

## **Исследование статистических характеристик эхо-сигнала от метеообразований**

В.Ю. Жуков<sup>1</sup>, Д.А. Денисенков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского  
197198 г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.  
E-mail: [yka@mil.ru](mailto:yka@mil.ru)

*Представлены результаты эксперимента по изучению закона распределения амплитуды отражений от метеорологических целей, полученных в разные дни в течение 2022г. с помощью радиолокатора МРЛ-5. Описывается методика обработки данных. Приводится структурная схема измерительного тракта. Делается вывод, что распределение амплитуд сигнала, отраженного осадками, имеет форму, близкую к релевской.*

*Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, закона распределения амплитуды сигнала, дистанционное зондирование атмосферы*

## **Compensation of contact potential difference in electrostatic fluxmeters**

V.Y. Zhukov<sup>1</sup>, D.A. Denisenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Mozhaisky Military Aerospace Academy.*

*The results of the experiment on studying the law of distribution of the amplitude of reflections from meteorological targets, obtained on different days during 2022 by the MRL-5 radar are presented. The data processing technique is described. The structural diagram of the measuring circuit is given. It is concluded that the distribution of signal amplitudes reflected by precipitation has a shape close to the Rayleigh one.*

*Keywords: meteorological radar, signal amplitude distribution law, remote sensing of the atmosphere*

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

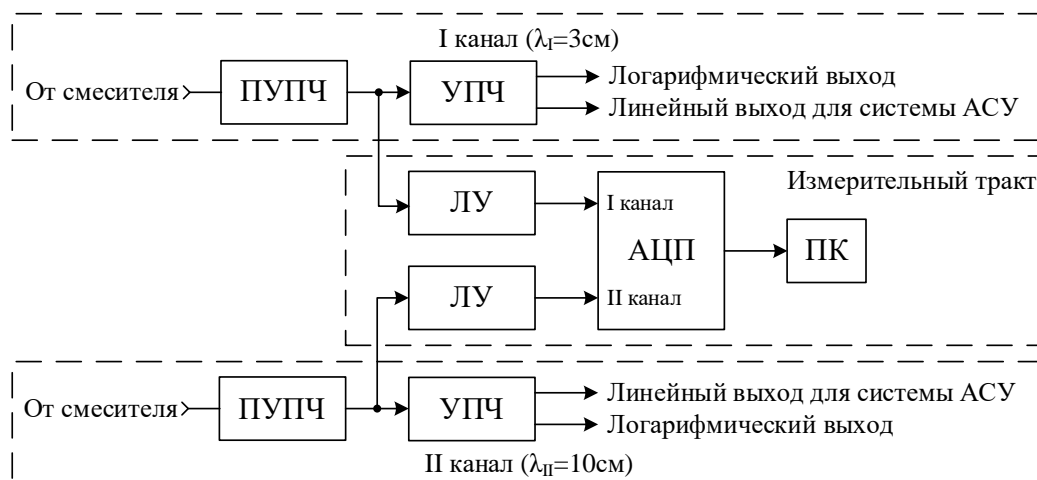
Следует согласиться, что подобных фактов вполне достаточно для скепсиса в отношении упомянутого предположения. С другой же стороны делать какие-либо далеко идущие выводы о параметрах случайного процесса на основании анализа того, во что он превратился после двух нелинейных преобразований – логарифмирования 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 аналогово-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 приемника метеорологического радиолокатора на основе МРЛ-5 была разработана следующая схема получения экспериментальных данных [4] (рис.1).



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

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

.....  
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 отраженного 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 отсчетов отраженного 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 путем перемножения поступающих данных на  $\sin\omega_{\text{пр}}$  и  $\cos\omega_{\text{пр}}$ , где  $\omega_{\text{пр}}$  – промежуточная частота приемника, 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 развертки во времени протектированного сигнала и выбирался отсчет 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 ее 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 расчета 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° и угле места 2,5°.

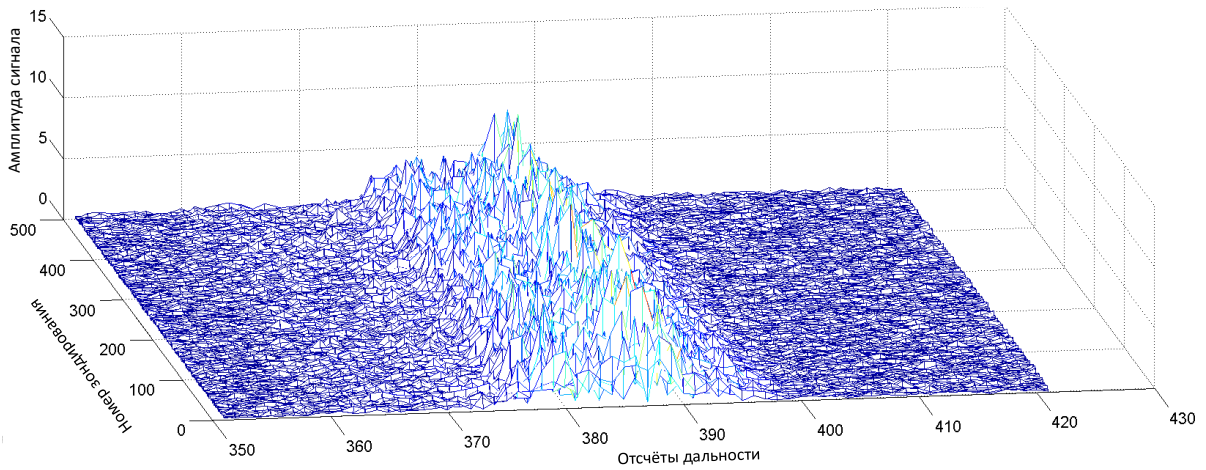
Пример сигнала в виде ансамбля из 500 реализаций развертки во времени протектированного сигнала 1-го канала, полученного в результате измерения, представлен на рис.2. Реализация сигнала с дальности 57 км (что соответствует дискрету 380) приведена на рис.3. Закон распределения амплитуды для данного сигнала представлен на рис.4 в виде гистограммы. Параметры полученного закона распределения следующие: математическое ожидание  $m=2.2597$ , стандартное отклонение  $\sigma=1.2452$ . Также на рис.4 представлен теоретически рассчитанный закон распределения Рэлея с  $\sigma=1.2452$  (пунктирная линия).

Числовые характеристики полученных законов распределения приведены в табл.1.

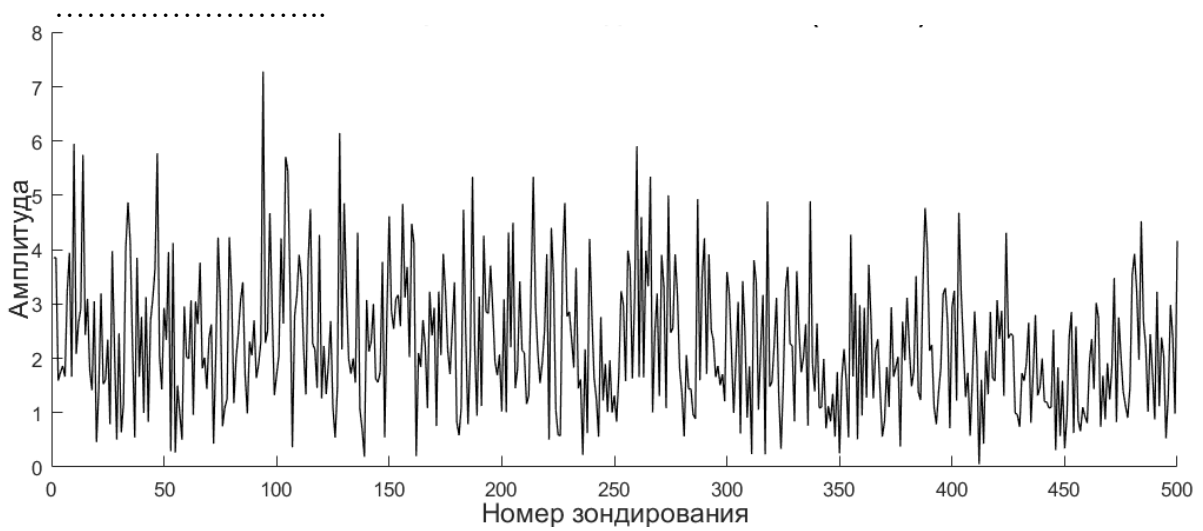
**Таблица 1. Числовые характеристики полученных законов распределения для реализации сигнала, приведённого на рис.3.**

Средины 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
Эксперимент. распределение	21	61	70	77	77	53	58	25	27	14	8	4	3	0	1
Теоритическое распределение	19	48	67	76	75	66	52	38	26	16	9	5	2	1	0

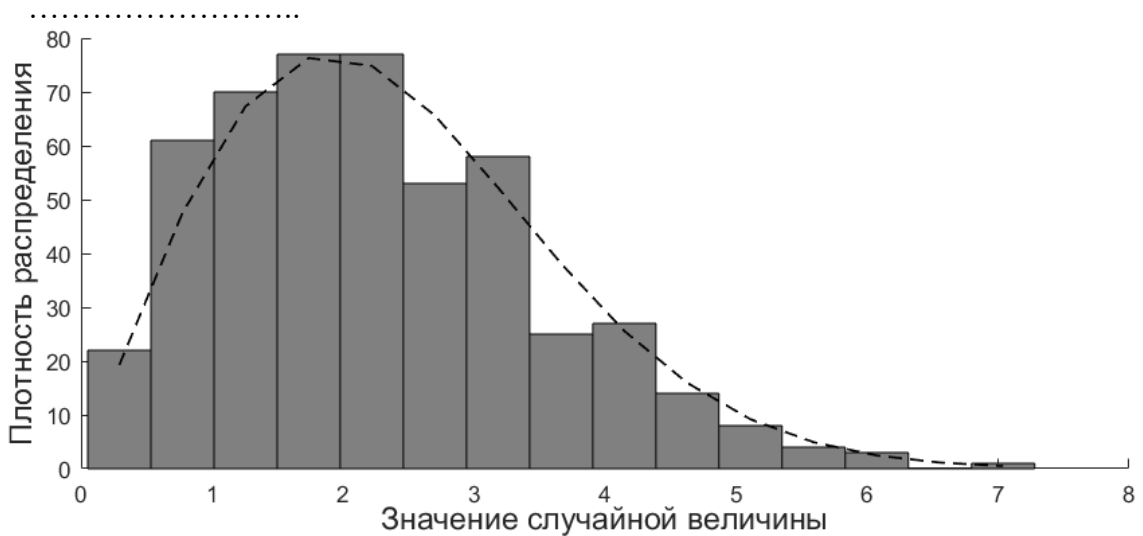
.....



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



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



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

.....  
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») [5] с критерием значимости  $\alpha=0,05$ . При критическом значении  $\chi^2_{\text{крит}}=19,6$  полученное значение статистического теста  $\chi^2_{\text{е}}=12,3$ . Поскольку  $\chi^2_{\text{е}} < \chi^2_{\text{крит}}$  делаем вывод о том, что полученный закон распределения соответствует закону распределения Релея.

В результате эксперимента было обработано 58 выборок сигналов, отраженных 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.

### **Выводы**

При проведении данного эксперимента был учтен весь накопленный ранее опыт в проведении исследований отраженного сигнала. В результате можно утверждать, что распределение амплитуд сигнала, отраженного осадками, в абсолютном большинстве случаев имеет форму, близкую к релейскому. Однако необходимо более глубоко исследовать случаи, в которых гипотеза о релейской форме исследуемого закона распределения не подтвердилась.

### **Литература**

1. Горелик А.Г., Денисенков Д.А., Коломиец С.Ф. Распределение флуктуаций огибающей при обратном рассеянии простого радиоимпульса на частицах разреженных сред // 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.
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. EDN KAOPUV.
3. Жуков В.Ю., Денисенков Д.А., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. Исследование распределения плотности вероятности отражений от осадков на базе радиолокатора МРЛ-5 // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн, Муром, 28–30 мая 2019 года. Муром: Муромский институт (филиал) Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых". 2019. С. 285-290. EDN OMHTDZ.
4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Экспериментальные Радиолокационные исследования распределения амплитуды отражений от метеообразований // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2022. № S685. С. 92-99. EDN ZKQRRQ.
5. Севастьянов, Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 256 с.