

Исследование распределения плотности вероятности отражений от осадков на базе радиолокатора МРЛ-5

В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин

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

Обобщаются результаты эксперимента авторов по изучению закона распределения амплитуды отражений от метеорологических целей. Описываются несколько попыток измерения данного закона при помощи метеорологического радиолокатора МРЛ-5. Выявляются причины, влияющие на корректность измерения данного распределения. Делается вывод, что распределение амплитуд сигнала, отраженного осадками, имеет форму, близкую к релейскому. При этом отмечается необходимость дальнейших исследований в данном направлении.

The results of the authors experiment on studying the law of distribution of the amplitude of reflections from meteorological targets are summarized. Several attempts to measure this law by means of the MRL-5 meteorological radar are described. The reasons influencing correctness of measurement of the given distribution are revealed. It is concluded that the distribution of the amplitudes of the signal reflected by precipitation has a shape close to the Rayleigh one. Moreover, there is a need for further research in this direction.

Введение

В научной литературе последнее время появляются статьи [1], ставящие под сомнение факт, который ранее признавался неопровержимым, что амплитуда отражений от метеорологических целей распределена по закону Релея. Основаниями для таких заключений служат приводимые в публикуемых статьях экспериментальные данные, получаемые различными исследователями [2]. Как правило, эти измерения проводятся на радиолокаторах, имеющих логарифмическую амплитудную характеристику. Поэтому восстанавливать плотность распределения амплитуды на входе нелинейного устройства, по закону распределения, получаемого на выходе – сложнейшая задача даже для ее чисто математического решения в предположении идеальной формы реализуемого преобразования. На самом же деле амплитудная характеристика таких приемников лишь приближается к логарифмической. Кроме того, как подсказывает практика проведения натуральных экспериментов, их результаты в огромной степени зависят от множества мелочей, первоначально, на этапе планирования, даже не принимаемых во внимание.

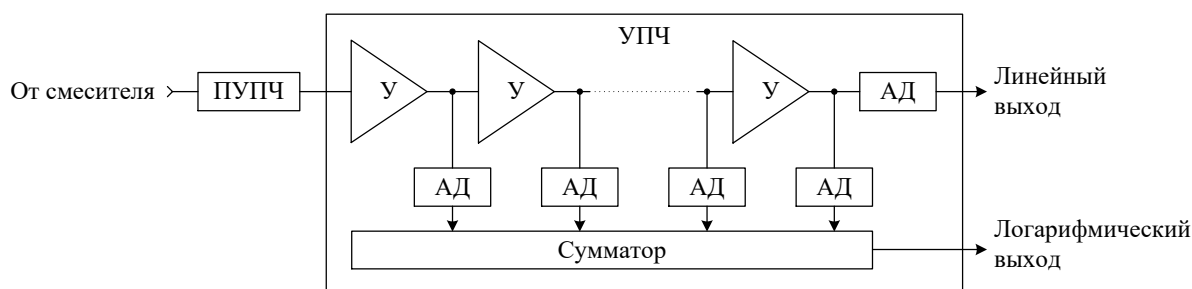
Основная часть

В связи с тем, что рассматриваемая задача имеет большое практическое значение [3], представляет интерес постановка собственного эксперимента по изучению данного закона распределения. Прежде всего, необходимо определиться с радиолокатором, что не представляет большого труда, ибо в распоряжении автором имеется всего один МРЛ-5. Его длина волны, равная 3 см, идеально подходит для подобного рода исследований, т.к. береговое отражение в данном диапазоне практически отсутствует и наличествует только релейское.

Второй вопрос – аппаратура регистрации. Тут выбор оказывается больше: цифровой осциллограф; АЦП с малой частотой дискретизации; АЦП с большой частотой дискретизации. Первый отпадает по причине непригодности к требуемым измерениям. Для того, чтобы записать сигнал с одного или нескольких

стробов дальности приходится фиксировать полный радиолокационный сигнал за все время наблюдения, включая ту его часть, что отводится на самоподстройку приемника (в МРЛ-5 она занимает половину всего времени его работы). При имеющейся разрешающей способности осциллографа оказывается невозможным набрать выборку более двух десятков отсчетов, что явно недостаточно в нашем случае. Однако первые пробные измерения были проведены именно с помощью осциллографа, фиксирующего напряжение на штатном (логарифмическом) выходе усилителя. Результаты их обработки были доложены на предыдущей конференции [3]. На следующем этапе предпочтение было отдано малоскоростному АЦП.

Наконец, надо построить схему набора экспериментальных данных. Во многом она определяется особенностями применяемой аппаратуры. Структурная схема приемника радиолокатора МРЛ-5 приведена на рис. 1.



ПУПЧ – предварительный усилитель промежуточной частоты; У – усилительный каскад; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; АД – амплитудный детектор.

Рис.1. Структурная схема приемника радиолокатора МРЛ-5.

Из него видно, что наиболее привлекательной представляется возможность съема информации с линейного выхода приемника. Характерный пример распределения снимаемого с него сигнала, отраженного от жидких осадков, приведен на рисунке 2.

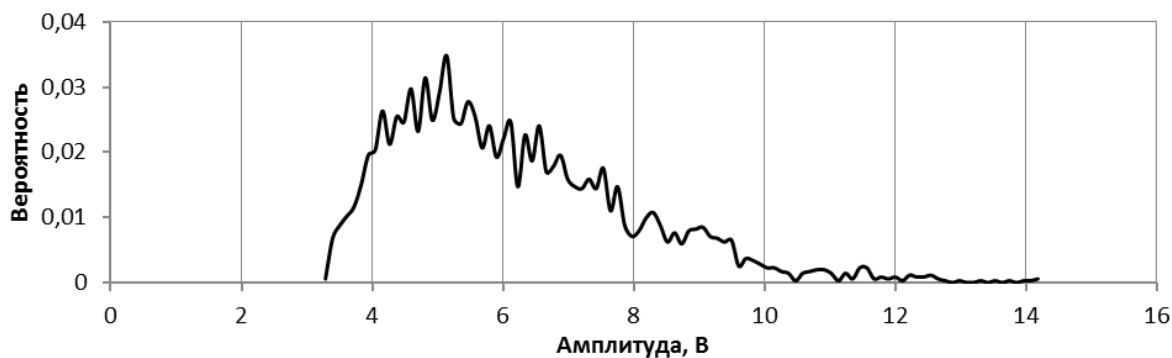


Рис.2. Пример распределения сигнала на линейном выходе приемника.

По форме оно близко к обобщенному релейскому. Если предположить, что реальное распределение амплитуды все-таки релейское, то такой эффект достигается при появлении постоянной составляющей в суммарном сигнале. Анализ реальных значений элементов схемы приемника показал, что детектор на линейном выходе имеет постоянную времени значительно превосходящую длительность зондирующего импульса, т.к. служит он для калибровки коэффициента усиления приемника по сигналу встроенного генератора шума. Следовательно, в результате осреднения на RC – фильтре детектора появляется постоянная составляющая. Соответственно, никаких заключений по итогам данных измерений вывести невозможно.

Тогда родился иной план – забирать сигнал с логарифмического выхода, но с введением ограничения на его величину. Из рисунка 1 видно, что на начальном участке амплитудной характеристики ее можно считать линейной. Критерием служит не превышение амплитудой сигнала величины пилотного импульса генератора шума. Методика эксперимента была принята следующей:

- в режиме автоматической стабилизации усиления фиксируется величина импульса генератора шума;
- усилитель переводится в режим ручной регулировки усиления;
- с помощью органов управления достигалось примерное равенство исследуемого сигнала зафиксированному значению импульса генератора шума;
- данные фиксировались при помощи 12-разрядного АЦП с частотой дискретизации 1,25 МГц, что примерно соответствовало разрешающей способности радиолокатора при длительности зондирующего импульса 1 мкс.

Пример полученного распределения можно видеть на рисунке 3.

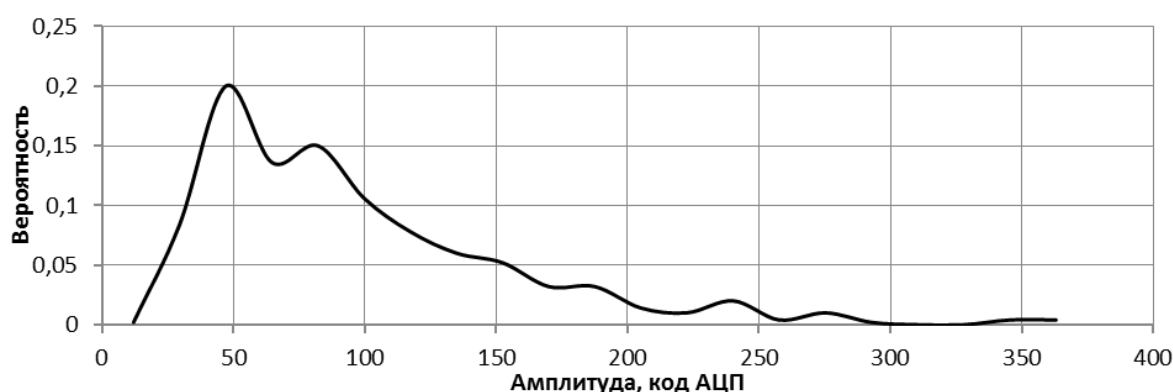


Рис.3. Пример распределения сигнала на линейном участке логарифмической амплитудной характеристики приемника МРЛ-5.

Очевидны следующие особенности этого рисунка:

- отсутствию значений, близких к нулевому;
- присутствию ярко выраженных нескольких максимумов распределения.

Первая из них может быть вызвана либо особенностью распределения выходного напряжения, либо влиянием амплитудного детектора (некоторое осреднение сигнала или вызванное им особенное его преобразование). Для проверки был применен АЦП с частотой дискретизации 100 МГц, на вход которого подавался сигнал на промежуточной частоте, минуя детектор. Результат – пустое пространство между осью ординат и начальными значениями напряжения пропало, что однозначно доказывает его появление влиянием детектора.

Вторая особенность наводит на мысль о том, что наблюдается смешение двух или трех выборок с различными законами распределения. Анализ схемы работы АЦП показал, что такое возможно при наблюдении участка цели с большим градиентом мощности создаваемых отражений. Поскольку частота дискретизации АЦП не синхронизирована с зондирующим импульсом радиолокатора, появляется «дрожание» стробов дальности в пределах ± 1 значение. Для проверки этой гипотезы были проведены измерения распределения сигналов, отраженных от местных предметов с большим (рис. 4а точка на дискрете 95) и малым (рис. 4а точка на дискрете 97) градиентами мощности, полностью ее подтвердившие.

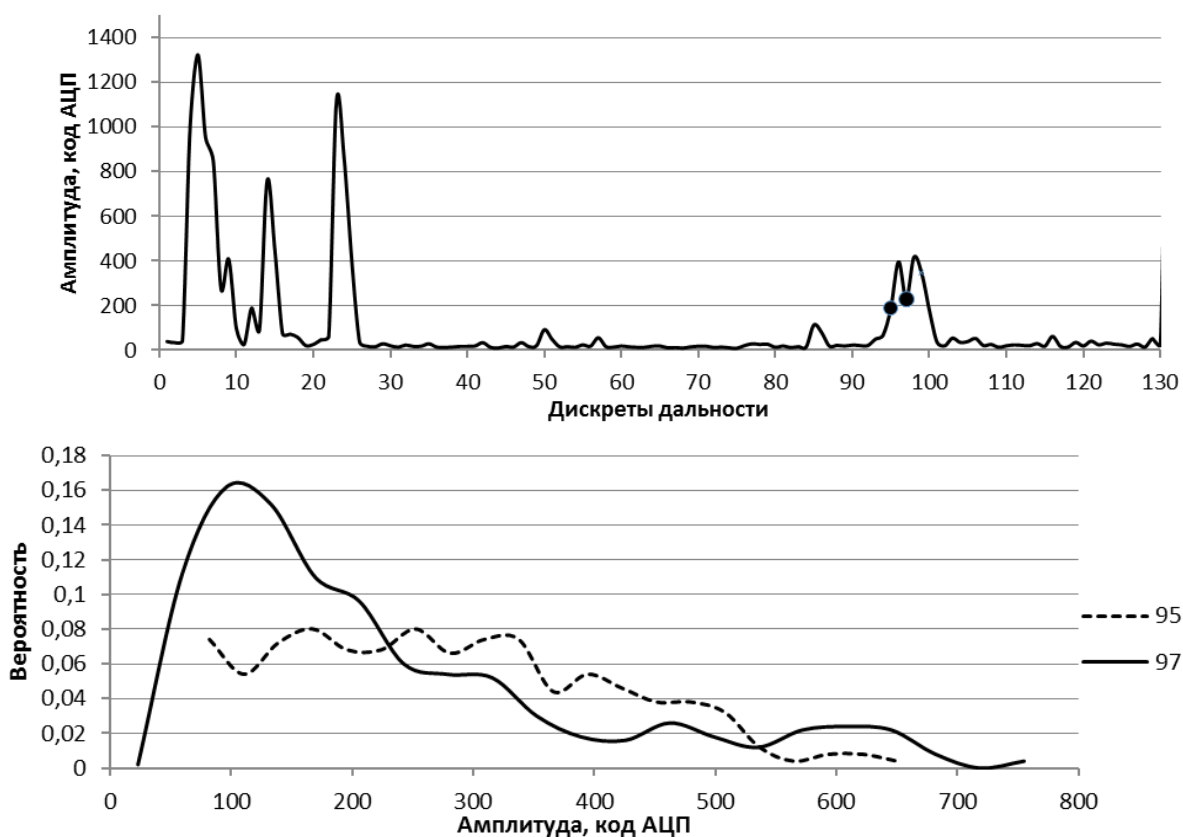


Рис. 4. Реализация принятого сигнала на выходе амплитудного детектора (одно зондирование) (вверху) и распределения амплитуд отражений от местных предметов при большом (дискрет 95) и малом (дискрет 97) градиентах мощности (внизу).

Выводы, сделанные в результате полученного опыта:

1. Исследовать надо сигнал на промежуточной частоте, избегая влияния амплитудного детектора;
2. Частота дискретизации должна примерно на порядок превосходить ширину спектра зондирующего импульса.
3. Получать выборку для статистической обработки можно только из одного дискрета дальности.

Соответственно сделанным выводам были проведены исследования на основе 16-разрядного АЦП с частотой дискретизации 100 МГц, на вход которого подавался сигнал с выхода предварительного усилителя промежуточной частоты (ПУПЧ), имеющего линейную амплитудную характеристику и большой динамический диапазон. Амплитуда определялась разложением сигнала на квадратурные составляющие путем фазового детектирования и дальнейшего ее вычисления по известным формулам. Далее вводилось осреднение, уменьшавшее частоту дискретизации до 5 МГц. При внимательном рассмотрении результатов было установлено, что необходимо учитывать еще целый ряд мешающих факторов. Так, на рисунке 5 приведены двумерное изображение сигнала, получаемого от дождя и соответствующее ему распределение.

На нем видно, как за время наблюдения, составляющего единицы секунд, сигнал переходит из одного строка дальности в другой. Это происходит из-за той же несинхронности частоты зондирования и частоты дискретизации, приводящей к описанному выше эффекту, но реализуемому с гораздо меньшей скоростью. Однако и ее оказывается достаточно для того, чтобы «смазать» получаемые результаты. Выход из создавшегося положения был найден следующий:

- весь радиолокационный сигнал записывался как одна большая реализация, включающая в себя несколько тысяч зондирований;
- по стабильной цели (местному предмету, как правило) определялся средний по выборке период повторения зондирующих импульсов;
- на интервале первого зондирования выбирался интересующий объект;
- набиралась соответствующая ему реализация путем фиксирования отражений в других зондированиях, отстоящих друг от друга на один и тот же найденный ранее интервал.

Такая методика позволила свести к минимуму «дрожание» строба.

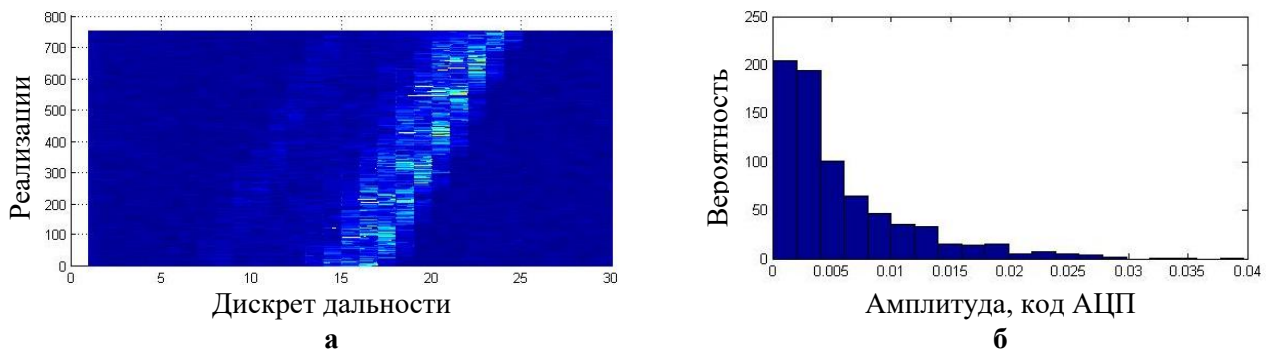


Рис. 5. Двумерное представление отражений от дождя (а) и распределения амплитуд отражений на дискрете 15 (б).

Полученные по ней двумерное изображение сигнала, получаемого от дождя и соответствующее ему распределение приведены на рисунке 6.

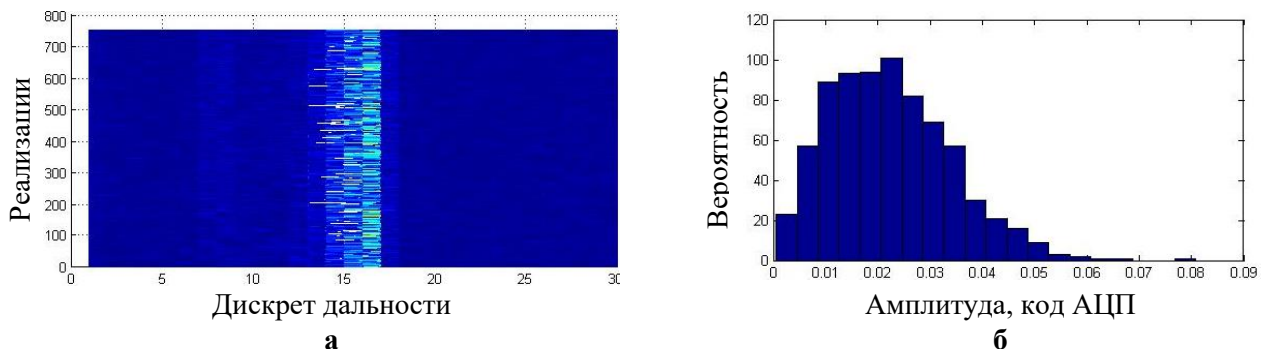


Рис.6. Двумерное представление отражений от дождя (а) и распределения амплитуд отражений на дискрете 15 (б), полученные по разработанной методике.

Из него видно, что форма полученной плотности распределения очень близка к релейской. Критерием проверки данного утверждения было выбрано отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению, которое при законе распределения Релея определяется соотношением

$$N = \frac{\sqrt{2 - \frac{\pi}{2}}}{\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \approx 0,53$$

Для всех реализаций, по которым были проведены расчеты (около 100), эта величина находилась в пределах 0,51–0,59, что подтверждает их распределение по Релею.

Постоянному контролю подвергалось также отсутствие ограничений сигнала в приемном тракте, ибо, как показал эксперимент, оно в значительной степени искажает исходный результат.

Заключение

На текущем этапе исследований можно утверждать, что распределение амплитуд сигнала, отраженного осадками, имеет форму, близкую к релеевскому. Однако делать окончательные выводы еще рано. Предстоит набрать статистику по различным видам осадков, разным их участкам, различным сезонам и климатическим зонам.

Литература

1. 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.
2. Charles A. Knight, L. Jay Miller. Early Radar Echoes from Small, Warm Cumulus: Bragg and Hydrometeor Scattering /National Center for Atmospheric Research,* Boulder, Colorado (Manuscript received 6 August 1997, in final form 9 January 1998)
3. Жуков, В.Ю. Современные проблемы метеорологической радиолокации / В.Ю. Жуков, Г.Г. Щукин // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т.61 № 10. – С. 927–939.
4. Горелик, А.Г. Простые радиолокационные критерии применимости классической модели рассеяния в разреженных средах / А.Г. Горелик, С.Ф. Коломиец // VIII Всероссийские Армандовские чтения. Материалы Всероссийской научной конференции. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. – С. 164–169.