

# Дистанционное зондирование сред

DOI 10.24412/2221-2574-2023-3-5-11

УДК 551.501.815

## О РАСПРЕДЕЛЕНИИ АМПЛИТУДЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКОВ

**Жуков Владимир Юрьевич**

доктор физико-математических наук, старший преподаватель кафедры технологий и средств геофизического обеспечения ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ (ВКА им. А.Ф. Можайского);

E-mail: [vuzhukov2002@list.ru](mailto:vuzhukov2002@list.ru)

**Денисенков Дмитрий Анатольевич**

кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры технологий и средств геофизического обеспечения ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ (ВКА им. А.Ф. Можайского).

E-mail: [dimasden@yandex.ru](mailto:dimasden@yandex.ru)

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

**Аннотация:** В статье приводятся результаты эксперимента по изучению закона распределения амплитуды отражений от метеорологических целей, проведённого при помощи радиолокатора МРЛ-5 в разные месяцы 2022 года. Данное исследование было инициировано вследствие появления ряда работ, в которых ставилось под сомнение то, что амплитуда отражений от осадков распределена по закону Релея. После неоднократных попыток авторов провести данный эксперимент при помощи штатных средств радиолокатора МРЛ-5, была разработана схема линейного измерительного тракта с быстродействующим аналого-цифровым преобразователем, использование которой с последующим цифровым детектированием и статистической обработкой полученных отражений позволило избежать нелинейных операций над сигналом, которые ранее приводили к искажениям исходного распределения. При помощи данной схемы был набран большой ряд статистических данных, по которым проводилась проверка с использованием критерия согласия Пирсона (или критерий  $\chi^2$  — «хи квадрат») о предположении Релеевской формы закона распределения амплитуды отражений от осадков. В результате эксперимента проанализировано 58 выборок сигналов, отражённых от осадков различного фазового состояния, принятых по каналам с длинами волн 3 и 10 см под разными углами места установки антенны радиолокатора МРЛ-5, установленного в 30 км севернее Санкт-Петербурга. В 51 случае было зафиксировано соответствие исследуемого закона распределения амплитуды сигнала закону распределения закону Релея. В нескольких случаях гипотеза о релеевской форме исследуемого закона распределения не подтвердилась. Данные случаи требуют отдельного исследования.

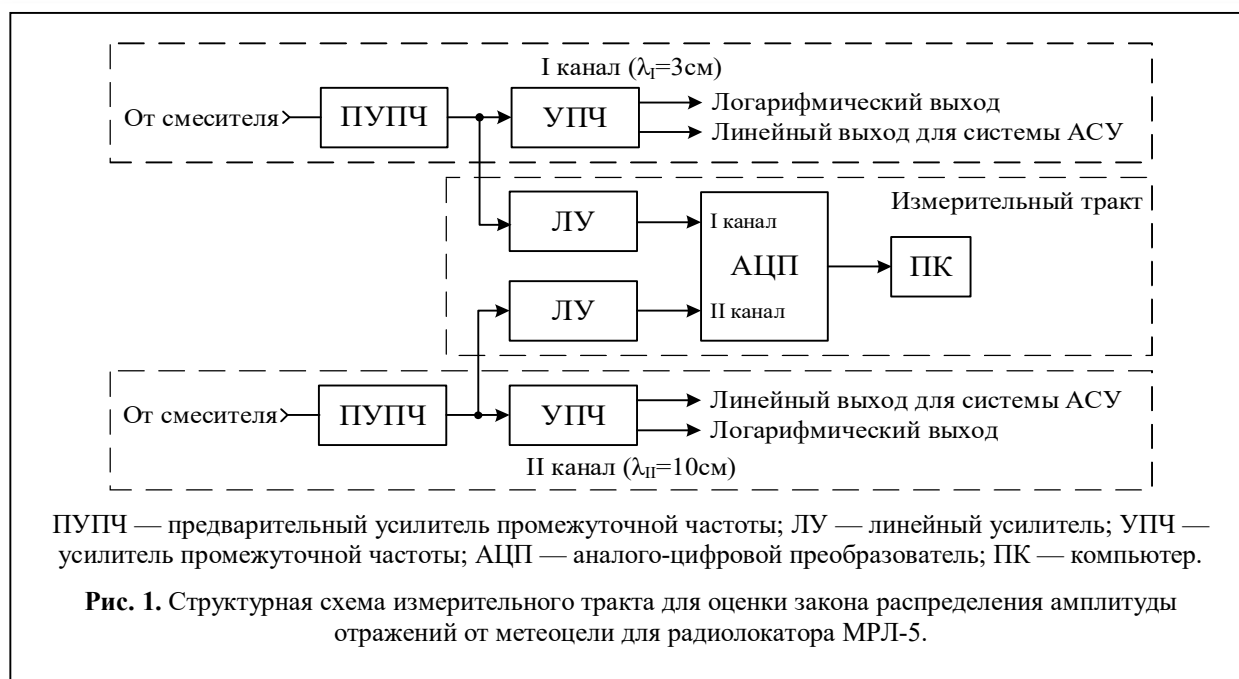
**Ключевые слова:** метеорологическая радиолокация, статистическая обработка, закон распределения амплитуды сигнала, дистанционное зондирование атмосферы, радиолокатор МРЛ-5.

### Введение

Современные системы обработки информации метеорологических радиолокаторов строятся в предположении о нормальном распределении принимаемого сигнала. Такой вывод делается на основании центральной предельной теоремы теории вероятности, т.к. данный сигнал является суммой большого количества отражений от элементарных отражателей, попавших внутрь разрешаемого объёма радиолокатора. Однако

некоторые экспериментальные данные, полученные на начальном пути развития радиометеорологии, позволяют усомниться в подобном выводе [1, 2]. Основанием для этого служат оценки распределения амплитуды сигнала на выходе логарифмического приёмника. В первую очередь это отрицательная асимметрия получаемых гистограмм.

Следует согласиться, что подобных фактов вполне достаточно для скепсиса в отношении



упомянутого предположения. С другой же стороны делать какие-либо далеко идущие выводы о параметрах случайного процесса на основании анализа того, во что он превратился после двух нелинейных преобразований — логарифмирования и детектирования — несколько опрометчиво.

Сложившаяся ситуация вынуждает к проведению эксперимента по исследованию плотности распределения отражений от метеообразований на основе технических средств, отсутствующих у исследователей середины прошлого века. К ним, прежде всего, относятся доплеровские радиолокаторы, позволяющие исследовать распределение не амплитуды, а самого сигнала непосредственно. Однако этим преимуществом авторам воспользоваться не удалось ввиду отсутствия в их распоряжении радиолокатора с когерентным режимом работы. Зато было использовано второе преимущество современности — многоразрядные аналого-цифровые преобразователи с большим быстродействием. Они позволили оценить амплитуду сигнала в цифровом виде, т.е. реализовать идеальную функцию детектирования в отличие от реальных детекторов, вносящих дополнительные искажения в результаты наблюдений.

### Основная часть

После неоднократных попыток авторов [3] провести эксперимент по изучению закона распределения амплитуды сигнала на выходе логарифмического приёмника метеорологического радиолокатора на основе МРЛ-5 была разработана следующая схема получения экспериментальных данных [4, 5] (рис.1).

Использование данной схемы позволило, во-первых, сохранить полную работоспособность штатного приёмного тракта радиолокатора и, во-вторых, реализовать измерение интересующего параметра при помощи линейного измерительного тракта с быстродействующим аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

Сохранение работоспособности штатного приёмного тракта радиолокатора обеспечило возможность обнаружения области осадков при помощи индикатора обзора МРЛ-5, а использование 12 разрядного двухканального АЦП с частотой дискретизации  $f_d = 80$  МГц позволило оцифровывать на промежуточной частоте принятые по двум каналам (длины волн 3 и 10 см) сигналы для последующих цифрового детектирования и статистической обработки.

Всего было обработано более 50 выборок отражённого от осадков сигнала, полученных 31.03, 25.04, 06.08 и 12.12.2022. Брались только

отражения с дальностей, превышающих 20 км для того, чтобы избежать влияния местников.

Запуск АЦП производился в момент излучения зондирующего импульса, после чего набирались данные в виде 65500 отсчётов отражённого сигнала на каждый зондирующий импульс для 500 последовательных зондирующих импульсов, следующих с частотой 500 Гц. В результате формировался массив данных в виде ряда значений, перекрывающих диапазон дальностей от 0 до 122 км. Далее эти данные поступали в компьютер, где реализовывалось идеальное линейное детектирование сигнала. Для этого сперва сигнал смещался в область нулевых частот путём перемножения поступающих данных на  $\sin(\omega_{\text{пр}})$  и  $\cos(\omega_{\text{пр}})$ , где  $\omega_{\text{пр}}$  — промежуточная частота приёмника, равная 30 МГц, и затем усреднялся на временном интервале 1 мкс, соответствующем длительности излучаемого импульса. Таким образом, выделялись низкочастотные компоненты двух получаемых в результате указанного перемножения квадратур. Далее вычислялся модуль сигнала в каждый момент времени в соответствии с формулой

$$S_i = \sqrt{S_{\sin i}^2 + S_{\cos i}^2}, \quad (1)$$

где  $S_i$  — мгновенное значение амплитуды протектированного сигнала;  $S_{\sin i}$ ,  $S_{\cos i}$  — синусная и косинусная компоненты сигнала, полученные после фильтрации.

Далее проводилась статистическая обработка полученных значений  $S_i$  для каждого приёмного канала в следующей последовательности:

1) Выделялась область осадков на основе анализа ансамбля из 500 реализаций развёртки во времени протектированного сигнала и выбирался отсчёт дальности  $N_d$  с максимальным (близким к максимальному) значением амплитуды сигнала в этой области.

2) Формировался вектор из 500 значений для этого дискрета дальности  $N_d$ .

3) Строилась гистограмма распределения амплитуды сигнала для этого вектора и рассчитывались её основные параметры: математическое ожидание  $m$  и дисперсия  $\sigma_x^2$ .

4) Используя критерий согласия Пирсона проверялась гипотеза о том, что полученный закон распределения амплитуды сигнала является законом распределения Релея.

Ниже представлен пример расчёта закона распределения амплитуды для сигнала, полученного радиолокатором МРЛ-5, установленным в п. Лехтуси (Ленинградская обл.) 06.08.2022 при зондировании дождя на расстоянии 55-60 км при азимуте антенны  $295^\circ$  и угле места  $2,5^\circ$ .

Пример сигнала в виде ансамбля из 500 реализаций развёртки во времени протектированного сигнала 1-го канала, полученного в результате измерения, представлен на рис. 2. Реализация сигнала с дальности 57 км (что соот-

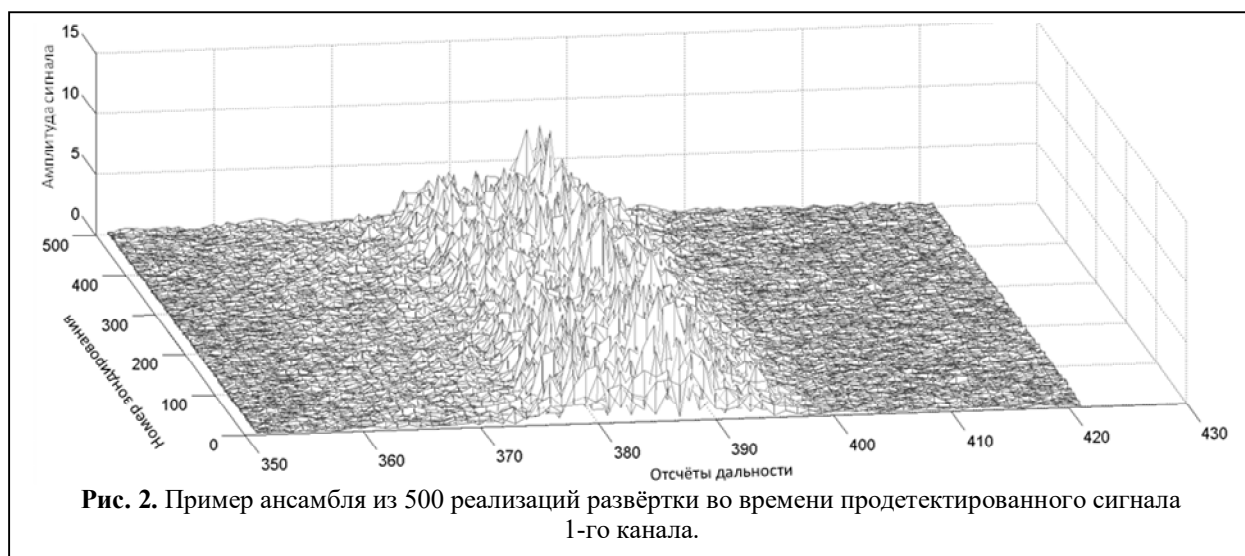


Рис. 2. Пример ансамбля из 500 реализаций развёртки во времени протектированного сигнала 1-го канала.

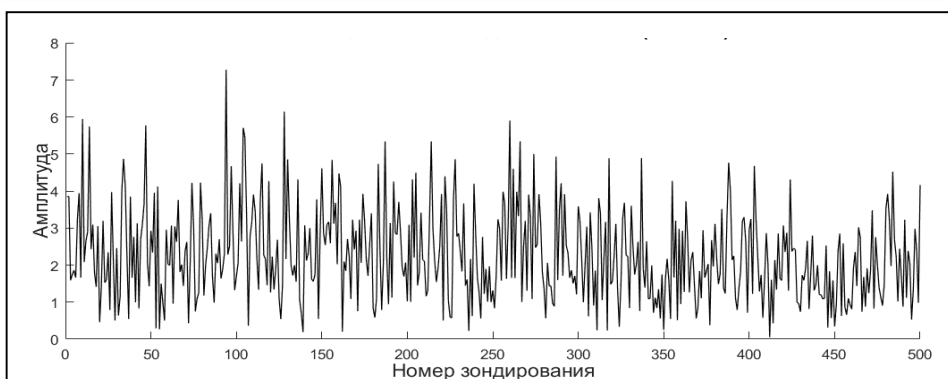


Рис. 3. Пример реализации сигнала с дальности 57 км (что соответствует дискрету дальности 380) для ансамбля, приведённого на рис. 2

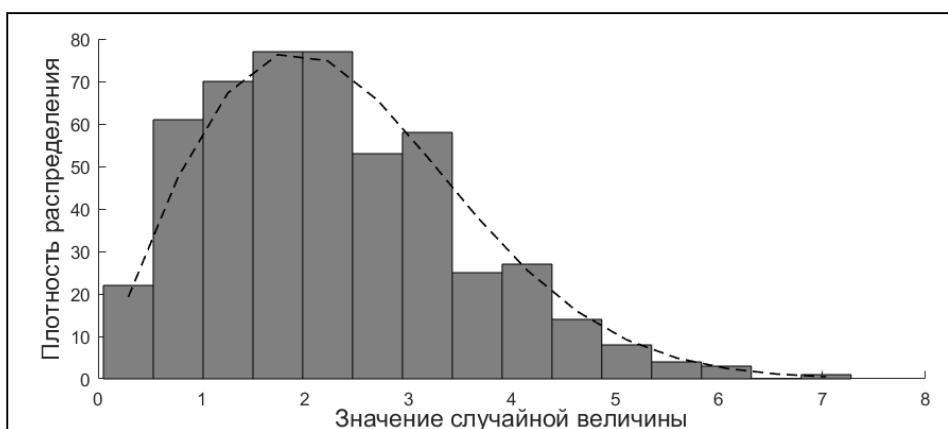


Рис. 4. Пример экспериментального (гистограмма) и теоретического (пунктирная линия) законов распределения для реализации сигнала, приведённого на рис. 3

ветствует дискрету 380) приведена на рис. 3. Закон распределения амплитуды для данного сигнала представлен на рис. 4 в виде гистограммы. Количество интервалов для построения гистограммы  $N = 15$  было выбрано согласно рекомендациям, представленным в работе [6]. Параметры полученного закона распределения следующие: математическое ожидание  $m = 2,2597$ , стандартное отклонение  $\sigma = 1,2452$ . Также на рис. 4 представлен теоретически рас-

пределения Релея.

В результате эксперимента было обработано 58 выборок сигналов, отражённых от осадков различного вида, принятых по двум каналам (длины волн 3 и 10 см) радиолокатора МРЛ-5 в разное время года под разными углами места установки антенны. В 51 измерении полученный закон распределения амплитуды сигнала соответствовал закону распределения Релея.

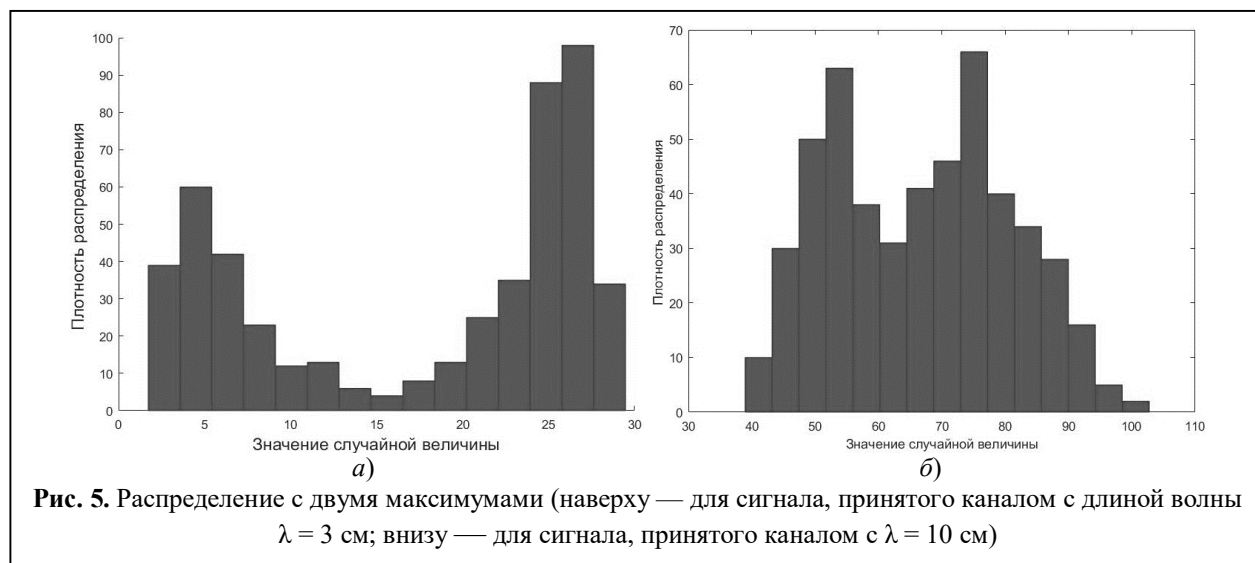
В семи оставшихся случаях шесть имеют

считанный закон распределения Релея с  $\sigma = 1,2452$  (пунктирная линия).

Для проверки гипотезы о том, что полученный закон распределения амплитуды сигнала является законом распределения Релея используется критерий согласия Пирсона (или критерий  $\chi^2$  — «хи квадрат») [7] с критерием значимости  $\alpha = 0,05$ . При критическом значении  $\chi^2_{\text{крит}} = 19,6$  полученное значение статистического теста —  $\chi^2_e = 12,3$ . Поскольку  $\chi^2_e < \chi^2_{\text{крит}}$ , делаем вывод о том, что полученный закон распределения соответствует закону

Таблица 1. Числовые характеристики полученных законов распределения для реализации сигнала, приведённого на рис. 3.

Середины интервалов	0,29	0,77	1,26	1,74	2,22	2,70	3,18	3,67	4,15	4,63	5,11	5,59	6,07	6,56	7,04
Экспериментальное распределение	21	61	70	77	77	53	58	25	27	14	8	4	3	0	1
Теоретическое распределение	19	48	67	76	75	66	52	38	26	16	9	5	2	1	0



форму, более соответствующую нормальному закону распределения. Из теории [8] известно, что так происходит при добавлении в сигнал неслучайной составляющей. За таковую в нашем случае логично принять отражения от точечной цели с достаточно узким спектром, чтобы на интервале наблюдения его можно было считать постоянным. Поскольку измерения проводились специально на расстояниях, исключающих влияние местных предметов, остается предположить, что данный эффект вызван попаданием в луч радиолокатора воздушного судна. Это объяснение выглядит достаточно логично с учётом того, что аэропорт Пулково расположен менее, чем в пятидесяти километрах от радиолокатора.

Наибольший интерес представляют случаи наблюдения, при котором получены распределения с двумя максимумами. На рис. 5 представлены результаты, полученные в одном и том же элементе разрешения в обоих каналах радиолокатора (с длиной волны 3 и 10 см).

Списать данные эпизоды на какие-либо неполадки аппаратуры не представляется возможным ввиду того, что они имеют место только в одном элементе разрешения. При этом в смежных с ними по дальности элементах ничего подобного не наблюдается. Особенным подтверждением реальности наблюдаемой аномалии является её наблюдение сразу в

двух каналах. Найти какое-либо рациональное объяснение данному случаю пока не удалось.

### 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 релейевскому. Однако необходимо более глубоко исследовать случаи, в которых гипотеза о релейевской форме закона распределения не подтвердилась. Однако необходимо более глубоко исследовать случаи, в которых гипотеза о релейевской форме закона распределения не подтвердилась, поскольку полное понимание всех особенностей статистических параметров отражённого сигнала способно вместе с другими методами оптимизации условий наблюдения целей [9, 10] улучшить качество его обработки.

*Статья подготовлена на основе доклада на конференции «Всероссийские открытые Арmandовские чтения — 2023». Рекомендована к опубликованию Программным комитетом.*

### Литература

1. Горелик А.Г., Денисенков Д.А., Коломиец С.Ф. Распределение флуктуаций огибающей при обрат-

ном рассеянии простого радиоимпульса на частицах разреженных сред // Научный Вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2017. Т.20, №6. С 164–172.

2. Коломиец С.Ф., Горелик А.Г. Исследование микроструктуры рассеивающей среды при многоволновом зондировании // 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.

3. Исследование распределения плотности вероятности отражений от осадков на базе радиолокатора МРЛ-5 / В.Ю. Жуков [и др.] // Всероссийские открытые Армадовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн, Муром, 28–30 мая 2019 года. Муром: МИ ВлГУ. 2019. С. 285–290.

4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Экспериментальные радиолокационные исследования распределения амплитуды отражений от метеорообразований // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 92–99.

5. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Исследование

статистических характеристик эхо-сигнала от метеорообразований // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции, Муром, 27 – 29 июня 2023 года. Муром: МИ ВлГУ. 2023. С. 444–448.

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

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

8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

9. 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.

10. Пальгужев Д.А., Пархачев В.В., Пиунов К.Н. [и др.] Распознавание воздушных объектов типа "птицы" по траекторным признакам // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. № 4(48). С. 39–50.

Поступила 26 июля 2023 г.

English

## ON THE AMPLITUDE DISTRIBUTION OF RADAR REFLECTIONS FROM RAIN CLOUDS

**Vladimir Yuryevich Zhukov** — Grand Dr. in Physics and Mathematics, senior lecturer; Department of Technologies and Means of Geophysical Support; Mozhaisky Military Space Academy.

E-mail: [yuzhukov2002@list.ru](mailto:yuzhukov2002@list.ru)

**Dmitriy Anatolievich Denisenkov** — PhD, lecturer; Department of Technologies and Means of Geophysical Support; Mozhaisky Military Space Academy.

E-mail: [dimasden@yandex.ru](mailto:dimasden@yandex.ru)

Address: 197198, Russian Federation, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13.

**Abstract:** The article presents research test results of the amplitude distribution law for meteorological targets' return by using MRL-5 radar in different months of 2022. This research was triggered due to occurrence of a number of articles that questioned the fact that precipitation return amplitude is distributed according to Rayleigh's law. After repeated attempts by the authors to conduct this test using the authorized equipment of MRL-5 radar there was developed a circuit of a linear measuring pathway with a high-speed analog-to-digital converter, the use of which with subsequent digital detection and statistical treatment of received return enabled to avoid nonlinear operations on the signal that previously caused distortions of the primary distribution. A big number of statistical data were collected using the circuit upon which a verification was performed via Pearson criterion (or  $\chi^2$  criterion = chi square criterion) on the assumption of the Rayleigh law model of amplitude distribution for precipitation return. The test resulted in analyzing 58 signal samples reflected from precipitations of different phase state, received through channels with 3 and 10 cm wavelengths with various elevation angles for MRL-5 radar installation site, located 30 km north of St. Petersburg. 51 instances stated conformity of the investigated law for signal amplitude distribution with Rayleigh's distribution law. A number of instances did not confirm the hypothesis about investigated Rayleigh law model of distribution. These instances require a further research.

**Keywords:** weather radar, statistical treatment, signal amplitude distribution law, atmospheric remote sensing.

### References

1. *Gorelik A.G., Denisenkov D.A., Kolomiets S.F.* Distribution of envelope fluctuations during reverse scattering of a simple radio pulse on particles of rarefied media. Civil Aviation High Technologies (Nauchnyi Vestnik MGTU GA). 2017. Vol.20, No. 6. Pp. 164–172.
2. *Kolomiets S.F., Gorelik A.G.* Investigation of the microstructure of a scattering medium during multi-wave sounding. Propagation of radio waves: Proceedings of the XXVI All-Russian Open Scientific Conference. In 2 volumes, Kazan, July 01-06, 2019. Kazan: Kazan (Volga Region) Federal University. 2019. Pp. 286–289.
3. Investigation of the probability density distribution of reflections from precipitation based on the radar MRL-5 / *V.Yu. Zhukov* [et al.]. All-Russian open Armand readings: Modern problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of waves, Murom, May 28–30, 2019. Murom: MI VISU. 2019. Pp. 285–290.
4. *Denisenkov D.A., Zhukov V.Yu., Shchukin G.G.* Experimental radar studies of the amplitude distribution of reflections from meteorological formations. Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy. 2022. 2022. No. S685. Pp. 92–99.
5. *Denisenkov D.A., Zhukov V.Yu.* Investigation of statistical characteristics of an echo signal from meteorological formations. Modern problems of remote sensing, radar, propagation and diffraction of waves. Materials of the All-Russian Open Scientific Conference, Murom, June 27–29, 2023. Murom: MI VISU. 2023. Pp. 444–448.
6. *Lemeshko B.Yu., Chimitova E.V.* On the choice of the number of intervals in the criteria of agreement of type  $\chi^2$ . Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. 2003. Vol. 69. No. 1. Pp. 61–67.
7. *Sevastyanov B.A.* Course of probability theory and mathematical statistics. Moscow: Nauka, 1982. 256 p.
8. *Levin B.R.* Theoretical foundations of statistical radio engineering. Moscow: Radio i Svyaz', 1989. 656 p.
9. *Denisenkov D.A., Zhukov V.Yu., Shchukin G.G.* Optimization of target observation conditions in a modern meteorological radar. Radioengineering and telecommunication systems. 2019. No. 1(33). Pp. 27–35.
10. *Palguyev D.A., Parkhachev V.V., Piunov K.N.* [et al.] Recognition of aerial objects of the "bird" type by trajectory signs. Radioengineering and telecommunication systems. 2022. No. 4(48). Pp. 39–50.