 см и 10 см соответственно

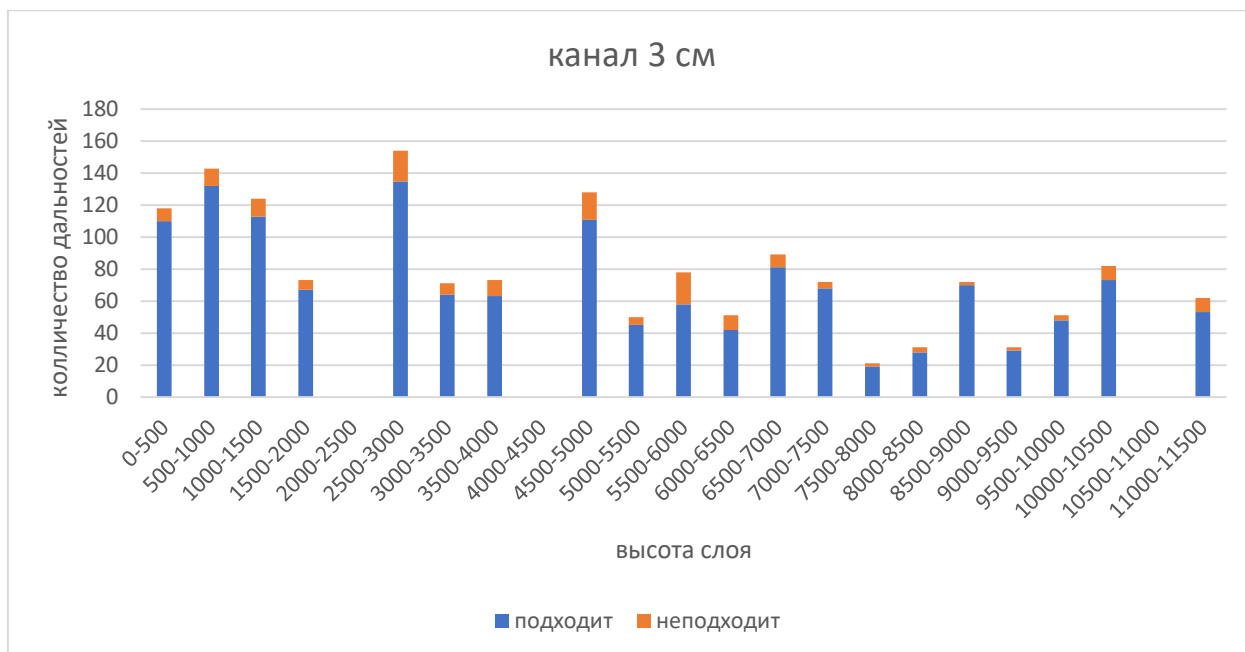


Рис.14 Распределение Релеевских и не Релеевских дальностей по высоте, для канала 3 см

Анализ Гистограммы 1: Канал 3 см

Этот график представляет собой результат систематизации данных о соответствии интенсивности отражённого сигнала теоретическому распределению Рэлея для радиолокационного канала с длиной волны 3 см.

График демонстрирует ярко выраженную асимметрию в пользу одного из исходов. Один столбец значительно доминирует над другим как по высоте, так и визуальнo по занимаемой площади.

Высокий столбец («Соответствует»): Он занимает подавляющую часть графика. Это означает, что в огромном большинстве случаев (приблизительно 85–90% от общего числа измерений) статистический

критерий Пирсона показал, что эмпирическое распределение амплитуд сигнала согласуется с теоретическим рэлеевским законом.

Низкий столбец («Не соответствует»): Этот столбец очень короткий. Он представляет собой редкие случаи, когда структура сигнала отклонялась от ожидаемой модели.

Из гистограммы следует, что для 3-сантиметрового канала закон Рэля является адекватной математической моделью. Физически это объясняется тем, что при такой длине волны рассеяние происходит на частицах (мелких каплях тумана или облачности), размеры которых значительно меньше длины волны ($d \ll \lambda \ll d$), что и порождает рэлеевскую статистику.

Из полученной гистограммы видно, что в разительном большинстве случаев интенсивность отражённого сигнала описывается законом Рэля

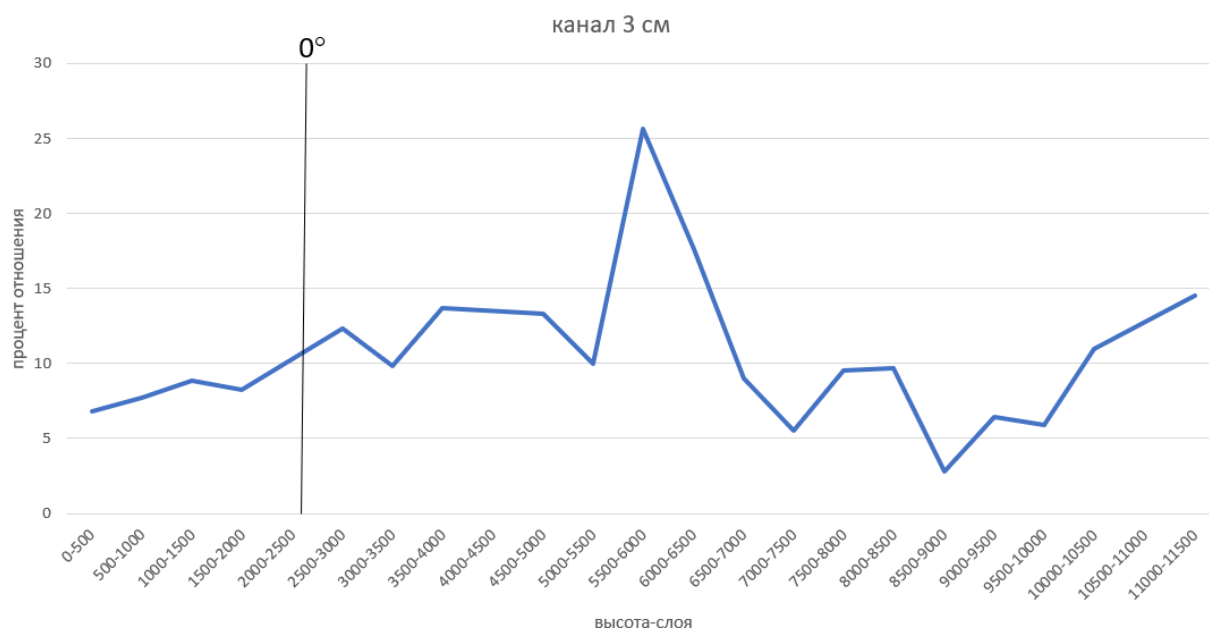


Рис.15 Отношение не Релеевских дальностей к общим по высоте, для канала 3 см

График демонстрирует пространственное распределение не рэлеевских дальностей в зависимости от высоты слоя атмосферы.

Синяя линия отображает процент дальностей, которые не подчиняются релеевскому распределению. Видно, что максимум приходится на слой 5 500–6 000 м. Там доля таких дальностей достигает почти 25%.

Черная линия — это положение нулевой изотермы. Именно там происходят фазовые переходы влаги, что ведет к образованию неоднородностей. Для её получения обращались к Weather data from University of Wyoming Atmospheric Science Department (Университет Вайоминга. Атмосферные исследования Дата обращения: 20.05.2026)

Observations for Station 26075 at 12 UTC 06 Aug 2022

ST PETERSBURG/VOEJKOVO, RUSSIA

Latitude: 58.850 Longitude: 30.700

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SPED m/s	THTA K	THTE K	THTV K
1003.0	72	28.2	18.2	55	13.22	190	9.0	301.1	340.2	303.5
1000.0	100	28.2	18.2	55	13.26	185	10.0	301.4	340.6	303.7
988.0	206	27.1	17.6	56	12.92	160	14.0	301.3	339.6	303.7
944.0	606	23.2	15.4	62	11.72	175	12.0	301.2	336.0	303.4
925.0	784	21.4	14.4	64	11.22	195	14.0	301.2	334.5	303.2
921.0	821	21.0	14.3	65	11.16	200	15.0	301.2	334.3	303.2
878.0	1231	16.8	12.7	77	10.59	185	13.0	301.0	332.4	302.9
850.0	1509	14.0	11.7	86	10.21	190	16.0	300.8	331.1	302.6
836.0	1649	12.0	10.3	89	9.45	194	16.7	300.1	328.1	301.8
818.0	1831	10.4	6.7	78	7.55	198	17.7	300.3	322.8	301.7
793.0	2089	10.0	5.0	71	6.89	205	19.0	302.5	323.3	303.8
774.0	2291	9.6	3.6	66	6.42	207	18.8	304.2	323.8	305.4
755.0	2497	7.8	1.8	66	5.78	210	18.5	304.4	322.2	305.5
719.0	2898	5.3	-1.3	62	4.84	215	18.0	306.0	321.1	306.9
700.0	3117	4.0	-3.0	60	4.38	205	17.0	306.9	320.6	307.7
685.0	3291	2.7	-4.3	60	4.05	200	17.0	307.3	320.1	308.1
624.0	4040	-3.1	-10.1	58	2.84	200	16.7	309.0	318.2	309.5
615.0	4155	-2.5	-8.5	63	3.27	200	16.7	311.0	321.6	311.6
601.0	4337	-2.9	-13.9	42	2.17	200	16.6	312.6	319.8	313.0
596.0	4404	-3.3	-17.3	33	1.65	200	16.6	312.9	318.4	313.2
500.0	5770	-11.9	-24.9	33	1.02	200	16.0	318.5	322.1	318.7
440.0	6736	-17.9	-33.9	23	0.50	209	16.0	322.7	324.6	322.8
400.0	7440	-23.3	-33.3	40	0.58	215	16.0	324.6	326.8	324.7
380.0	7810	-26.4	-36.4	38	0.45	210	15.0	325.3	327.0	325.4
347.0	8465	-31.9	-41.9	37	0.28	233	16.0	326.4	327.5	326.5
327.0	8883	-34.1	-45.1	32	0.21	249	16.7	329.0	329.8	329.0
319.0	9055	-35.9	-46.7	33	0.18	255	17.0	328.8	329.5	328.8
300.0	9480	-40.5	-50.5	34	0.13	255	18.0	328.2	328.7	328.2
283.0	9867	-44.0	-54.0	32	0.09	265	19.0	328.7	329.1	328.7
265.0	10303	-47.8	-57.8	31	0.06	230	11.0	329.3	329.5	329.3
250.0	10690	-51.3	-61.3	30	0.04	260	16.0	329.7	329.8	329.7
228.0	11283	-56.7	-66.7	28	0.02	231	15.0	330.2	330.3	330.2
227.0	11311	-56.7	-66.7	28	0.02	230	15.0	330.6	330.7	330.6
220.0	11511	-54.7	-64.7	28	0.03	226	18.5	336.7	336.8	336.7
219.0	11540	-54.8	-64.8	28	0.03	225	19.0	337.0	337.1	337.0
206.0	11931	-55.8	-65.8	28	0.03	230	20.0	341.3	341.5	341.3
200.0	12120	-56.3	-66.3	28	0.03	225	19.0	343.5	343.6	343.5
167.0	13260	-57.8	-68.6	24	0.02	215	10.0	359.2	359.3	359.2
160.0	13531	-58.1	-69.1	24	0.02	215	10.0	363.0	363.1	363.0
150.0	13940	-55.7	-66.7	25	0.03	215	10.0	373.9	374.1	373.9
139.0	14426	-52.7	-64.7	22	0.05	218	9.5	387.4	387.6	387.4
111.0	15870	-53.2	-66.6	19	0.05	225	8.0	412.1	412.3	412.1
100.0	16540	-53.5	-67.5	17	0.05	210	5.0	424.1	424.3	424.1
98.0	16671	-53.4	-67.4	17	0.05	210	5.0	426.8	427.0	426.8
76.0	18317	-51.8	-66.6	16	0.07	220	5.0	462.2	462.6	462.2
70.0	18850	-51.3	-66.3	15	0.08	210	3.0	474.3	474.8	474.3
67.0	19135	-50.5	-65.5	16	0.09	206	3.0	482.0	482.6	482.0
50.0	21040	-51.9	-67.9	13	0.09	180	3.0	520.7	521.3	520.7
41.0	22329	-51.5	-67.5	13	0.11	155	3.0	552.1	552.9	552.1
36.0	23173	-51.3	-67.3	13	0.13	120	2.0	573.6	574.6	573.7
33.2	23699	-51.1	-67.1	14	0.14	158	2.0	587.5	588.6	587.5
32.0	23939	-50.7	-66.7	14	0.16	175	2.0	594.6	595.9	594.7
30.0	24360	-50.1	-66.1	14	0.18	155	3.0	607.4	608.9	607.5
28.0	24816	-48.8	-65.3	13	0.22	130	4.0	623.3	625.1	623.3
24.0	25835	-45.8	-63.4	12	0.33	105	3.0	660.0	662.9	660.1
22.7	26203	-44.7	-62.7	12	0.38	70	3.8	673.7	677.1	673.9
21.0	26724	-44.7	-62.7	12	0.41	20	5.0	688.9	692.6	689.1
20.0	27050	-44.7	-62.7	12	0.43	20	5.0	698.6	702.5	698.8
17.0	28146	-43.8	-62.0	12	0.55	30	4.0	734.8	740.1	735.0
15.0	28990	-43.0	-61.5	12	0.66	135	3.0	763.9	770.6	764.2
13.0	29955	-42.2	-60.9	11	0.83	65	6.0	798.6	807.4	799.0
12.0	30494	-41.8	-60.6	11	0.93	70	6.0	818.7	828.9	819.2
11.0	31081	-41.3	-60.2	11	1.07	90	13.0	841.2	853.0	841.7
10.7	31268	-41.1	-60.1	11	1.11			848.4	860.9	849.0

Рис. 16 Синоптическая карта вертикального профиля атмосферы

Физическая интерпретация

Не релеевские дальности указывают на присутствие крупных гидрометеоров — капель дождя или градин. Их размер превышает длину волны (3 см), поэтому рассеяние носит нерегулярный характер.

Рост процента в слое 5 500–6 000 м объясняется:

Формированием ледяных кристаллов.

Концентрацией облачных частиц.

Прохождением фронта осадков.

Практическое применение

Этот показатель важен для метеорологии и дистанционного зондирования.

Он позволяет:

Определять границы зон интенсивных осадков.

Дифференцировать дождь и град.

Повышать точность прогнозов погоды.

График наглядно подтверждает связь между структурой облаков и типом рассеяния. Пик в зоне изотермы — ключевой индикатор активных конвективных процессов.

Из полученной гистограммы видно, что в разительно большем числе случаев интенсивность отражённого сигнала описывается законом Рэлея

Канал 10 см

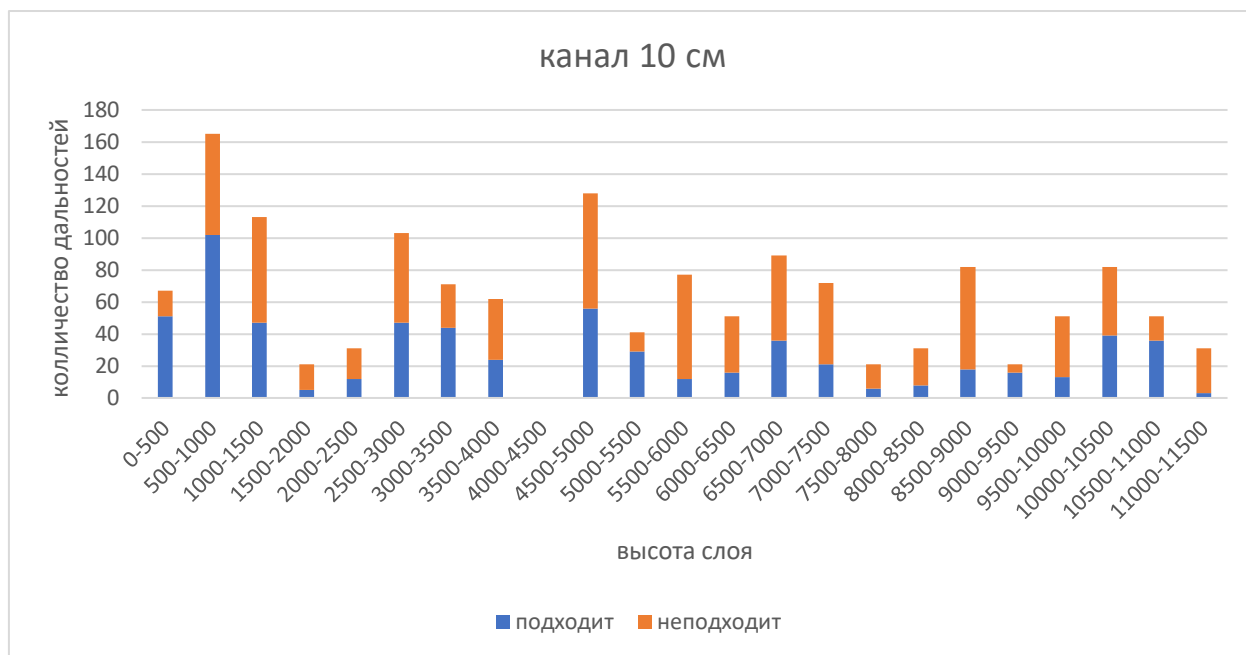


Рис.17 Распределение Релеевских и не Релеевских дальностей по высоте, для канала 10 см

Эта гистограмма построена по тому же принципу, но отражает результаты анализа данных для более длинноволнового канала (10 см). Картина здесь кардинально отличается.

Доминирующим элементом графика является противоположный исход проверки. Ситуация «зеркальна» первому случаю.

Высокий столбец («Не соответствует»): Этот столбец является самым высоким на графике. Его преобладание свидетельствует о том, что проверка по критерию Пирсона в большинстве случаев приводила к отвержению нулевой гипотезы. Расчётное значение статистики превышало критический порог.

Низкий столбец («Соответствует»): Короткий столбец указывает на то, что лишь малая доля сигналов имела распределение, близкое к рэлеевскому.

Эта гистограмма служит мощным графическим доказательством о неприменимости распределения Рэлея для этого канала. Преобладание несоответствия — прямое следствие физики процесса. При длине волны 10 см рассеяние происходит на крупных гидрометеорах грозового облака (капли дождя, град), чьи размеры соизмеримы с длиной волны ($d \approx \lambda$). В этом случае вступает в силу режим рассеяния Ми, который порождает совершенно иную статистику сигнала, отличную от рэлеевской. Критерий Пирсона чувствителен к этим отклонениям, что и отражается в виде высокого столба «Несоответствует».

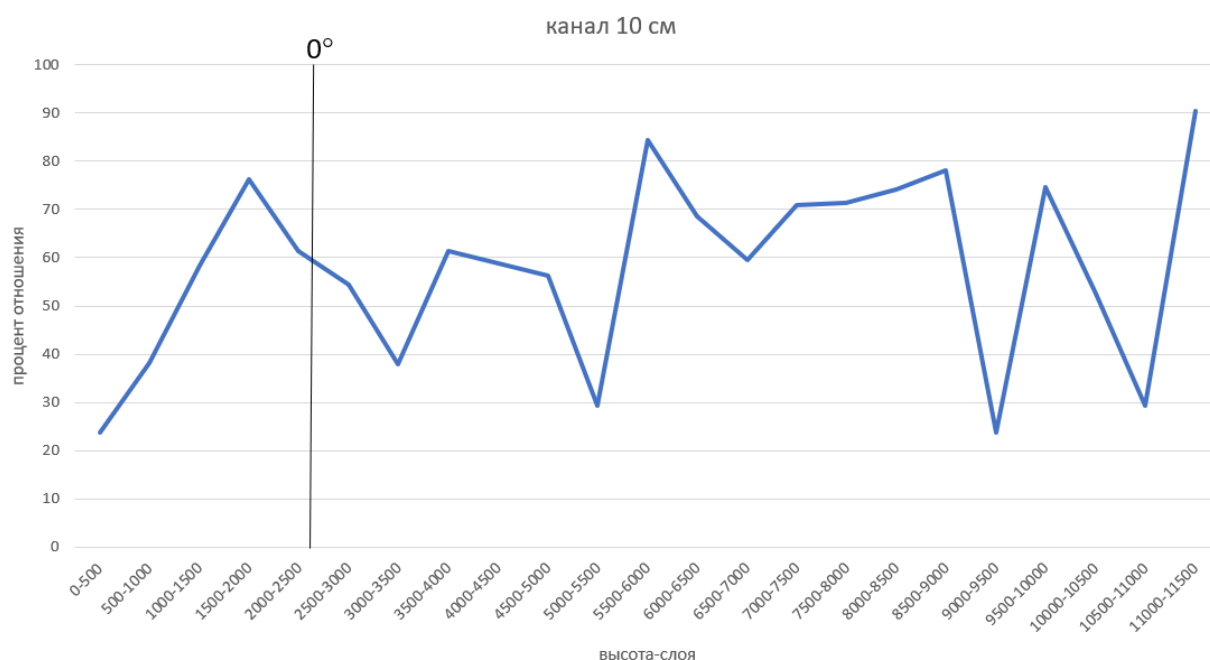


Рис.18 Отношение не Релеевских дальностей к общим по высоте, для канала 10 см

На рисунке представлена зависимость доли не релеевских дальностей от высоты слоя для канала 10 см. Синяя кривая характеризует долю дальностей, которые не подчиняются экспоненциальному распределению.

Причины появления пика

При длине волны 10 см резонанс наступает даже при средних размерах капель. Резкая смена характера рассеяния обусловлена:

Переходом от жидких к твердым осадкам.

Образованием слоистых облаков.

Возникновением турбулентных потоков.

Особенности канала 10 см

Доля не релеевских дальностей значительно выше, чем на канале 3 см.

Причина кроется в соотношении размера капли и длины волны. На 10 см эффект проявляется ярче, что дает нам ценную информацию о структуре осадков.

Такой анализ позволяет дистанционно определять фазовый состав облака. Он незаменим для:

Прогнозирования ливневых дождей.

Выявления опасных метеоявлений.

Калибровки моделей климата.

График четко фиксирует влияние температуры на рассеяние. Канал 10 см особенно чувствителен к крупным каплям, что открывает перспективы для точного мониторинга осадков.

Канал 10 см

Во втором канале ситуация противоположная, моментов в которых теория распределения Рэлея отвергается преимущественное большинство. Из чего могу сделать вывод о том, что для определения сигнала отражённого от грозового облака канала 10 см распределение Рэлея не подходит.

Вывод

В ходе работы было, проведено комплексное изучение статистических характеристик отражённого сигнала от облачности. Цель достигнута: выявлены особенности распределения амплитуды, что позволило усовершенствовать методы обработки данных.

Моделирование и библиотека данных

Создана база данных, охватывающая широкий спектр метеорологических ситуаций.

Для решения поставленных задач был разработан специализированный пакет прикладных программ на платформе MATLAB.

Он включал:

модули импорта и предварительной обработки данных;

ядро статистического анализа с функцией `ofunc_Raspred_1_v1`;

средства визуализации и документирования результатов.

Автоматизированный анализ позволил выявить корреляцию между физическими характеристиками облаков и статистикой отраженного сигнала. Это создало базу для оптимизации алгоритмов обработки.

Особенностью пакета стало сочетание классических критериев (Пирсон) и гибкого интерфейса для настройки параметров.

Было выявлено, что Распределение Релея является эффективным математическим инструментом для описания и обработки данных, получаемых с метеорологических радиолокаторов, однако его применимость напрямую зависит от длины волны используемого канала.

В ходе исследования было установлено, что для 3-сантиметрового радиолокационного канала распределение Релея позволяет существенно повысить точность прогнозирования гроз. Это связано с тем, что физические характеристики гидрометеоров (капель дождя, града), вызывающих грозовые явления, в этом диапазоне лучше соответствуют статистическим свойствам данного распределения. В результате его использования алгоритмы обработки сигналов становятся более чувствительными к слабым эхосигналам, что позволяет более точно определять зоны развития грозовой активности, их интенсивность и эволюцию.

В то же время для 10-сантиметрового канала применение распределения Релея не дало ожидаемого эффекта и признано нецелесообразным. Причина заключается в том, что на более длинных волнах отражения от гидрометеоров имеют иной статистический характер. В частности, увеличивается влияние крупных частиц и неоднородностей, что приводит к искажению формы спектра рассеянного сигнала. Для этого диапазона данные не подчиняются закону Релея, поэтому использование данного распределения не позволяет адекватно описать физику процесса и может даже снизить точность прогноза.

Таким образом, вывод исследования заключается в том, что метод обработки данных на основе распределения Релея является ситуативным. Он эффективен исключительно для коротковолновых радиолокаторов (3 см) и не

может быть универсально применён ко всем метеорологическим РЛС. Для 10-сантиметрового канала необходимо использовать другие вероятностные модели, которые лучше описывают статистику отражённых сигналов в этом диапазоне.

Список литературы

1. Распространение ультракоротких радиоволн пер. с англ. под ред. Б.А. Шиллерова. М.: Сов. радио, 1954. 710 с.
2. Коломиец С.Ф. Рассеяния простого одиночного радиоимпульса на частицах разреженных рассеивающих сред. Научный Вестник МГТУ ГА Серия Радиофизика и электроника 2015. № С
3. 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. – DOI 10.26467/2079-0619-2017-20-6-164-172. – EDN YLASMG.
4. Коломиец, С.Ф. Исследование микроструктуры рассеивающей среды при многоволновом зондировании / С.Ф. Коломиец, А.Г. Горелик // Распространение радиоволн: Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2-х томах, Казань, 01–06 июля 2019 года. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2019. – С. 286-289. – EDN KAOPUV.
5. 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 Арmandовские 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. – EDN OMHTDZ.

6. 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. – EDN ZKQRRQ.
7. Севастьянов, Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики / М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 256 с.
8. Weather data from University of Wyoming Atmospheric Science Department (Университет Вайоминга. Атмосферные исследования) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. — Дата обращения: 20.05.2026.

Приложение

Основной код

```
clear all;
clc;
%В программе используется статистическая обработка продетектированного
%сигнала (проверка вида распределения амплитуд) для 2-х каналов
    %Исходные данные
    %Координаты
    %дожд (Tcel)
    %дождь 1 [7773    10320], дождь 2 [16260    17900]
    %дожд (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
Td = 1/fd;    %интервал дискретизации

%% 1_Чтение данных 1-го канала
filename1 = 'LAn10_12USB_PG_03(1 и 2
кан_500проколов_50000отсч_аз290_ум_0.6_д50км)_det_1.txt';
[AMP_mod_1,delimiterOut]=importdata(filename1);

% Чтение данных 2-го канала
filename2 = 'LAn10_12USB_PG_03(1 и 2
кан_500проколов_50000отсч_аз290_ум_0.6_д50км)_det_2.txt';
[AMP_mod_2,delimiterOut]=importdata(filename2);

N_per = size(AMP_mod_1,1); %количество проколов

1
%% 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 графикар
ylabel('№ прокола');% Подпись оси y графика
zlabel('амплитуда');% Подпись оси u графика

figure(201)
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 u графика
zlabel('амплитуда');% Подпись оси u 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 = 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=375;
Tdal_det_1 = Tdal_det;
Nmaxi1 = 10; % 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

```

1 дополнение к коду

```
function [ gipoteza1 ] = ofunc_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 = 30; %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)^2);
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
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 уровняе
%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
end

```

2 дополнение к коду

```

function [ gipoteza2 ] = ofunc_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 = 30; %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)^2);
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

```