

УДК 551.501.8

РАССЕЯНИЕ ПРОСТОГО ОДИНОЧНОГО РАДИОИМПУЛЬСА НА ЧАСТИЦАХ РАЗРЕЖЕННЫХ РАССЕИВАЮЩИХ СРЕД

С. Ф. КОЛОМИЕЦ

В статье обсуждаются полученные в разное время и с использованием различной аппаратуры экспериментальные результаты цифровой регистрации сигналов обратного рассеяния единичного радиоимпульса в жидкокапельных осадках. Показано, что результаты не вполне соответствуют широко используемым классическими моделям. Представлен краткий предварительный анализ возможных причин такого несоответствия.

Ключевые слова: радиолокация, импульсный режим, разреженная среда, модель Керра-Райса, радиометеорология.

Введение. В работе многих локационных устройств большую роль играют отражения от распределенных множественных целей. К числу таких целей относят земную и неспокойную морскую поверхность, гидрометеоры, облака искусственных металлизированных рассеивателей, пузырьки газов и взвеси твердых частиц в воде океанов и морей. С их негативным воздействием приходится считаться, в задачах обнаружения низколетящих и движущихся на поверхности целей, а также сигналов от движущихся объектов, регистрируемых на фоне обволакивающей передатчик взвеси рассеивающих частиц. Имеется немало радиотехнических устройств, для которых подобные отражения являются, напротив, источником полезной информации.

В силу многочисленности рассеивателей и случайности их отражающих свойств, а также под влиянием движения, ветра (или течения), линейного перемещения (или сканирования) антенны, амплитуда и фаза рассеянного на протяженной множественной цели сигнала — величины случайные. Такие сигналы можно описать только статистически, что существенным образом отличает моделирование работы локатора по распределенным множественным целям от классических задач. К характерным особенностям таких моделей следует отнести еще многофакторность со сложными связями. Речь идет о необходимости вместо «классического» скаляра (например, среднего значения сигнала за период) оперировать с векторами (двумерными — средним и дисперсией или многомерными — формой распределения). Модель, таким образом, представляет собой совокупность зависимостей между координатами векторов и материальными явлениями на пути распространения, техническими параметрами приемо-передатчика, режимом работы локатора. Даже такое упрощенное представление позволяет представить себе сложность задач, с которыми приходится иметь дело на пути дальнейшего повышения технических параметров устройств, работающих с отражениями от распределенных множественных целей.

В этой статье будут рассмотрены экспериментальные результаты, полученные в области метеорологической радиолокации и применимые к её задачам. Эти результаты, по мнению авторов, могут оказать определенное влияние на состав и развитие обсуждаемых моделей. Вполне допустимо, что выводы, сформулированные в настоящей статье после соответствующей коррекции, могут быть полезны в иных областях локации.

Состояние вопроса. Фундаментальные основы рассеяния на частицах разреженных сред были заложены применительно к оптике в работах лорда Рэля и А. Эйнштейна. Почти без изменений эти модели используются в классических подходах метеорологической радиолокации [1-2, 10]. Тем не менее, связи между статистическими распределениями измеряемых параметров и многочисленными факторами, вносящими вклад в их мгновенные значения для многих приложений до сих пор не всегда ясны даже на принципиальном уровне [1,

3, 6]. В [4] имеется емкое замечание, позволяющее в первом приближении оценить состояние дел в области решения практических задач, связанных с рассеянием в разреженных (в оптике – мутных) средах: «Существует безграничное множество реальных ситуаций, при которых возникает рассеяние. В каждом конкретном случае внутренняя структура объекта (например туман, дымка, водная среда, коллоид и т.д.), от которой зависит характер рассеяния, будет специфичной. Вот почему, если сформулировать задачу об установлении взаимосвязи между структурой светового поля, рассеянного сильно мутной средой, и структурой её вещества, то эта проблема в общем виде в настоящее время не разрешима, ибо нужно рассматривать столько задач, сколько имеется в природе рассеивающих объектов. Однако данный вопрос может быть несколько упрощен, если отвлечься от физической природы, вызывающей рассеяние в том или ином случае. В самом деле, во многих практических задачах не требуется знать микроструктуру вещества...» С использованием указанных «упрощенных» методик наиболее сложные задачи, в которых все-таки требуется знать микроструктуру рассеивающей среды, остались за кадром, а среди них: тонкая адаптивная фильтрация, повышение точности измерения параметров сигналов в условиях помех.

В условиях, когда уровень развития радиоэлектроники опережает возможности математических моделей процесса, инженеры вынуждены сосредоточиться на копировании технических решений из смежных областей, разработке «универсальных» решений или адаптивных подходов, эффективность которых (при заданной сложности), по определению, не может быть выше специализированных (иначе, сложность при заданной эффективности – выше) [13]. Следует отметить также, что саму эффективность без соответствующей теоретической базы оценить сложно.

Хотелось бы подчеркнуть, что потенциал классических «одномерных» (средние значения) и «двумерных» (средние и дисперсии) моделей в настоящее время уже практически исчерпан [1, 5]. На современном этапе целевые технические характеристики аппаратуры зависят от точности и корректности построения многомерных и многофакторных моделей, на пути решения которых, стоит — не считая ряда вопросов фундаментального характера — сложность.

Из всего изложенного можно сделать вывод о том, что классический теоретический аппарат моделей рассеяния на распределенных множественных целях несет скрытые ограничения на принципиально достижимые технические характеристики проектируемых устройств. Он раскрывает лишь зависимости между усредненными параметрами сигнала, в то время как получение нового качества проектируемых технических устройств зависит уже от тонких его особенностей, и таких, например, деталей, как протяженность «хвостов» распределений и формы спектров, отклонений их от симметрии, соотношений между значениями моментов высоких порядков [3, 5, 6].

Модели рассеяния. Современная цифровая техника регистрации сигналов открывает путь к учёту гораздо большего количества специфических особенностей сигналов, по сравнению с аналоговой аппаратурой, которая использовалась при формировании классических моделей рассеяния на частицах разреженных сред. Широкое применение твердотельных приемо-передающих устройств с более высоким качеством сигнала и возможностью оперативного изменения его параметров в широких пределах от-

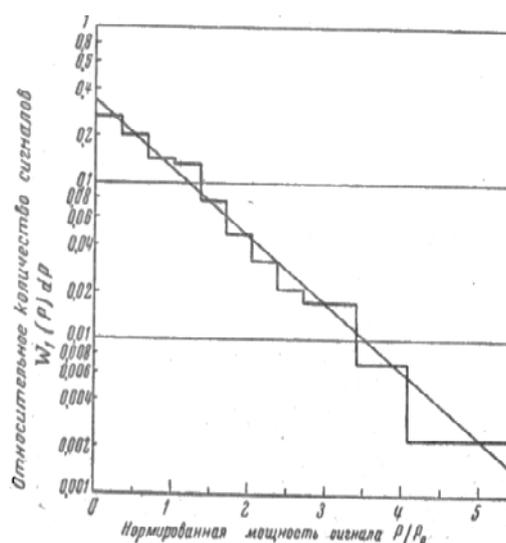


Рис. 1. Экспериментальное W_1 — первое распределение из [31] (полулогарифмические координаты)

крывает пути к получению значительно большего, чем пятьдесят лет назад, объема информации непосредственно из зондируемого объема [7].

Все это могло бы привести к заметному прогрессу как минимум в области радиолокационной метеорологии, но его не наблюдается. Таким образом, есть все основание полагать, что без пересмотра фундаментальных положений, которые считались отправными точками для дальнейшего развития, самого этого развития может не быть. К тому же выводу приводит анализ накопленных к настоящему времени экспериментальных данных, не получивших физически ясного объяснения [8, 9].

Широко используемая в радиолокационной метеорологии «модифицированная рэлеевская модель» формирования рассеянного поля на частицах разреженной среды называется моделью Керра-Райса [10]. Модификация затронула лишь форму элементарного рассеивающего объема (ЭРО). У Рэля, который изучал классическое рассеяние в сторону, он был кубическим. Рассмотрение обратного рассеяния, типичного для однопозиционной радиолокации, подразумевало переход от кубов к слоям. Керром, наряду с понятием «первого распределения» — W_1 , полностью совпадающим с рэлеевским экспоненциальным распределением флуктуаций мощности рассеянного поля (см. Рис. 1.), введено понятие W_2 — «второго распределения», которое частично воспроизводит информационные возможности спектра флуктуаций интенсивности (выход квадратичного детектора).

Экспериментальное обоснование указанной модели заключалось в построении первого и второго распределений по данным однопозиционного радиолокационного зондирования интенсивных осадков и облака пассивных отражателей на длине волны 10 см и дистанции около 10 км. Форма экспериментальных гистограмм в [10] позволяла фактически провести полную аналогию между классической моделью с кубическими ЭРО и моделью зондирования осадков в условиях обратного рассеяния (с ЭРО в форме слоёв), а также устанавливала связь между осадками и облаком пассивных отражателей. 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.*»

Небезынтересно отметить, что указанные гистограммы были приведены без указания точек, обозначающих экспериментальные данные или интервалов рассеяния, что не позволяло оценить статистику проведенных экспериментов. Несмотря на широкую известность и популярность монография практически не переиздавалась.

Экспериментальная проверка применимости моделей. Переход к доплеровской обработке сигнала, как к более информативной, привел к тому, что понятия первого и второго

распределений уже практически не использовались в литературе последней трети прошлого века. В ходе работ 2009-2013 годов, финансируемых Министерством образования и науки РФ, авторам удалось восстановить работу когерентно-импульсного, доплеровского радиолокатора разработанного на базе РЛС военного назначения и создать систему цифровой обработки сигналов к нему. Основные параметры этой РЛС приведены в Таблице 1. Сигнал, регистрируемый на линейно-логарифмическом выходе из одной и той же точки пространства в осадках средней интенсивности, расположенной на ди-

станции около двух километров приведены на Рис. 2. Так как сигнал отличался от ожидаемого, параллельно с тестированием радиолокатора начались поиски информации, которая могла быть полезной для понимания особенностей прохождения сигнала с экспоненциальным

Таблица 1. Основные параметры РЛС 18 мм

№	Параметр	Значение
1	Пиковая мощность сигнала	4000 Вт
2	Длительность импульса	0,4 мкс
3	Период повторения импульсов	250 мкс
4	Длина волны	18 мм
5	Шум-фактор	18 дБ

распределением через цепи линейно-логарифмического детектора. В виду отсутствия соответствующей информации в штатной документации на РЛС требовалось уточнить, в частности, положение точки перехода линейной характеристики детектора в логарифмическую. В ходе поисков был обнаружен в свободном доступе отчет AD/A-007 254, завершённый технологическим институтом штата Джорджия (г. Атланта) в 1975 году. Он содержал результаты детального изучения особенностей распространения излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов в осадках.

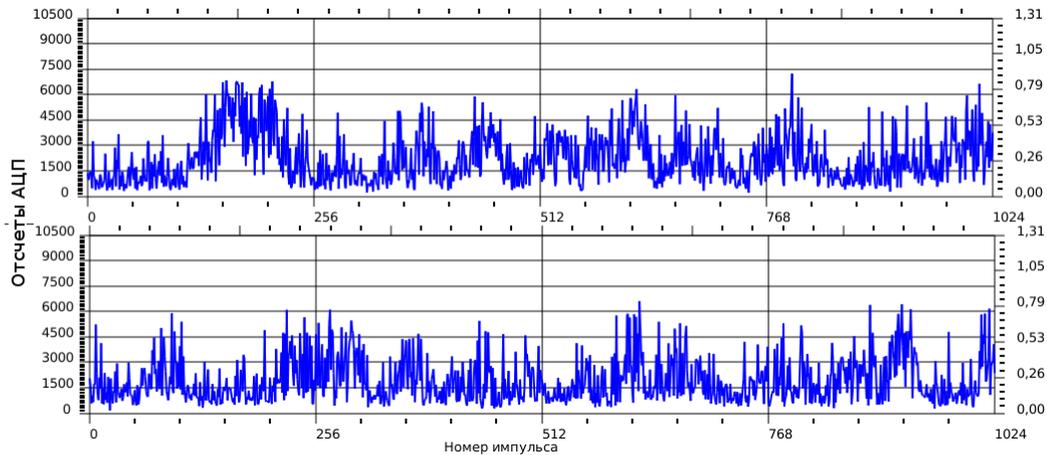


Рис. 2. Синхронная временная запись сигналов от дождя средней интенсивности (5-7 мм/час) в двух точках отстоящих друг от друга на 300 м на дистанции 2 км (выход линейно-логарифмического детектора радиолокатора, работавшего с длиной волны 18 мм)

В отличие от НИР «Сфера», проведенной в СССР (г. Харьков) несколькими годами раньше (с теми же целями), американцы собрали большой экспериментальный материал, касающийся не только ослабления, но и обратного рассеяния на частотах 9.375; 35; 70; 95 ГГц. С современных позиций важно отметить, что этот проект, похоже, был одним из первых, где использовалась цифровая регистрация и обработка сигнала рассеянного осадками различной интенсивности. К сожалению, отчет был засекречен и появился в свободном доступе после 2005 года.

Сигнал, полученный американцами на частоте 95 ГГц сомнений не вызывал (см. Рис. 3), но регулярные отрицательные экстремумы на графике для 9.375 ГГц (см. Рис. 3 верхний эскиз) ставили вопросы к помеховой обстановке, в которой работала аппаратура. Помимо временной записи сигналов, отчет содержал обширную информацию по обработке результатов эксперимента... Таким образом в первой декаде XXI века на непродолжительное время (так казалось), в рамках небольшой рабочей группы вернулось в обращение первое распределение, форма которого приведена на левой панели Рис. 4. в полулогарифмических координатах (точнее – выход логарифмического детектора в линейных координатах).

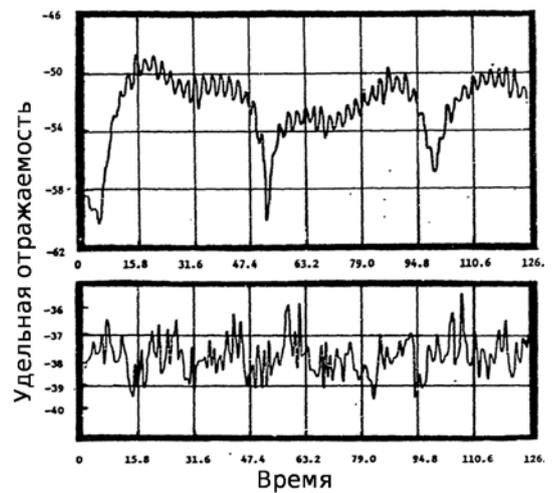


Рис. 3. Эскизы синхронной временной записи рассеянного сигнала с вертикальной поляризацией для осадков 33 мм/час сверху - 9.375 ГГц ; снизу - 95 ГГц

Привлекает внимание длинный «неэкспоненциальный хвост» этого распределения (см. посл. абзац «Состояние вопроса»). Отчет AD/A-007 254 настаивает на логонормальности первого распределения (см. правую панель Рис. 4) и проверка этих утверждений на распределениях 2010 года подтвердила, что в «биполулогарифмическом» масштабе лучшей, хотя и неидеальной, аналитической аппроксимацией следует считать гауссову кривую. Параметры

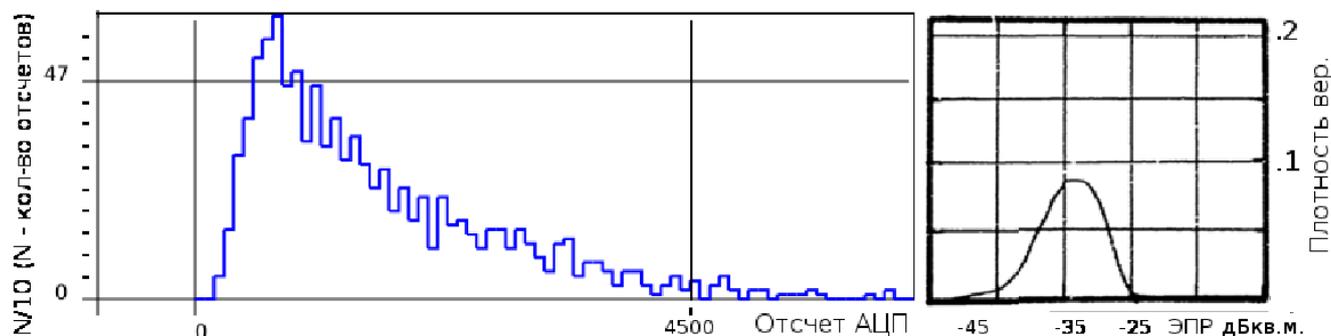


Рис. 4. Первое распределение сигнала на выходе линейно-логарифмического детектора

слева — результаты 2010 года (линейная шкала для сигнала с логарифмического детектора) на длине волны 18 мм для дождя 5 мм/час, справа — результаты 1975 года («биполулогарифмическая» шкала т.е. полулогарифмическая шкала для сигнала, который к тому же приходит с логарифмического детектора) для длины волны 3 см с вертикальной радиолокатора, работавшего на частоте 9,375 ГГц, приведены в Таблице 2.

Были проверены прочие результаты, представленные в отчете AD/A-007 254. В частности, были сопоставлены параметры корреляционных функций, нашел подтверждение вывод о независимости формы и стандартного отклонения первого распределения от интенсивности и типа однородных осадков (в то время, как ширина и среднее спектра того же сигнала демонстрировали ожидаемую зависимость от интенсивности осадков и динамических процессов в них). Причем в американском отчете эти факты устанавливались для всех частот зондирования, применявшихся в эксперименте и всех поляризаций (использовались: круговая правая, вертикальная и горизонтальная).

Таблица 2. Основные параметры РЛС 3 см

№	Параметр	Значение
1	Пиковая мощность сигнала	40 Вт
2	Длительность импульса	0,7 мкс
3	Период повторения импульсов	625 мкс
4	Длина волны	30 мм
5	Ширина осн. лепестка диаграммы	1,2°
6	Полоса приемного тракта	4 МГц
7	Шум-фактор	10 дБ

Таким образом, в условиях штатной работы оборудования в 1975 и в 2010 годах были получены экспериментальные данные, указывающие на принципиальное отличие первого распределения от теоретически ожидаемого в рамках модели Керра-Райса, которая до сих пор широко используется при описании обратного рассеяния в разреженных средах. На принципиальном характере различий хотелось бы остановиться подробнее.

Сигналы, имеющие распределения значений экспоненциального типа (наиболее часто встречаемые на практике распределения значений: экспоненциальное, гамма- и нормальное распределения), после линейно-логарифмического детектирования будут иметь распределение с отрицательной асимметрией. Иными словами, у таких распределения после логарифмирования правого «хвоста» быть не может. В отношении этого «замечательного» свойства логарифмической функции уместно напомнить известное выражение Л. Д. Ландау о том, что логарифмическая функция – это вообще не функция, а константа... Важно, что нормальное распределение после двойного

логарифмирования может дать только один тип распределений, который почти не рассматривался в задачах распространения. Речь идет о первом распределении экстремальных значений: $\Pr(X \leq x) = \exp\{-\exp(-(x-\xi)/\theta)\}$ [11].

Результат рассматриваемых экспериментов требовал объяснений как самого факта наличия распределения такого типа, так и причин, по которым оно отсутствовало в монографии Керра. С целью ответа на первый вопрос авторами на базе опыта предыдущих исследований была разработана численная модель формирования рассеянного поля на частицах разреженных сред, построенная на новых принципах (без явного задания распределения экстремальных значений).

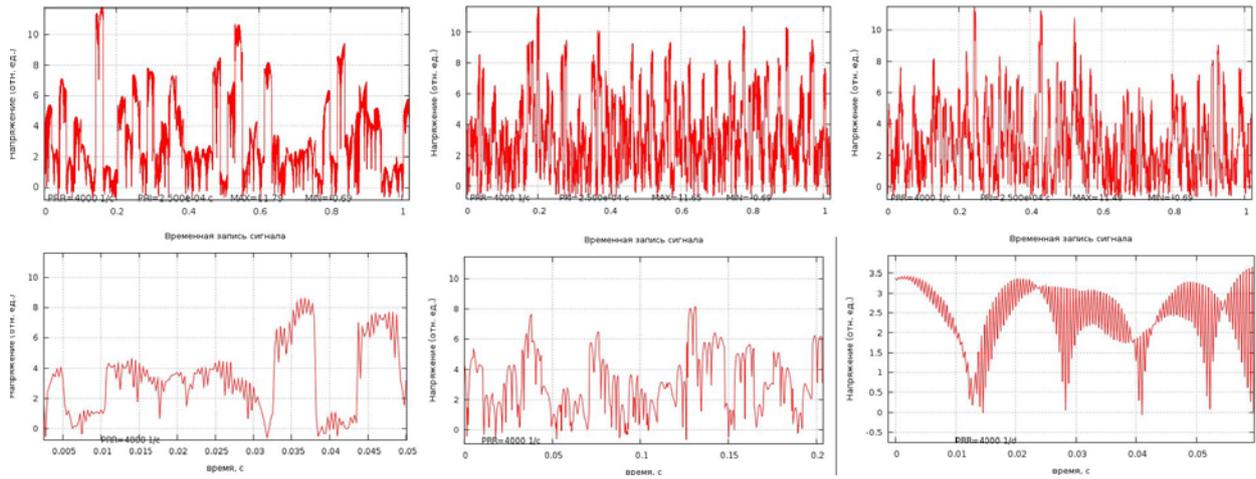


Рис. 5. Модельные временные ряды сигналов при различных значениях скорости и турбулентности в разных масштабах

Характерные формы сигналов во времени, полученные с использованием численной модели процесса при разных значениях скорости ветра и величины турбулентных пульсаций, показаны на Рис. 5 (в разных масштабах). Распределения значений этих сигналов на выходе логарифмического детектора показаны на Рис. 6. Аналитическое описание модели требует отдельного обсуждения и в настоящей статье рассматриваться не будет.

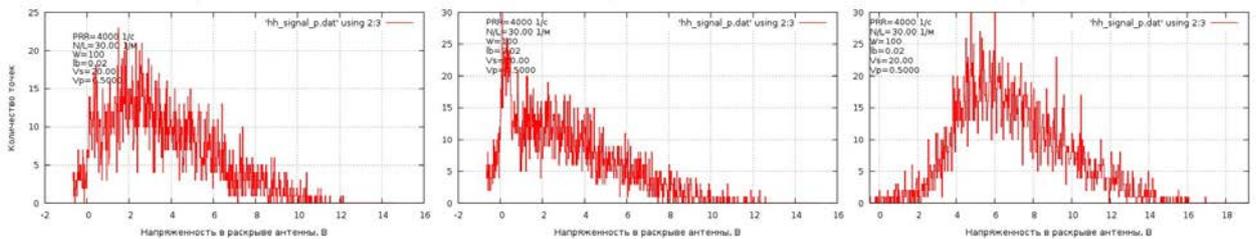


Рис. 6. Формы модельного первого распределения (выход логарифмического детектора) с «хвостом» вправо.

Так же хотелось бы отметить, что — учитывая особенности обработки сигнала для получения первого распределения (и её «глубоко дискретный» характер) — аналоговый принцип работы послевоенного оборудования вряд ли мог являться причиной отсутствия правильной его формы в монографии Керра. Среди таких причин в первую очередь следует указать протяженность импульсного объема, более низкую частоту зондируемого излучения по сравнению с теми, что использовались в рассмотренных выше экспериментах, высокую интенсивность дождя у Керра, и человеческий фактор при обработке экспериментальных данных.

Выводы. Применение линейно-логарифмического преобразования и анализ сигнала позволили установить характерные особенности его первого распределения при рассеянии «короткого» радиоимпульса в осадках различной интенсивности, которые ранее не были приведены в литературе.

Создана упрощенная численная модель формирования рассеянного поля радиоимпульса в разреженной среде, с помощью которой проиллюстрирована возможность получения первого распределения экстремальных значений в качестве первого распределения сигнала и проведен анализ основных факторов, влияющих на его статистические параметры.

Учет в численной модели, особенностей линейно-логарифмического преобразования сигнала [12] показал, что различия во внешнем виде временной записи сигналов на разных частотах (см. Рис. 2, 3) являются не частотно-зависимым эффектом, а «шумозависимым»: чем меньше шум-фактор приемного тракта, тем больше провалы сигнала в отрицательных экстремумах из-за привязки положения рабочей точки начала логарифмирования в логарифмирующем усилителе. Учитывая, что радиолокатор 95 ГГц работал с шум-фактором 28 дБ, а локатор 9,375 ГГц – с шум-фактором 10 дБ, а также принимая во внимание достаточно высокий шум-фактор в эксперименте 2010 года (см. Таблицы 1, 2) можно объяснить разницу в форме временной записи сигналов, изображенных на Рис. 2, 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., Рассеяние радиоволн разреженной средой и статистическая радиометеорология. Научный вестник МГТУ ГА, Серия "Радиофизика и электроника", вып. 137, 2006.
2. Коломиец С. Ф., Интерпретация Z-R соотношения в дождях на конечных периодах времени измерения с учетом условий рассеяния Ми. Успехи современной радиоэлектроники, 12, 2007.
3. Фельдман Ф. И., Мандуровский И. А., Теория флуктуаций локационных сигналов отраженных распределенными целями. М: «Радио и связь», 1988 – 272 с.
4. Иванов А. П., Оптика рассеивающих сред. Изд-во «Наука и техника», Минск, 1969 – 572 с.
5. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., Куприянов П. В., Форма спектра рассеянного поля как источник информации о рассеивающей среде и протекающих в ней динамических процессах. Научный вестник МГТУ ГА, Серия "Радиофизика и электроника", вып. 176, 2012 - с. 18.
6. С. Ф. Коломиец, Статистический подход к описанию рассеяния электромагнитных волн на частицах разреженных сред. Научный вестник МГТУ ГА, Серия "Радиофизика и электроника", вып. 193, 2013.
7. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., В. И. Криворучко, Куприянов П. В., Петров С. А. Энергетический потенциал твердотельных радиолокационных СВЧ-приемопередатчиков непрерывного режима. Настоящий сборник.
8. С. А. Knight, L. J. Miller. Early Radar Echoes from Small, Warm Cumulus: Bragg and Hydrometeor Scattering, J. Atm. Sci., vol. 55, 18, 1998.
9. A. R. Jameson, A. B. Kostinski, Non-Rayleigh Signal Statistics in Clustered Statistically Homogeneous Rain. J. Atm. and Ocean. Techn., vol. 16, 5, 1999, pp. 575-583.
10. Распространение ультракоротких радиоволн / Пер. с англ. под ред. Б. А. Шиллерова - М.: Сов. радио, 1954. – 710 с.
11. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М: «Мир», 1965. – 451 с.
12. Волков В. М., Логарифмические усилители. ГИТЛ УССР, Киев, 1962. – 240 с.
13. Бакулев П.А., Кошелев В.И., Андреев В.Г., Оптимизация АРСС—моделирования эхо-сигналов // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1994.— Т.37.— N9.— С. 3-8.

SCATTERING OF A SIMPLE INDIVIDUAL RADAR PULSE IN RARIFIED MEDIUM

Kolomiets S. F.

The experimental data obtained in different years and by different scientific groups in rains (as rarified medium) are discussed in the article. It is shown that the results of such measurements are not complying with well-known Kerr-Rice model widely used for modeling backscattering of rarified medium. Short analysis of reasons for this is presented

Key words: rarified medium, pulsed radiation, Kerr-Rice model, radar meteorology.

REFERENCES

1. Gorelik A. G., Kolomiets S. F., Rasseyanie radiovoln razrezhennoj sredoj i statisticheskaya radiometeorologiya Nauchnyj vestnik MGTU GA, Seriya "Radiofizika i ehlektronika", vyp. 137, 2006.

2. **Kolomic S. F.**, Interpretaciya Z-R sootnosheniya v dozhdyah na konechnyh periodah vremeni izmereniya s uchetom uslovij rasseyaniya Mi. Uspekhi sovremennoj radioehlektroniki, 12, 2007.
3. **Fel'dman F. I., Mandurovskij I. A.**, Teoriya fluktuacij lokacionnyh signalov otrazhennyh raspredelen-nymi celyami. M: «Radio i svyaz'», 1988 – 272 s.
4. **Ivanov A. P.**, Optika rasseivayushchih sred. Izd-vo «Nauka i tekhnika», Minsk, 1969 – 572 s.
5. **Gorelik A. G., Kolomic S. F., Kupriyanov P. V.**, Forma spektra rasseyannogo polya kak istochnik informacii o rasseivayushchej srede i protekayushchih v nej dinamicheskikh processah. Nauchnyj vestnik MGTU GA, Seriya "Radiofizika i ehlektronika", vyp. 176, 2012 - s. 18.
6. **S. F. Kolomic**, Statisticheskij podhod k opisaniyu rasseyaniya ehlektromagnitnyh voln na chasticah razre-zhennyh sred. Nauchnyj vestnik MGTU GA, Seriya "Radiofizika i ehlektronika", vyp. 193, 2013.
7. **Gorelik A. G., Kolomic S. F., V. I. Krivoruchko, Kupriyanov P. V., Petrov S. A.** Energeticheskij potencial tverdotel'nyh radiolokacionnyh SVCH-priemoperedatchikov nepreryvnogo rezhima. Nastoyashchij sbornik.
8. **C. A. Knight, L. J. Miller.** Early Radar Echoes from Small, Warm Cumulus: Bragg and Hydrometeor Scattering, J. Atm. Sci., vol. 55, 18, 1998.
9. **R. Jameson, A. B. Kostinski**, Non-Rayleigh Signal Statistics in Clustered Statistically Homogeneous Rain. J. Atm. and Ocean. Techn., vol. 16, 5, 1999, pp. 575-583.
10. Rasprostranenie ul'trakrotkih radiovoln / Per. s angl. pod red. B. A. SHillerova - M.: Sov. radio, 1954. – 710 s.
11. **Gumbel E.** Statistika ehkstreml'nyh znachenij. M: «Mir», 1965. – 451 s.
12. **Volkov V. M.**, Logarifmicheskie usiliteli. GITL USSR, Kiev, 1962. – 240 s.
13. **Bakulev P.A., Koshelev V.I., Andreev V.G.**, Optimizaciya ARSS—modelirovaniya ehkho-signalov // Izv. vuzov. Radioehlektronika.— 1994.— T.37.— N9.— С. 3-8.

Сведения об авторах

Коломиец Сергей Федорович, 1971 г.р., к.ф.м.н., научный сотрудник МФТИ, автор 25 научных работ, область научных интересов – радиолокационная метеорология, статистическая радиофизика и электродинамика.