

Дистанционное зондирование сред

DOI 10.66032/2221-2574-2025-1-3-5-10

УДК 551.501.815

ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТРАЖЕНИЙ ОТ МЕТЕОЦЕЛИ КАК КРИТЕРИЙ ЕЁ ИДЕНТИФИКАЦИИ*

Денисенков Дмитрий Анатольевич

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры технологий и средств геофизического обеспечения, ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия¹ имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ.

E-mail: vka@mil.ru

Жуков Владимир Юрьевич

доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной физики атмосферы, ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»².

¹Адрес: 197198, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

²Адрес: 192007, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79.

Аннотация: В статье приводятся результаты исследования закона распределения амплитуды сигнала, отражённого от осадков различного вида – снега, мокрого снега, обложных осадков, ливня — при зондировании на разных длинах волн. Описываются аппаратура, используемая при проведении эксперимента, применяемая методика набора и обработки данных. Делается вывод о том, что примерно в четверти рассматриваемых зондирований распределение амплитуды сигналов, отражённых осадками, имеет форму, отличную от релеевской.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, статистическая обработка, закон распределения амплитуды сигнала, дистанционное зондирование атмосферы, радиолокатор МРЛ-5.

Введение

Современная метеорологическая радиолокация для распознавания опасных явлений использует ряд параметров отражённого сигнала. Основными из них являются [1]:

- энергетический параметр – мощность отражённого сигнала;
- спектральные параметры: средняя частота и ширина спектра;
- поляризационные параметры: дифференциальная отражаемость, дифференциальная фаза, модуль коэффициента взаимной корреляции поляризационных составляющих сигнала.

В настоящее время стали широко применяются методы многоволновых и мультипараметрических измерений, при которых используются совместные оценки выше названных параметров, полученных в разных диапазонах

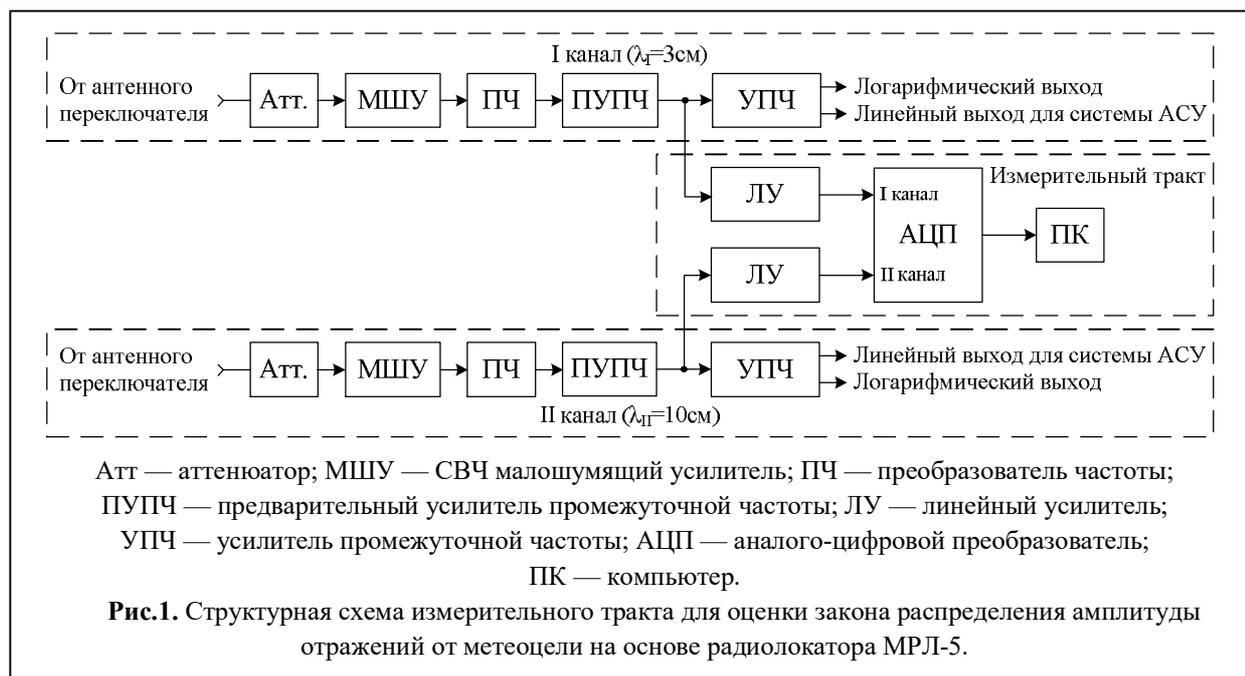
длин волн [2, 3].

Другие характеристики сигнала в существующей аппаратуре почти не используются. При этом, как видится авторам, такой параметр, как закон распределения амплитуды отражённого сигнала также потенциально может нести в себе ценную информацию.

В ряде работ, проводимых в разных странах с середины XX века, учёными были предприняты попытки связать статистические характеристики эхосигнала с микроструктурой метеобъекта [4]. Однако, в реальных системах результаты данных исследований к настоящему моменту не нашли своего применения.

Считая вопрос об оценивании распределения размеров гидрометеоров исключительно важным как в теоретическом, так и практическом аспекте, и принимая во внимание особенности технической реализации экспериментов

*Статья рекомендована программным комитетом Всероссийской конференции «Армандовские чтения»



с учётом современных возможностей аппаратуры и методов цифровой обработки сигналов, авторы настоящей статьи сочли необходимым исследовать особенности закона распределения радиолокационного сигнала, отражённого от метеообразований.

Требования к аппаратуре для проведения эксперимента

Анализ имеющихся публикаций на рассматриваемую тему (см., например [5]), и накопленный собственный опыт [6] позволяют сделать вывод о том, что авторы упомянутых исследований применяли приёмники с логарифмическим усилителем. Это объясняется отсутствием в то время линейных усилителей с динамическим диапазоном 110 дБ, позволяющих принимать отражённый метеоцелью сигнал без внесения в него искажений. В результате, анализировался случайный процесс, подвергшийся двойному нелинейному преобразованию — логарифмированию и ограничению при детектировании. Делать какие-либо выводы в таких условиях некорректно. Исходя из этого, при проведении эксперимента большое внимание было уделено выстраиванию линейного тракта прохождения сигнала и методике его обработки.

Поскольку для решения поставленной задачи в распоряжении авторов был радиолокатор МРЛ-5, не имеющий когерентного режима, оценивалось распределение не самого сигнала, а его амплитуды. Штатный приёмник МРЛ-5 имеет логарифмическую характеристику. Был построен специальный линейный усилитель, вход которого подключался к выходу предварительного усилителя промежуточной частоты, где ввиду малой величины сигнала достигался большой динамический диапазон. Однако сам линейный усилитель требуемого динамического диапазона в 110 дБ не обеспечивал, поэтому в процессе работы уровень входного сигнала регулировался посредством $r-i-n$ -диодных аттенуаторов, расположенных на входе штатного приёмника радиолокатора. Схема получившегося приёмного тракта приведена на рис. 1.

Кроме этого, исследования показали, что нелинейность реальных диодов и накопление сигнала на следующей после него RC-цепочке также искажают плотность распределения выходного случайного процесса [8]. Поэтому было решено выделять огибающую сигнала только цифровым методом [8].

Методика получения и обработки данных

Много внимания было уделено методике записи сигналов, которая проходила следующим образом:

1. На индикаторе радиолокатора выбиралась подходящая для исследования цель.
2. Антенна наводилась на неё и устанавливалась неподвижно.
3. С помощью аттенюаторов регулировался уровень выходного сигнала таким образом, чтобы его среднее значение было равно половине уровня ограничения усилителя.
4. Проводилась поимпульсная запись отражений со всех наблюдаемых дальностей в течение 6 секунд на 12-разрядном аналогово-цифровом преобразователе с частотой квантования 80 МГц.
5. Положение антенны менялось, и повторялись пункты 1–4.

Таким образом накапливалась информация от различных участков наблюдаемой метеоцели. После этого полученные записи обрабатывались в следующей последовательности:

1. Выбирались те элементы дальности, в которых мощность сигнала была не менее 10 дБ относительно уровня шума.
2. Из оставшихся элементов дальности исключались те, где число случаев ограничения сигнала превосходило 5% от общего количе-

ства отсчётов.

3. Выделялась огибающая зафиксированного случайного процесса, для чего он раскладывался на квадратурные составляющие по промежуточной частоте и вычислялся модуль получаемого комплексного числа в каждой точке квантования.

4. Полученные отсчёты амплитуды осреднялись по временному интервалу 1 мкс, равному длительности зондирующего импульса.

5. Выбирался отсчёт дальности с максимальным (близким к максимальному) значением амплитуды сигнала в области осадков.

6. Для выбранного дискрета дальности формировался вектор из 500 значений амплитуды сигнала.

7. Строилась гистограмма распределения амплитуды сигнала для этого вектора и рассчитывались её основные параметры: математическое ожидание M и дисперсия σ_x^2 .

8. Гипотеза о том, что полученный закон распределения амплитуды сигнала является законом распределения Релея проверялась по критерию согласия Пирсона.

Ниже приведён пример расчёта закона распределения амплитуды для сигнала, полученного радиолокатором МРЛ-5, установленным в п. Лехтуси (Ленинградская обл.) 11.01.2024 при зондировании снега на расстоянии 60 км

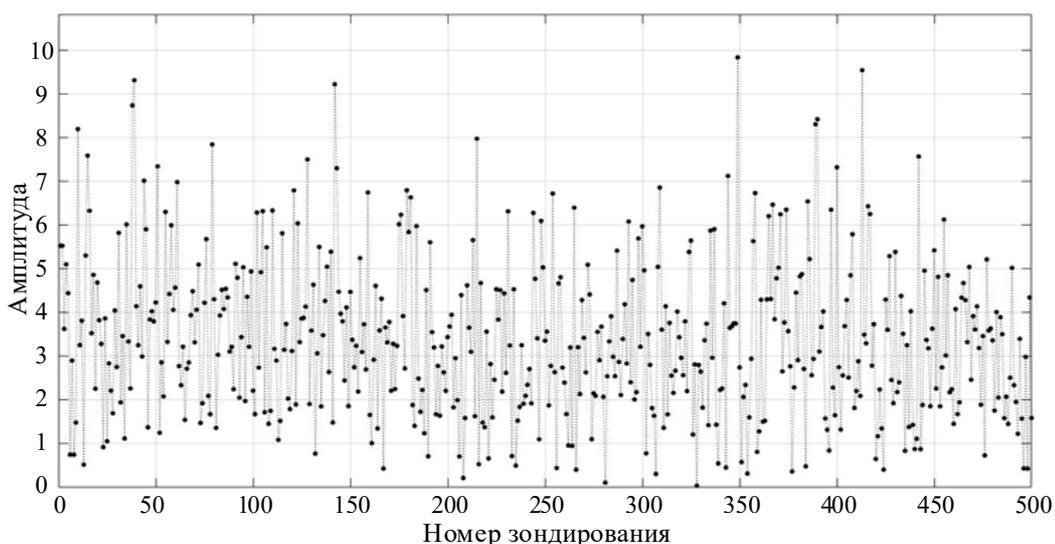


Рис. 2. Пример реализации сигнала

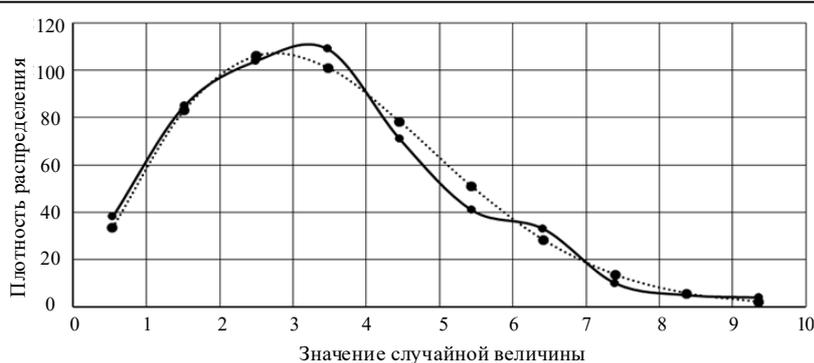


Рис. 3. Пример экспериментального (непрерывная линия) и теоретического (пунктирная линия) законов распределения для реализации сигнала, приведённого на рис. 2

при азимуте антенны 339° и угле места 0,6°.

Реализация отражённого сигнала, полученного с дальности 43,8 км, приведена на рис. 2.

Распределения амплитуды данного сигнала представлено на рис. 3. Параметры полученного закона распределения следующие: математическое ожидание $M = 3,39$, стандартное отклонение $\sigma = 1,82$. Там же приведено релейское распределение с $\sigma = 1,82$ (пунктирная линия).

Числовые характеристики полученных распределений приведены в таблице 1.

Для проверки гипотезы о том, полученное распределение релейское, используется критерий согласия Пирсона (или критерий χ^2 — «хи квадрат») [9] с критерием значимости $\alpha = 0,05$. Количество интервалов для построения распределения и для применения критерия

Таблица 1. Числовые характеристики полученных распределений для реализации сигнала, приведённого на рис. 1.

Средины интервалов	0,53	1,51	2,49	3,47	4,45	5,43	6,41	7,39	8,37	9,35
Экспериментальное распределение	38	85	104	109	71	41	33	10	5	4
Теоретическое распределение	33	83	106	101	78	51	28	13	6	2

Таблица 2. Результаты проверки гипотезы о распределении амплитуды отражений от метеообразований по закону Релея

Вид осадков	1 канал (3 см)		2 канал (10 см)	
	+	-	+	-
Снег	23	9	8	0
Мокрый снег	13	0	1	0
Ливень	16	2	6	10
Обложные осадки	14	4	14	5
Итого	66	15	29	15

χ^2 было выбрано равным 10 в соответствии с имеющимися рекомендациями [10]. Получаем значение статистического теста $\chi^2_e = 6,2$. Поскольку критическое значение $\chi^2_{крит} = 14,1$, т.е. выполняется условие $\chi^2_e < \chi^2_{крит}$, делаем вывод о том, что полученный закон распределения соответствует закону распределения Релея.

Результаты эксперимента

Всего было обработано 125 реализаций от различного вида осадков, полученных за период с 31 марта 2022 г. по 11 января 2024г.: снег, мокрый снег, обложные осадки (слоистая облачность), ливень (кучевая облачность). Сигналы фиксировались по обоим каналам радиолокатора, т.е. на длинах волн 3 и 10 см. Результаты сведены в таблицу 2, где знак «+» означает соответствие полученных данных выдвинутой гипотезе, а «-» — несоответствие.

Первый вывод, который следует из приведённой таблицы, состоит в том, что исследователи середины двадцатого века, очевидно, были правы — распределение сигнала, отражённого метеоцелью отнюдь не всегда соответ-

ствуется нормальному закону распределения, а его амплитуда, соответственно, не всегда распределена по закону Релея. Из 125 обработанных реализаций 30, т.е. 24%, проверяемой гипотезе не соответствуют. Представляет интерес распределение «несоответствующих» реализаций по видам осадков. В наибольшей степени теории отвечают осадки в виде снега, особенно мокрого, у которого в колонке «—» одни нули. В наименьшей – ливень, у которого в эту колонку попало больше половины всех реализаций. При этом у жидких осадков выходящие за рамки теории реализации имеют место в основном на длине волны 10 см, а у твёрдых — только 3 см.

Очевидно, что для повышения значимости полученных данных требуется увеличить количество обработанных реализаций. Поэтому результаты проведённого эксперимента следует рассматривать как предварительные, но позволяющие заключить, что имеет смысл продолжать исследования в данном направлении.

Заключение

При проведении данного эксперимента был учтён весь накопленный ранее опыт в проведении исследований отражённого сигнала. В результате можно утверждать, что распределение амплитуды сигнала, отражённого осадками, в абсолютном большинстве случаев имеет форму, близкую к релейской. Однако необходимо более глубоко исследовать случаи, в которых гипотеза о релейской форме закона распределения не подтвердилась, поскольку полное понимание всех особенностей статистических параметров отражённого сигнала способно, вместе с другими методами оптимизации условий наблюдения целей [11, 12], улучшить качество его обработки.

Литература

1. *Щукин Г.Г.* и др. Новые возможности радиолокационных методов метеорологического обеспечения авиации ВМФ // *Навигация и гидрография.*

2015. № 41. С. 59–67.

2. *Горелик А.Г., Коломиец С.Ф.* Радиолокационные измерения в метеорологии // *Мир измерений*, 2009. №7. С. 6–14.

3. *Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* Современные проблемы метеорологической радиолокации // *Радиотехника и электроника.* 2016. Т.61. №10. С. 927–939.

4. *Горелик А.Г., Мельничук Ю.В., Черников А.А.* Связь статистических характеристик радиолокационного сигнала с динамическими характеристиками и микроструктурой метеобъектов // *Труды ЦАО.* 1963. Вып. 48. С. 29–36.

5. *Коломиец С.Ф., Горелик А.Г.* Исследование микроструктуры рассеивающей среды при многоволновом зондировании // *Распространение радиоволн: Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции.* В 2-х т., Казань, 01–06 июля 2019 года. Казань: КФУ. 2019. С. 286–289.

6. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* Экспериментальные исследования распределения амплитуды отражений от метеобразований // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского.* 2022. №685. С. 92–99.

7. *Жуков В.Ю., Денисенков Д.А., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г.* Исследование распределения плотности вероятности отражений от осадков на базе радиолокатора МРЛ-5 // *Всероссийские открытые Армандовские чтения*, Муром, 28–30 мая 2019 года. Муром: МИ ВлГУ, 2019. С. 285–290.

8. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю.* О распределении амплитуды радиолокационных отражений от дождевых облаков // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы.* 2023. № 3(51). С. 5–11.

9. *Севастьянов Б.А.* Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1982. 256 с.

10. *Лемешко Б.Ю., Чимитова Е.В.* О выборе числа интервалов в критериях согласия типа χ^2 // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2003. Т. 69, №1. С. 61–67.

11. *И.А. Готтор* и др. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета.* 2013. №32. С. 66–83.

12. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* Оптимизация условий наблюдения целей в современном метеорологическом радиолокаторе // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы.* 2019. №1(33). С. 27–35.

Поступила 19 марта 2025 г.

English

THE LAW OF REFLECTION DISTRIBUTION FROM A METEOROLOGICAL TARGET AS A CRITERION FOR ITS IDENTIFICATION

Dmitriy Anatolievich Denisenkov — PhD in Physics and Mathematics, Senior Lecturer, Department of Technologies and Means of Geophysical Support, Mozhaisky Military Space Academy¹.

Vladimir Yuryevich Zhukov — Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University².

E-mail: yka@mil.ru

¹Address: 197198, Russian Federation, Saint-Petersburg, Zdanovskaya str., 13.

²Address: 192007, Russian Federation, Saint-Petersburg, Voronezhskaya str., 79.

Abstract: The capabilities of modern meteorological radar equipment and digital processing algorithms allow for further research into the statistical characteristics of echo signals, a field that originated in the late 1950s. These studies aim to establish connections between signal properties and the microstructure of meteorological objects. At that time, research was primarily theoretical, as conducting high-quality experiments was extremely challenging due to the technical limitations of early radar systems. This paper presents the results of an experimental study on the amplitude distribution of radar reflections from various types of precipitation. The experiment was conducted intermittently between 2022 and 2024 using an MRL-5 radar located 30 km north of St. Petersburg. In preparation for the study, the authors addressed several technical challenges, including upgrading the radar receiver with a linear measurement path and developing a dedicated signal processing algorithm. As a result, the amplitude distribution laws of signals reflected by different precipitation types—snow, sleet, stratiform (layered cloud) precipitation, and rain (convective cloud) precipitation—were investigated at wavelengths of 3 cm and 10 cm. Out of 125 processed signal samples, 30 showed deviations from the hypothesized distribution model. Notably, snowfall exhibited the closest agreement with the widely accepted Rayleigh distribution model for meteorological targets, whereas rainfall displayed the least conformity. This discrepancy warrants further investigation.

Keywords: meteorological radar, statistical processing, law of signal amplitude distribution, remote sensing, radar MRL-5.

References

1. *Shchukin G.G.* et al. New possibilities of radar methods for meteorological support of naval aviation. *Navigation and Hydrography*. 2015. No. 41. Pp. 59–67.
2. *Gorelik A.G., Kolomiyets S.F.* Radar measurements in meteorology. *World of Measurements*. 2009. No. 7. Pp. 6–14.
3. *Zhukov V.Yu., Shchukin G.G.* Current problems of meteorological radar. *Radio Engineering and Electronics*. 2016. Vol. 61, No. 10. Pp. 927–939.
4. *Gorelik A.G., Melnichuk Yu.V., Chernikov A.A.* Relationship between statistical characteristics of radar signals and dynamic characteristics with microstructure of meteorological objects. *Proc. of the Central Aerological Observatory*. 1963. Issue 48. Pp. 29–36.
5. *Kolomiyets S.F., Gorelik A.G.* Study of the microstructure of a scattering medium in multi-wave sounding. *Radio Wave Propagation: Proceedings of the XXVI All-Russian Open Scientific Conference*. In 2 volumes. Kazan, July 1–6, 2019. Kazan: KFU. 2019. Pp. 286–289.
6. *Denisenkov D.A., Zhukov V.Yu., Shchukin G.G.* Experimental studies of the amplitude distribution of reflections from meteorological formations. *Proc. of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2022. No. 685. Pp. 92–99.
7. *Zhukov V.Yu., Denisenkov D.A., Kuleshov Yu.V., Shchukin G.G.* Study of the probability density distribution of precipitation echoes based on the MRL-5 radar. *All-Russian Open Armandov Readings*. Murom, May 28–30, 2019. Murom: MI VISU. 2019. Pp. 285–290.
8. *Denisenkov D.A., Zhukov V.Yu.* On the amplitude distribution of radar reflections from rain clouds. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2023. No. 3(51). Pp. 5–11.
9. *Sevastyanov B.A.* *Course on Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow: Nauka, Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature, 1982. 256 pp.
10. *Lemeshko B.Yu., Chimitova E.V.* On the choice of the number of intervals in χ^2 -type goodness-of-fit tests. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2003. Vol. 69, No. 1. Pp. 61–67.
11. *Gotur I.A.* et al. Information capabilities of dual-polarization Doppler weather radars. *Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2013. No. 32. Pp. 66–83.
12. *Denisenkov D.A., Zhukov V.Yu., Shchukin G.G.* Optimization of observation conditions for targets in modern meteorological radar. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2019. No. 1(33). Pp. 27–35.