

О распределении отражений от различных видов осадков

Д.А. Денисенков¹, В.Ю. Жуков¹

¹ Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
197198 г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13/
E-mail: vka@mil.ru, dimasden@yandex.ru

Продолжены исследования закона распределения радиолокационного сигнала, отраженного от метеообразований. Описываются требования, применявшиеся к аппаратуре, методика набора данных и их последующей обработки. Приводятся результаты наблюдения различного вида осадков - снега, мокрого снега, обложных осадков, ливня – на трех и десяти сантиметровом каналах радиолокатора МРЛ-5.

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

To the issues of distribution of reflections from different types of precipitation

Denisenkov¹ D.A., Zhukov¹ V.Y.

¹ *Mozhaisky Military Space Academy.*

Studies of the distribution law of the radar signal reflected from meteorological formations are continued. The requirements applied to the instrumentation, the methodology of data acquisition and their subsequent processing are described. The results of observation of different types of precipitation - snow, wet snow, cover precipitation, heavy rain - on three and ten centimeter channels of the MRL-5 radar are given.

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

Введение

Появление настоящего доклада инициировано появившимися одно время в печати заявлениями о том, что с помощью оценок плотности распределения радиолокационного сигнала, отраженного от осадков, можно восстановить распределение капель по размерам. В частности, это утверждается в статье [1]. При этом авторы ссылаются на результаты экспериментов, проводимых в середине двадцатого века, находя подтверждение своим идеям в том, что получаемые распределения амплитуд принимаемого радиолокатором сигнала имеют отрицательную асимметрию

Считая вопрос об оценивании распределения размеров гидrometeopов исключительно важным как в теоретическом, так и практическом аспекте, и принимая во внимание особенности технической реализации экспериментов в упомянутом временном интервале, авторы настоящей статьи сочли необходимым проверить выдвинутую гипотезу с помощью современной аппаратуры.

1. Требования к аппаратуре и методике эксперимента.

Прежде всего, следует отметить, что в середине двадцатого века не существовало линейных усилителей с большим динамическим диапазоном порядка 110 дБ, которые на современном этапе развития являются необходимым условием наблюдения метеоцелей. Поэтому применялись, как правило, логарифмические усилители. Это приводило к тому, что анализировался случайный процесс, подвергшийся двойному нелинейному

преобразованию – логарифмированию и ограничению при детектировании. Делать какие-либо экстраординарные выводы на их основании некорректно. Исходя из этого при проведении эксперимента много внимания было уделено выстраиванию тракта прохождения сигнала и методике его обработки.

Используемый для решения поставленной задачи радиолокатор (МРЛ-5) не имеет когерентного режима, что приводит к необходимости оценивать распределение не самого сигнала, а его амплитуды. Его штатный приемник имеет логарифмическую характеристику, из-за чего пришлось построить 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 р-і-п-диодных аттенуаторов, расположенных на входе штатного приемника радиолокатора.

Кроме этого, исследования показали, что нелинейность реальных диодов и накопление сигнала на следующей после него RC-цепочке также искажают плотность распределения выходного случайного процесса [2]. Поэтому было решено выделять огибающую сигнала только цифровым методом [3].

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

1. На индикаторе радиолокатора выбиралась подходящая для исследования цель.
2. Антенна наводилась на нее и устанавливалась неподвижно.
3. С помощью аттенуаторов 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 количества отсчетов.
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 отсчеты амплитуды осреднялись по временному интервалу 1 мкс, равного длительности зондирующего импульса.
5. Выбирался отсчет 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 ее 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, используя критерий согласия Пирсона.

В качестве примера ниже приведен расчет пример расчета закона распределения амплитуды для сигнала, полученного радиолокатором МРЛ-5, установленным в

п.Лехтуси (Ленинградская обл.) 11.01.2024 при зондировании снега на расстоянии до 60 км при азимуте антенны 339° и угле места 0,6°.

Реализация отражённого сигнала, полученного с дальности 43,8 км приведена на рис.1.

Закон распределения амплитуды для данного сигнала представлен на рис.2 в виде гистограммы. Параметры полученного закона распределения следующие: математическое ожидание $m= 3,39$, стандартное отклонение $\sigma=1,82$. Также на рис.2 представлен теоретически рассчитанный закон распределения Рэлея с $\sigma=1,82$ (пунктирная линия).

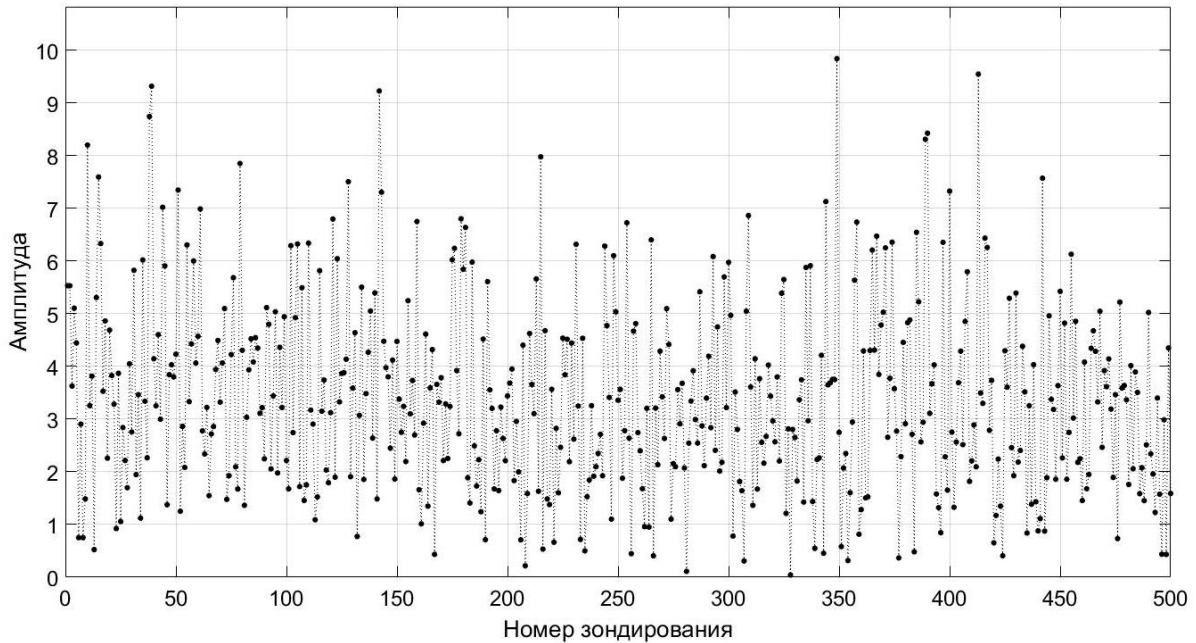


Рис.1. Пример реализации сигнала.

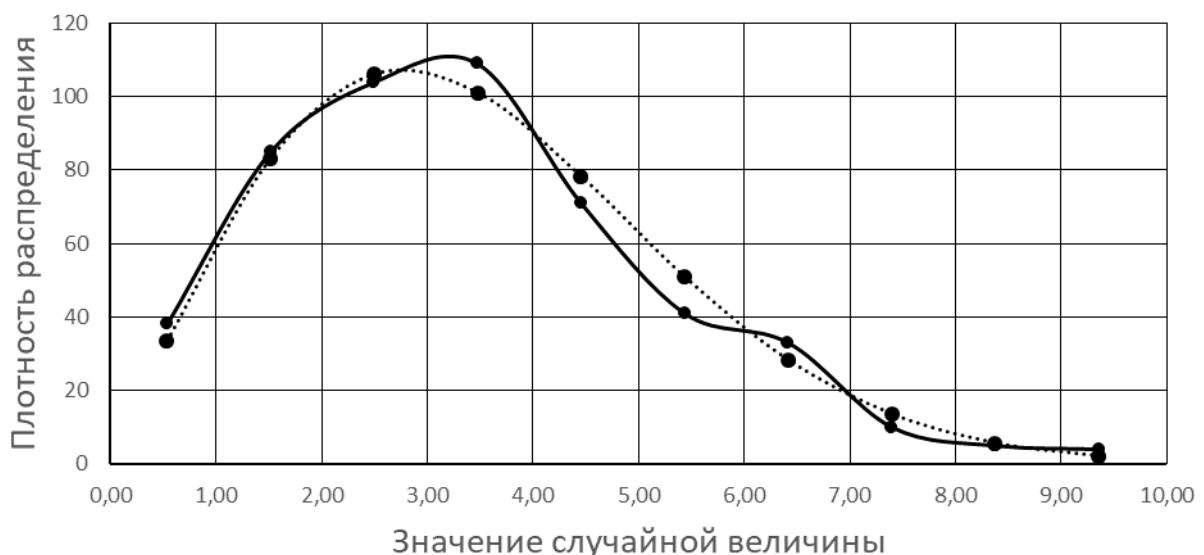


Рис.2. Пример экспериментального (непрерывная линия) и теоретического (пунктирная линия) законов распределения для реализации сигнала, приведенного на рис.1.

Числовые характеристики полученных законов распределения приведены в табл.1.

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

Середины 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

Для проверки гипотезы о том, что полученный закон распределения амплитуды сигнала является законом распределения Релея используется критерий согласия Пирсона (или критерий χ^2 – "хи квадрат") [4] с критерием значимости $\alpha=0,05$. Количество интервалов для построения распределения и для применения критерия χ^2 было выбрано равным 10 в соответствии с рекомендациями из [5]. При критическом значении $\chi^2_{крит}=14,1$ полученное значение статистического теста $\chi^2_e=6,2$. Поскольку $\chi^2_e < \chi^2_{крит}$ делаем вывод о том, что полученный закон распределения соответствует закону распределения Релея.

2.Результаты эксперимента.

Всего было обработано 66 реализаций от различного вида осадков: 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.

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

Выводы

Первый вывод, который следует из приведенной таблицы состоит в том, что исследователи середины двадцатого века, очевидно, были правы – распределение сигнала, отраженного метеоцелью отнюдь не всегда соответствует нормальному закону распределения, а его амплитуда, соответственно, не всегда распределена по закону Релея. Всего обработано 125 реализаций. Из них 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 твердых – только 3 см.

Очевидно, что значимость полученных данных невелика из-за малого количества обработанных реализаций. Поэтому их надо рассматривать как предварительные, но позволяющие заключить, что имеет смысл продолжать исследования в данном направлении.

Литература

1. 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.
2. 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: 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.
3. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. О распределении амплитуды радиолокационных отражений от дождевых облаков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 3(51). С. 5-11. DOI 10.24412/2221-2574-2023-3-5-11. EDN SLBWNM.
4. Севастьянов, Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики / М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 256 с.
5. 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. EDN SDJQIF.