

## **Интерференционные компенсации при рассеянии в разреженных средах макрочастиц**

А. Г. Горелик<sup>1</sup>, С. Ф. Коломиец<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный.

<sup>2</sup>Фрязинский филиал ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, д. 1, radiometeo@mail.ru

*В работе рассматриваются экспериментальные данные многоволнового зондирования осадков. Показано, что плотность вероятности огибающей радиоэхо может значительно отклоняться от рэлеевской в миллиметровом диапазоне длин волн зондирующего излучения и в сантиметровом диапазоне при условии зондирования с большими импульсными объемами.*

*Experimental data of multiwavelength sounding in rains are considered in the paper. It is shown that the probability density of radar echo can deviate significantly from Rayleigh's shape at the millimeter wavelengths of the probing radiation and at the centimeter waveband under the condition of sounding with large impulse volumes.*

### **Введение**

Основу современных радиолокационных методик составляет прямое использование радиофизических данных о мощности обратного рассеяния. Теоретически, она допускает недостаточно достоверный, но простой и непосредственный переход к метеорологическим оценкам. Практически, во многих современных приложениях её без какой-либо обработки наносят на карты и используют для краткосрочного прогноза погоды, оценки интенсивности осадков и количества выпадающей на землю влаги, в системах градозащиты. Такие методики имеют наблюдательный, полуколичественный характер.

Вместе с тем, объемы данных, получаемые от радиолокатора, позволяют формировать новые и существенно уточнять классические оценки. В этом направлении сделаны заметные шаги с использованием, например, фазовых (доплеровских) методов. Измерения, позволяющие получать надежную количественную информацию в условия, которые ранее были недоступны классическим методам, могут стать основой для существенного повышения точности и достоверности прогноза, расширения физических представлений об атмосферных процессах. Но измерительные методики требуют существенно больших затрат как на обработку сигналов, так и формирование теоретических основ для такой обработки. Их формирование не возможно без адекватных оперативных данных о микроструктуре рассеивающих объектов. Последняя чрезвычайно изменчива, как во времени, так и в пространстве, её вклад зависит от направления зондирования. Использование неизменных на всем времени измерения, априорных сведений о микроструктуре, приводит либо к явным ошибкам или оценкам с недопустимо большими доверительными интервалами. Эффективные методы оперативной оценки микроструктуры не сформированы. Достоверные оперативные измерения такой величины представляют собой сложнейшую проблему. Но её важность заставляет искать новые решения.

Целью настоящего доклада является рассмотрение ранее не обсуждавшийся в литературе экспериментальных результатов измерения плотности вероятности радиоэхо от жидкокапельных осадков и возможных способов их математической и геофизической интерпретации.

### **Состояние вопроса**

Основная масса эмпирического материала в классический период развития радиолокационной метеорологии была получена с использованием обычного радиолокатора. В качестве теоретической базы для их интерпретации использовались и до сих пор используются простейшие энергетические соотношения, входящие в так называемое «основное уравнение метеорологической радиолокации». Соответствующие зависимости были сформулированы еще до Второй мировой войны и до настоящего времени существенно не изменялись.

Используемая в радиолокационной метеорологии «модифицированная рэлеевская модель» формирования рассеянного поля на частицах разреженной среды называется моделью Керра-Райса [1]. В геометрическом плане модификация затронула форму представления элементарного рассеивающего объема (ЭРО). Обратное рассеяние подразумевало переход от ЭРО в виде кубов, к слоям. Экспериментальное обоснование указанной модели заключалось в построении первого и второго распределений по данным однопозиционного зондирования интенсивных осадков и облака пассивных отражателей на длине волны 10 см и дистанции около 10 км. Экспоненциальная форма плотности вероятности флуктуаций мощности, опубликованная в [1] позволяла провести полную аналогию с флуктуациями интенсивности в рэлеевской модели и тем самым установить аналогию между классической рэлеевской моделью и моделью зондирования осадков. В конце 40-х годов прошлого века, Керр писал: «Отражатели, создающие сигнал от осадков представляют или дождевые капли, или льдинки. Можно, следовательно, думать, что условия, которым должно удовлетворять собрание случайных отражателей, здесь так же хорошо выполняется, как и для «облака вибраторов». Это мнение основывается на результатах опыта.»

Принципы рассеяния на случайно расположенных в пространстве и случайно движущихся рассеивателях были сформулированы Рэлеем относительно рассеяния «в бок», применительно к «микроскопическим рассеивателям» (молекулам разреженных газов), облучаемым широкополосными сигналами видимого диапазона солнечного излучения непрерывно. Поэтому сама возможность использовать эти соотношения применительно к «макроскопическим рассеивателям» в условиях обратного рассеяния, с использованием когерентных и узкополосных сигналов, в импульсном режиме работы радиолокатора — имеет фундаментальное значение.

Основным плюсом рэлеевской модели является простота. Но в ней самой заложено глубокое противоречие, состоящее в её логической завершенности. Опыт оптики учит, что усовершенствование таких моделей требует специально поставленных тонких экспериментов. Подобная практика в радиолокационной метеорологии значительно осложняется отсутствием эффективных средств контроля микроструктуры и динамики среды в рассеивающем объеме, и потому недостаточно развита. Тем не менее развитие возможностей тонкого анализа сигналов позволяет надеяться на получение подобной информации из данных обычных радиолокационных экспериментов, массово проводимых в радиолокационной метеорологии.

### **Результаты экспериментальных исследований**

Массовый переход к доплеровской обработке сигнала в шестидесятые годы, привел к тому, что понятия первого распределения (плотности вероятности флуктуаций мощности или огибающей), использовавшихся в работах Керра, уже практически не встречались в литературе и не исследовались на практике. Однако, когда решается вопрос о применимости той или иной модели, то контроль формы первого распределения является достаточно эффективным решением.

**Таблица 1. Параметры РЛС и условий измерений**

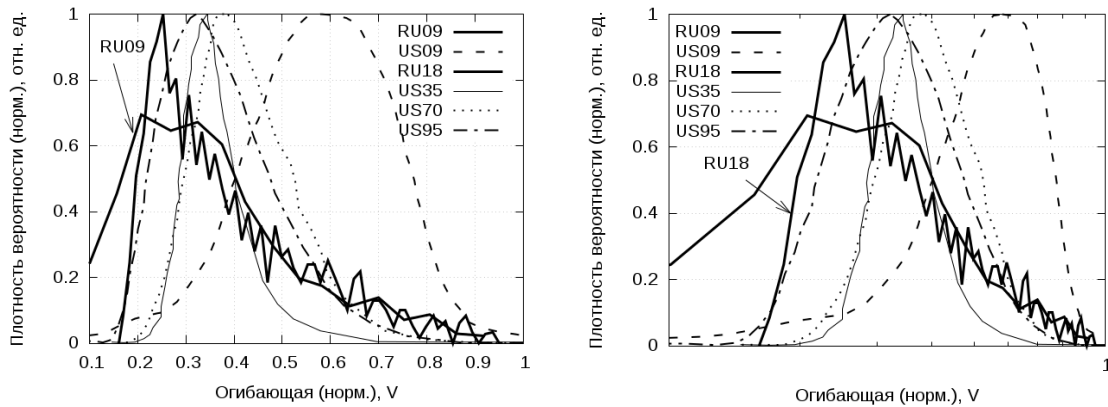
№	Параметр	9 ГГц	9 ГГц	18 ГГц	35 ГГц	70 ГГц	95 ГГц
1.	Пиковая мощность, Вт	40	250000	700	20	10	8
2.	Диаметр антенны, м	1.83	3.5	1.0/0.2	0.92	0.92	0.92
3.	Дальняя зона, м	112	408	80	106	197	300
4.	Ширина диаграммы	1,2°	0,5°	10.4°	0,68°	0,34°	0,24°
5.	Длительность импульса, мкс	0,7	1.0	0,4	0,2	0,085	0,080
6.	Период повторения, мкс	625	830	263	312,5	250	250
7.	Полоса приемника, МГц	4	-	-	6	14	20
8.	Шум-фактор, дБ	10	-	18	13,4	18	28
9.	Дистанция зондирования, км	0.7	5	1.2-1.8	0.7	0.7	0.7
10.	Продольный масштаб (L), м	105	125	60	30	13	12
11.	Поперечный масштаб (T), м	1,83	5	4	0.92	0.92	0.92
12.	Объем ( $\pi LT^2/4$ ) куб. м.	276	2500	~400	20	8.6	8.0
13.	Эксцентриситет объема (L/T)	57	25	15	32	14	13

Исследуя статистику первого распределения в дождях различной интенсивности авторами на большом статистическом материале был установлен факт их нерэлеевской формы и чрезвычайной стабильности последней в отношении естественных изменений интенсивности осадков. Информационный поиск позволил установить, что аналогичные результаты были получены в США еще в 1976 году, но до 2009 года не публиковались. В результате тезис о «независимости» формы и дисперсии первого распределения от интенсивности осадков получил еще более надежное подтверждение. Причем в американском отчете этот факт устанавливался для целого ряда различных частот зондирования сантиметрового и миллиметрового диапазона, а также круговой правой, вертикальной и горизонтальной поляризации (см. Таблицу 1, где данные авторов показаны курсивом).

Установить отличие первого распределения от теоретически ожидаемого в рамках модели Керра-Райса позволило использование линейно-логарифмического детектирования. Рэлеевский сигнал на выходе подобного детектора должен иметь отрицательную асимметрию, но реальные распределения устойчиво демонстрировали протяженное правое крыло (см. Рис. 1).

Важно подчеркнуть, что ширина и среднее спектра того же самого сигнала демонстрировали ожидаемую динамику по мере изменения интенсивности осадков и динамических процессов в них.

Полученные первые распределения на выходе линейно-логарифмического детектора позволяют однозначно установить плотность вероятности сигнала на входе. Американские данные в логарифмическом масштабе хорошо приближаются нормальным распределением, данные авторов — требуют использования трехпараметрической гамма-функции (см. Рис. 1, Таблицу 2). Последняя с ростом показателя степени  $m$  (параметра формы), см. Таблицу 2 стремится к гауссовой кривой, так что подобные различия не следует рассматривать, как принципиальные.



**Рис. 1. Экспериментальные первые распределения флуктуаций огибающей в линейном и полупологарифмическом масштабе**

Тем не менее, есть все основания рассматривать две основных модели: логонормальную и «лого-гаммофункциональную». Несмотря на отсутствие качественных отличий, разница в форме распределений, полученных на различной аппаратуре, может являться закономерным следствием значительных расхождений в пиковой мощности и/или ширине диаграммы направленности антенны (см. Таблицу 1). В этом случае, они могут нести важную количественную информацию и микроструктуре и динамических процессах в рассеивающем объеме.

Окончательное формулирование физически ясной модели, безусловно, требует специально поставленных экспериментов для получения более массового материала в режимах разных мощностей, угловых размеров основного лепестка диаграммы направленности антенны, длительности импульса (величины рабочего объема, с различными соотношениями продольного и поперечного масштаба). Тем не менее, в ожидании такого материала предварительный анализ на основе уже имеющегося данных представляет определенный интерес.

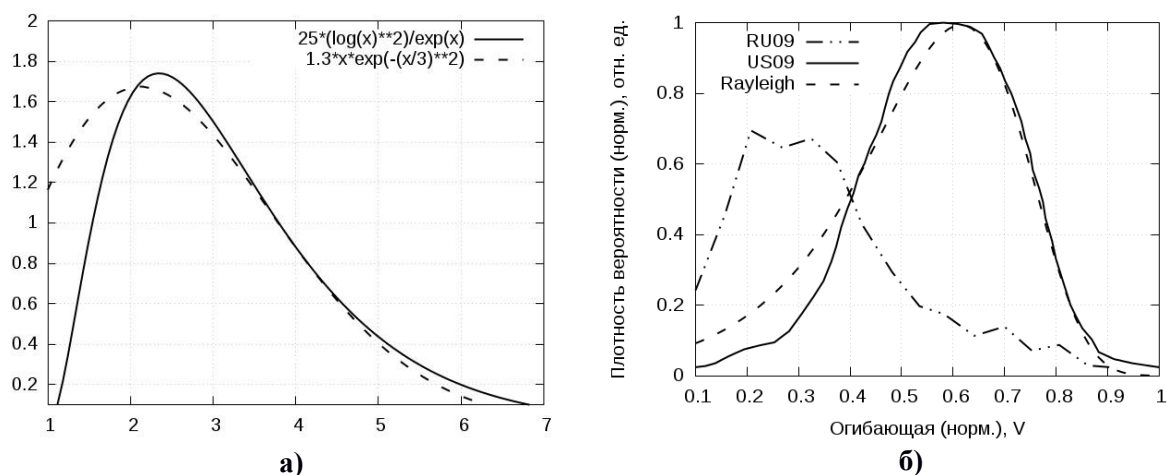
**Таблица 2. Аппроксимация плотности огибающей на входе и выходе детектора**

№	Вход	Выход
1.	$\frac{K \cdot e^{-\ln(\ln(r))^2}}{r}$	$K \cdot e^{\ln(x)^2}$
2.	$\frac{K \cdot \ln(\ln(r))^m}{r \cdot \ln(r)^\beta}$	$K \cdot \ln(x)^m \cdot e^{-\beta \cdot \ln(x)}$
3.	$\frac{r}{D} \cdot e^{\frac{-r^2}{2 \cdot D}}$	$\frac{e^{-\left(\frac{e^{-2 \cdot x}}{2 \cdot D} + 2 \cdot x\right)}}{D}$

Соотношения, приведенные в Таблице 2, указывают, что в модели Керра-Райса на миллиметровых длинах волн классическую рэлеевскую плотность вероятности имеют флуктуации логарифма огибающей. То есть характер расширения экспериментальный

зависимостей по сравнению с рэлеевским распределением — экспоненциальный. Это иллюстрирует Рис. 2 а, на котором приведен полу-логарифмический вид логонормального распределения (см. стр. 1 Таблицы 2) и график рэлеевского распределения огибающей в линейном масштабе.

Обращает на себя внимание различная степень расширения распределения по сравнению с классическим, рэлеевским, наблюдаемая при различных мощностях излучения, на различных длинах волн и в различных по размеру и эксцентриситету объемах.



**Рис. 2 . Сопоставление экспериментальных и теоретических распределений**  
**а — аппроксимация логонормального распределения по данным, полученным в малых рассеивающих объемах на миллиметровых длинах волн (флуктуации логарифма огибающей имеют рэлеевский характер).**  
**б — аппроксимация рэлеевского распределения, полученного на сантиметровых длинах волн в малых объемах и аналогичное распределение, полученное в большом объеме.**

Показательно, что «трехсантиметровые данные», полученные в малых объемах при малых мощностях, имеют почти рэлеевское распределение, а в больших объемах и при больших мощностях — явно ему не соответствуют (см. RU09 и US09 на Рис. 1, Рис. 2 б).

Но что за процесс в зондируемом объеме может обеспечить такой эффект? Ответ на этот вопрос потребовал изучения целого ряда известных, но редко рассматриваемых в литературе факторов. Среди них следует отметить: особенности распределения капель по размерам, наличие быстро движущихся сверхкрупных капель, пространственную кластеризацию капель, смену рассеивателей, нестабильность мощности радиолокационного импульса.

Однако по условиям проведения радиолокационных измерений, которые подразумевают практически неподвижные рассеиватели на времени одного импульса и незначительное их смещение в промежутках между импульсами, все известные процессы определяющие неравномерность распределения рассеивающих частиц и их распределения по размерам мало подходят для объяснения наблюдаемого эффекта.

В частности, при достаточно высокой средней скорости среды 10 м/с среднее смещение частиц между импульсами, следующими с интервалом 250 мкс составляет 2.5 мм. Это совсем незначительно превышает средний размер рассеивателя. Среднюю скорость гравитационного падения следует принять в половину меньше указанной величины. За 1000 импульсов смещение составит порядка 2.5 м (или 1.5 м для

гравитационного падения капли с диаметром порядка 1.2 мм, что можно принять за средний размер для интенсивных осадков). Такие величины смещения уже сравнимы с радиусом корреляции флуктуаций концентрации частиц (который можно допустить на основе имеющихся в литературе представлений о возможных причинах подобной кластеризации) и сравнимы с поперечным масштабом «малых» зондируемых объемов (см. Таблицу 1).

Таким образом, допуская возможность существования флуктуаций с корреляцией концентрации порядка метра и меньше, при накоплении больших статистик можно ожидать на характерных периодах времени измерения эффективной смены кластеров и/или частиц в рассеивающем объеме, при зондировании в малых объемах поперек направления сильного ветра и/или в интенсивных осадках.

Настоящий доклад не позволяет детально остановиться на анализе влияния на первое распределение всех возможных факторов и их комбинаций. Отметим лишь, что с этой целью — на основе классических принципов моделирования рассеянного поля на разреженных частицах — авторами была разработана достаточно развитая численная модель, позволяющая учитывать различные особенности пространственного распределения и движения рассеивающих частиц. Она позволила качественно оценить принципиальную возможность формирования характерных эффектов в первом распределении и, главное, оценить их стабильность в отношении измерения условий моделирования. С использованием указанной модели, не удалось установить какого-либо изолированного эффекта или совокупности эффектов, которые могли бы определять значительные расширения первых распределений, характеризующиеся высокой стабильностью и изменяющиеся заданным образом при изменении размеров импульсного объема или частоты зондирования. Ожидаемое снижение эффекта от кластеризации с ростом размеров импульсного объема противоречит приведенным выше данным измерений на трех сантиметрах (см. Рис. 2 б). К тому же проблемы возникают с объяснением стабильности порождаемых кластеризацией отклонений от рэлеевской статистики.

Устойчивые и широкие нерэлеевские распределения возможны при наличии небольших кластеров с достаточно высокой концентрацией. Такие кластера окажутся достаточно стабильны, так как средняя интенсивность турбулентных пульсаций в атмосфере не превышает 3-4% от средней скорости среды. Неравномерность смещений отдельных малых частиц в пространстве по отношению к вышеприведенному среднему смещению имеет тот же порядок. С учетом же инерции крупных частиц, можно утверждать, что диффузионное размытие пространственной структуры будет сказываться на значительно больших периодах времени, чем интервал между импульсами. Наличие подобных стабильных образований не могло бы остаться незамеченным, например, в пассивном зондировании или трассовых экспериментах с короткими трассами. Ожидаемая меньшая выраженность кластерных эффектов для миллиметровых длин волн зондирования не подтверждается экспериментом.

В целом, следует отметить совершенно недостаточные сведения о кластеризации частиц в жидкокапельных осадках. Классические исследования в этом направлении, традиционно ориентировались на чисто геофизические задачи, такие как оценка усредненных распределений, исследование доверительных интервалов перехода от оценок контактных выборок к оценкам генеральной совокупности [2, 3] Однако появление в девяностые годы прошлого века оптических дидрометров открыло возможности для исследования микроструктуры с высоким разрешением во времени [4]. Такой экспериментальный материал в настоящее время находится в процессе массового накопления, в том числе с непосредственным сравнением контактных и радиолокационных данных [5 - 7]. Поэтому вопрос о влиянии кластеризации частиц на

статистику регистрируемых сигналов в различных по размеру импульсных объемах и на различных длинах волн зондирующего излучения нельзя считать решенным. Наиболее выраженным такое влияние следует ожидать на сантиметровых длинах волн в малых и средних объемах [7].

Однако основываясь на результатах моделирования и, в частности, сложностями с получением стабильных эффектов значительной интенсивности, авторы склоняются к необходимости поиска иного, ранее не рассматривавшегося процесса, стабильность которого удовлетворяла бы экспериментальным данным, а интенсивность нарастала бы при увеличении величины зондируемого объема и уменьшении длины волны зондирующего излучения. В частности, подобный процесс при определенных условиях возможен в рамках модели интерферометрических компенсаций разреженных сред, развиваемой авторами [8 - 10]. Условия возникновения, интенсивность, стабильность и динамика подобного эффекта в связи с изменением величины зондируемого объема и частоты зондирующего излучения будет детально рассмотрена в устной части доклада.

### **Выводы**

В докладе проведен анализ многоволновых экспериментальных данных обратного рассеяния в дождях. Показано, что плотность вероятности, огибающей радиоэхо, может заметно отклоняться от рэлеевской формы в миллиметровом диапазоне длин волн зондирующего излучения и в сантиметровом диапазоне при условии зондирования с большими импульсными объемами.

На основе результатов численного моделирования процессов формирования обратного рассеяния на частицах разреженных сред, учитывающей ряд тонких эффектов, способы аналитического описания которых не сложились, предполагается, что ни один из них не может формировать характерные первые распределения, найденные экспериментально.

### **Литература**

1. Распространение ультракоротких радиоволн / Пер. с англ. под ред. Б. А. Шиллерова - М.: Сов. радио, 1954. – 710 с.
2. V. N. Bringi and V. Chandrasekar and J. Hubbert and E. Gorgucci and W. L. Randeu and M. Schoenhuber, Raindrop Size Distribution in Different Climatic Regimes from Disdrometer and Dual-Polarized Radar Analysis // J. Atm. Sci. V. 60, No. 2, 2002, pp. 354-365.
3. F. J. Tapiador, A. Navarro, R. Moreno et al., On the Optimal Measuring Area for Pointwise Rainfall Estimation: A Dedicated Experiment with 14 Laser Disdrometers. Journal of Hydrometeorology V. 18. No. 3, pp. 753-760. 2017.
4. Kruger, A., and W. F. Krajewski, Two-Dimensional Video Disdrometer: A Description. // J. Atmos. Oce. Tech., 19, 602-617, 2002.
5. J. Janapati, B. Kumar, M. V. Reddy, K. K. Reddy, P. Lin, T. N. Rao, and C. Liu, A study on raindrop size distribution variability in before and after landfall precipitations of tropical cyclones observed over southern India. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. online article, 2017.
6. D. Kim and D. Lee. Raindrop size distribution properties associated with vertical air motion in the stratiform region of a springtime rain event from 1290 MHz wind profiler, micro rain radar and Parsivel disdrometer measurements. // Meteorological Applications V. 23. No 1, pp. 40-49. 2016.
7. A. Tokay, P. G. Bashor, An Experimental Study of Small-Scale Variability of Raindrop Size Distribution. // J. App. Meteorol. and Clim. V. 49. No. 7. pp. 2348-2365. 2010.

8. Коломиец С. Ф. Современное состояние моделей рассеяния электромагнитных волн на частицах разреженных сред. Научный вестник МГТУ ГА, Серия "Радиофизика и электроника", вып. 189, 2013 , с.~104-109.
9. Коломиец С. Ф. Рассеяния простого одиночного радиоимпульса на частицах разреженных рассеивающих сред. Научный вестник МГТУ ГА, Серия "Радиофизика и электроника", вып. 222, 2015, с.~21-29.
10. Gorelik A. G., Kolomiets S. F. Rayleigh's Principle of Power Addition (From the Point of View of Stochastic Point and Pulse Processes). Proceedings of 15-th International Radar Symposium (IRS), 2014.