



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ШУМА ОТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

MATHEMATICAL MODEL OF RADAR VEGETATION CLUTTER

УДК 621.396.96:001.891.573

СИЗОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ
vladimir.sizov@mail.ru

ЗОСИМОВ ВЛАДИСЛАВ ВАДИМОВИЧ

ПЕРЕВЕРЗЕВ АЛЕКСЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ

СТРЕКОПЫТОВ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ

SIZOV VLADIMIR I.
vladimir.sizov@mail.ru

ZOSIMOV VLADISLAV V.

PEREVERZEV ALEXEY L.

STREKOPYTOV DMITRIY V.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1
 Tel.: +7 (499) 720-87-70

National Research University of Electronic Technology
 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
 Tel.: +7 (499) 720-87-70

Предложена модель (эквивалентный генератор) радиолокационного шума от растительности, позволяющая оценивать характеристики наземных однопозиционных и многопозиционных систем радиолокации и связи КВ и УКВ диапазонов.

Ключевые слова: модель (эквивалентный генератор) радиолокационного шума растительности; оценка параметров систем радиолокации и связи.

The paper presents a model (equivalent generator) of the vegetation clutter. It can be used to evaluate the characteristics of terrestrial monostatic and bistatic radar and communication systems operating in the HF and VHF bands.

Keywords: vegetation clutter generator; radar and communication systems parameter estimation.

ВВЕДЕНИЕ — СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отражение радиоволн от растительности проявляется в виде дополнительного шума системы — клаттера (от английского vegetation clutter) и является одним из основных факторов, ухудшающих характеристики систем радиолокации (вероятностей обнаружения и ложных срабатываний) и связи (уровень ошибок) [1].

На рис. 1 показан механизм возникновения шума от растительности в двухпозиционной (с разнесенными в пространстве приемником и передатчиком) радиолокационной или связной системе. В отсутствие растительности на приемник приходит сигнал постоянной мощности от передатчика (проникающий сигнал) в виде двух интерферирующих лучей, прямого и отраженного от земной поверхности.

Наличие окружающей растительности приводит к тому, что излучаемый сигнал переотражается от многочисленных элементов растительности (ствола, веток, листьев) и интерферирует с постоянным проникающим сигналом. Хаотические колебания элементов растительности под ветром приводят к случайным изменениям амплитуды и фазы отраженного сигнала и проявляются в виде дополнительной шумовой составляющей (рис. 1).

Для наземных радиолокационных сетей, предназначенных для обнаружения малоразмерных целей [2, 3], клаттер от окружающей растительности является основным фактором, ограничивающим энергетические характеристики системы, поскольку, в отличие от тепловых шумов системы или внешних помех, качество полезного сигнала не может быть улучшено простым увеличением мощности передатчика — мощность клаттера растет пропорционально.

Проблема отражений от растительности (клаттера) не нова и многократно описана в литературе как для радиолокационных [4, 5], так и для связных систем (под названием fading — замирание) [6–9].

Большинство исследований радиолокационного шума от растительности были проведены с использованием стандартных радиолокационных станций — как наземных, так и размещенных на воздушных и космических средствах. Как следствие, основная масса исследований проведена в классических радиолокационных диапазонах от 1 до 30 ГГц и выше.

Данных измерений на более низких частотах в УКВ диапазоне частот 30–300 МГц (VHF) и 300–1000 МГц (UHF) в литературе практически нет.

Опубликованные измерения в интересах систем связи [6–9] также проведены на более высоких частотах.

В исследованиях радиолокационного клаттера преобладает эмпирический подход — строятся различные модели (формулы), аппроксимирующие результаты конкретных измерений, и чаще всего, имитирующие только какую-то одну группу характеристик сигнала: только спектральные или только статистические свойства клаттера.

В известной авторам литературе не приводится внятного теоретического объяснения, почему полученные результаты и модели должны быть именно такими.

Анализ радиолокационных отражений от растительности и разработка математической модели, позволяющей искусственно генерировать шумовой сигнал, эквивалентный реальным отражениям от растительности, является актуальной задачей. Использование эквивалентного генератора шума

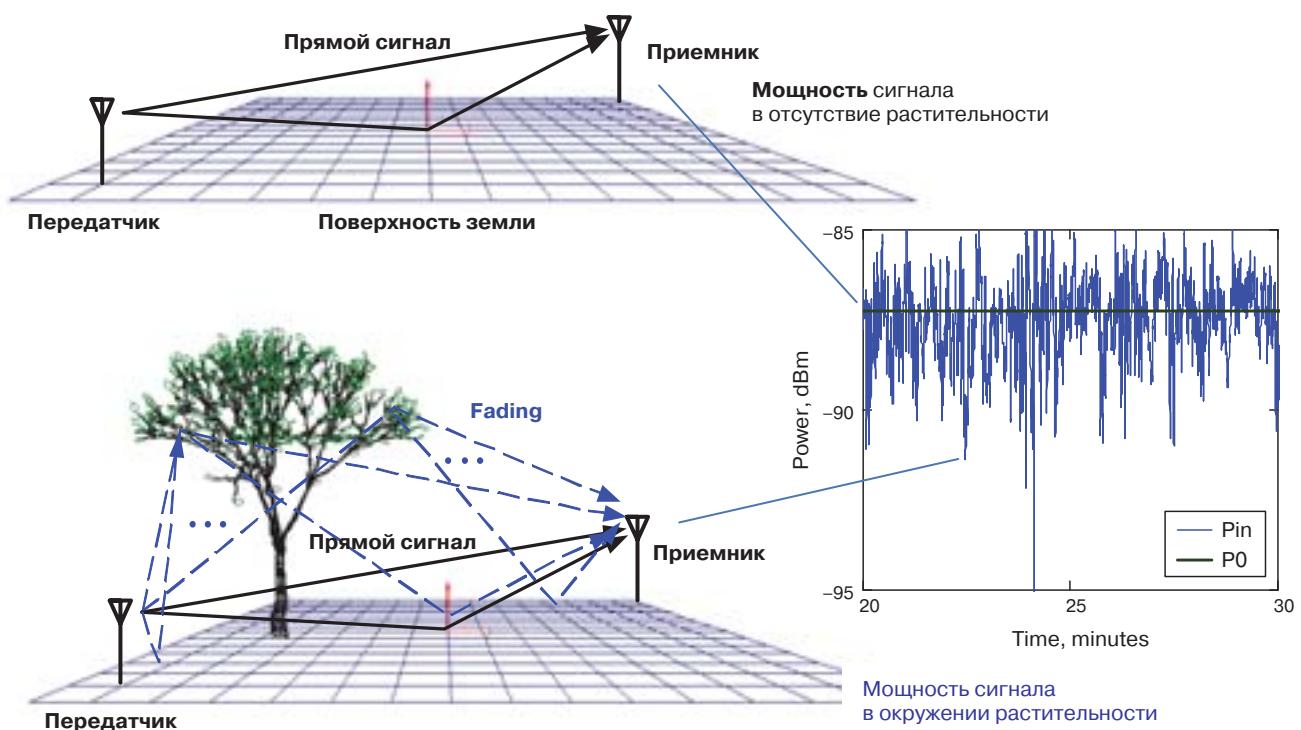


Рис. 1. Образование шумового сигнала от растительности

растительности позволяет прогнозировать характеристики систем и оптимизировать их параметры в процессе разработки и моделирования.

В настоящей работе предлагается математическая модель клаттера, построенная на основе анализа реальных долговременных записей клаттера, полученных в двухпозиционной приемо-передающей системе с непрерывным излучаемым сигналом [10], и физических представлений о механизме возникновения

радиолокационного шума от растительности [11]. Данная модель является развитием и уточнением более ранней математической модели клаттера [12].

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Длительные записи клаттера на различных частотах (от 64 до 434 МГц) были получены экспериментально.

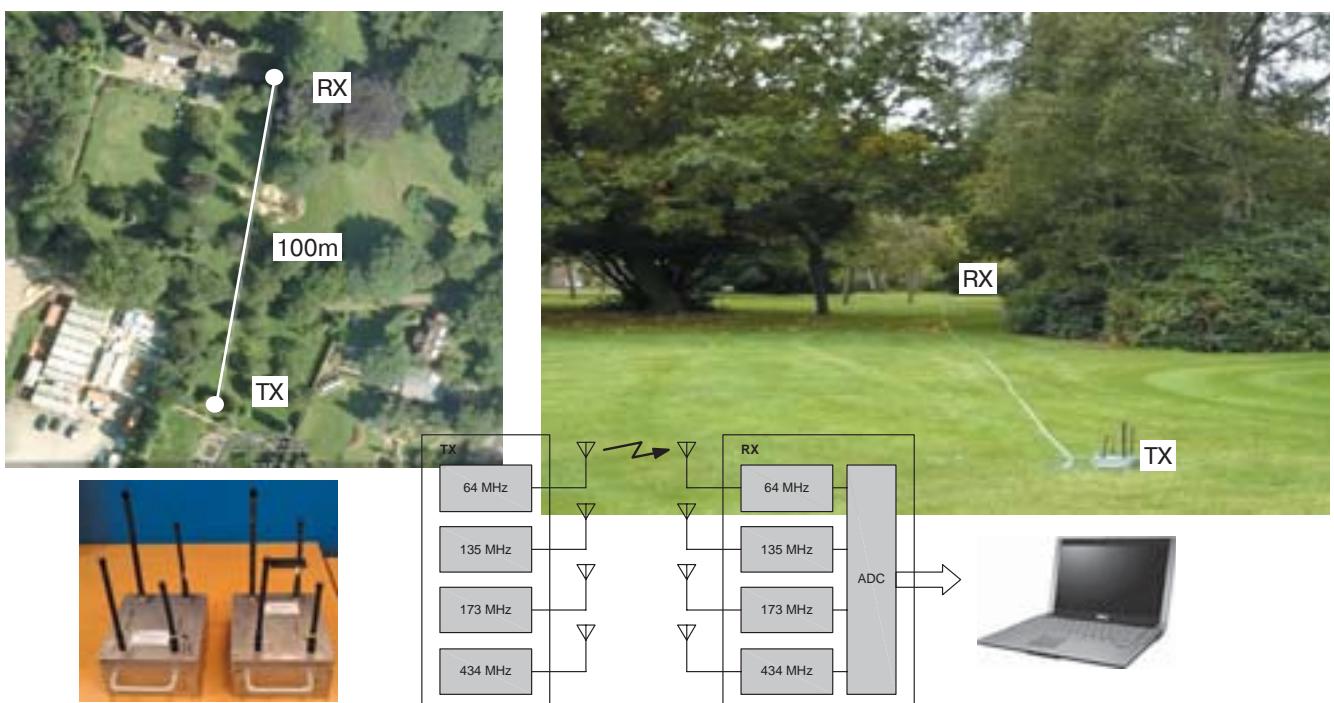


Рис. 2. Схема экспериментальных измерений клаттера

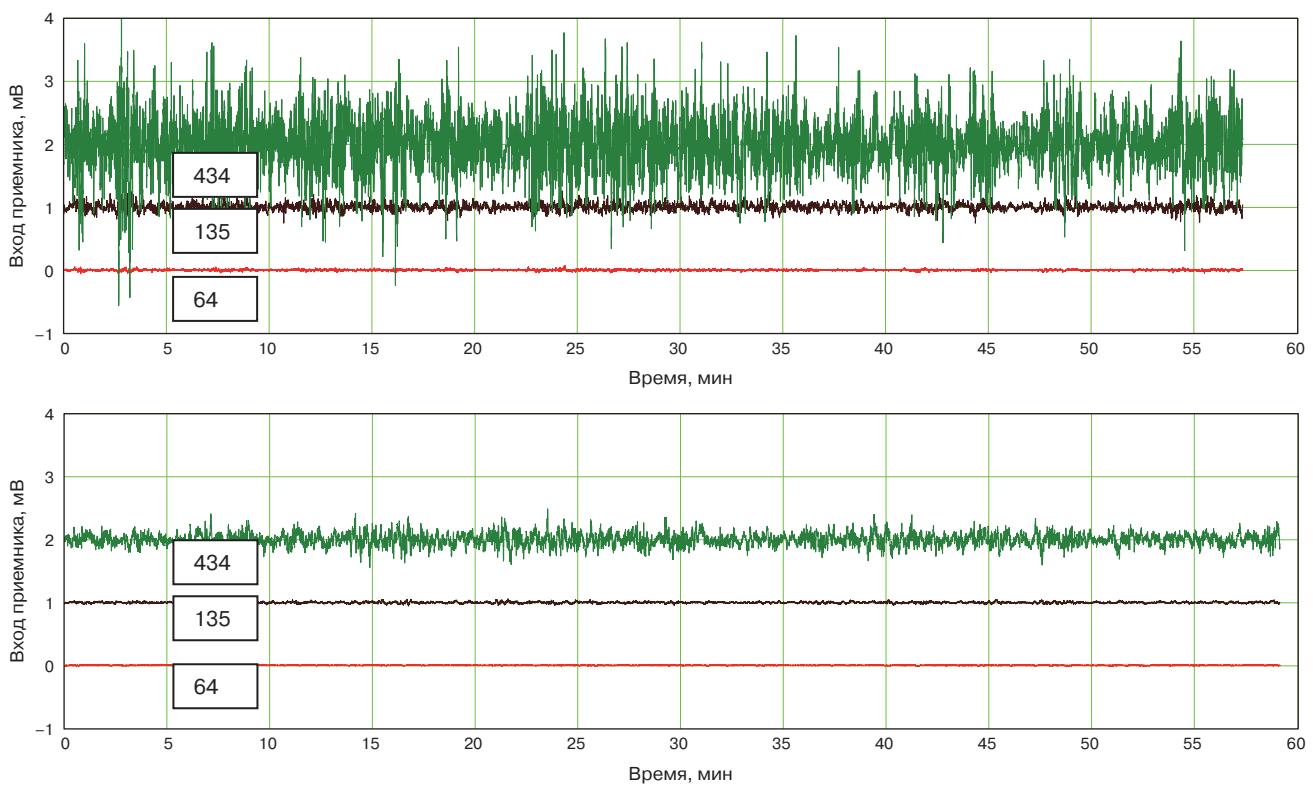


Рис. 3. Временные реализации клаттера для различных несущих частот и силы ветра: а) при очень сильном ветре (более 30 км/час, 18-й час записи); б) при умеренном вете (около 15 км/час, 40-й час записи)

Схема измерений

Измерения проводились в парковой зоне (рис. 2) с помощью четырехканального передатчика (TX) и приемника (RX), установленных на земле и разнесенных на расстояние 100 м.

Передатчик и приемник были построены на связных модулях фирмы Radiometrix [13]. Выходные сигналы приемника с выходов RSSI (received signal strength indicator) модулей, напряжение на которых пропорционально логарифму входной мощности, оцифровывались 16-битным аналого-цифровым преобразователем (ADC) с частотой дискретизации 20 Гц и сохранялись на жестком диске ноутбука. Измеренная величина пересчитывалась в значение входного напряжения шума через измеренные калибровочные кривые каждого из приемных модулей. Методика пересчета приведена в [10].

Измерительная аппаратура была специально спроектирована так, чтобы обеспечивать ее мобильность и возможность долговременной работы от батарей в необслуживаемом режиме.

Были получены непрерывные записи клаттера длительностью около 43 часов при различной силе ветра — от очень слабого (менее 10 км/час) до очень сильного (более 30 км/час).

Временные характеристики клаттера

На рис. 3 показаны измеренные реализации клаттера длительностью около одного часа для трех различных несущих частот (64, 135 и 434 МГц) при сильном и умеренном вете. Кривые для частот 135 и 434 МГц искусственно «приподняты» по постоянному уровню на графике на 1 и 2 мВ соответственно, чтобы избежать полного наложения сигналов.

Видно, что сигнал клаттера представляет собой нестационарный случайный процесс. Его средняя амплитуда резко растет при увеличении несущей частоты системы и силы ветра.

Нестационарный характер амплитудной огибающей клаттера сохраняется при любой силе ветра — от слабого ветра до очень сильного порывистого ветра. Очень похожая картина наблюдается и во всех остальных часовых интервалах накопленной базы записей клаттера.

На рис. 3 представлено изменение усредненного по 20-минутным интервалам отношения клаттера к средней постоянной мощности проходящего с передатчика на приемник сигнала несущей частоты (относительная мощность клаттера на графике) для различных частот измерения за весь период наблюдения.

Данные, измеренные на 173 МГц, очень близки по значениям и по характеру к измерениям на 135 МГц и не представлены

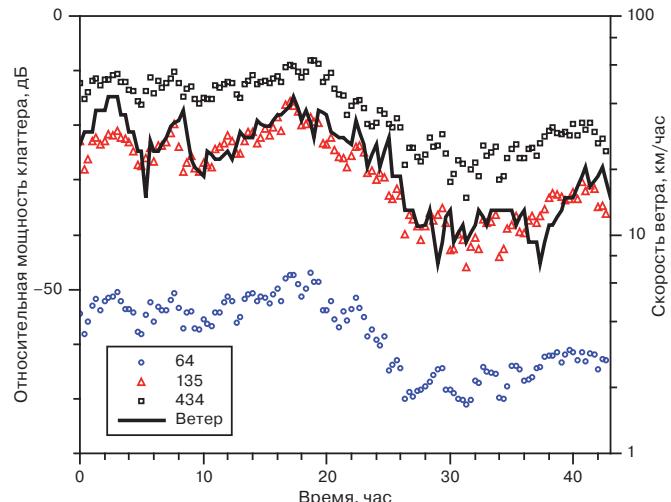


Рис. 4. Изменение интенсивности клаттера в зависимости от скорости ветра

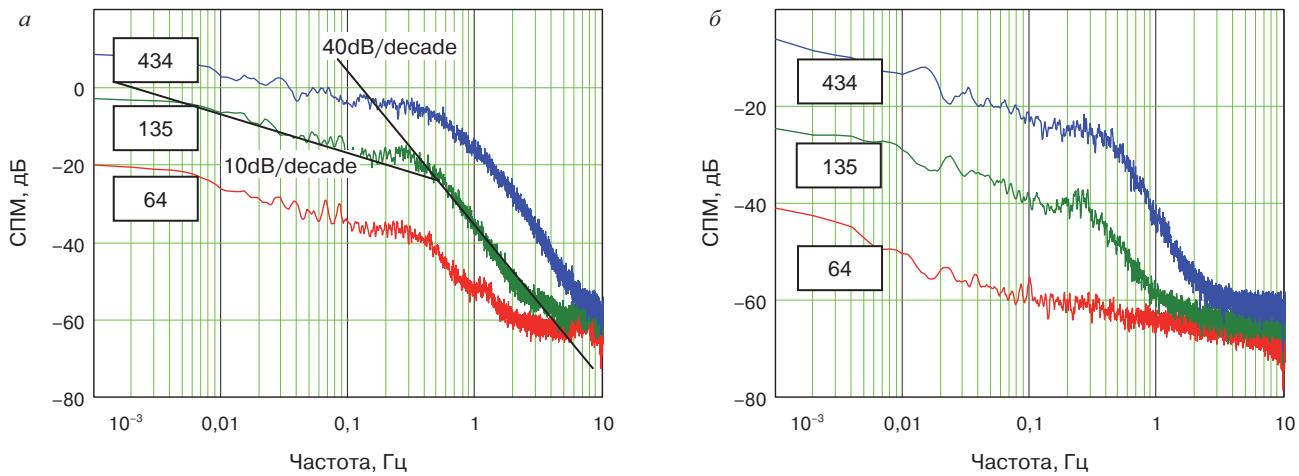


Рис. 5. Спектральная плотность мощности (СПМ) клаттера в зависимости от несущей частоты и скорости ветра: а) очень сильный (18-й час записи); б) слабый (31-й час записи)

для упрощения восприятия на рис. 2 и 3, а также в дальнейшем анализе.

Сплошной линией на графике (рис. 3) обозначена средняя (также по 20-минутным интервалам) скорость ветра в районе проведения измерений (данные из архива метеостанции, расположенной на удалении около 12 км от места измерений). Из графика видна хорошая корреляция средней мощности клаттера и средней скорости ветра — большей скорости ветра соответствует большая мощность клаттера. Таким образом, модуляция огибающей

мощности клаттера вызывается изменениями мгновенной скорости ветра в зоне наблюдений. Порывам ветра соответствуют резкие увеличения мощности клаттера.

Спектральные характеристики измеренного сигнала клаттера

На рис. 5 приведена спектральная плотность мощности (СПМ) клаттера в зависимости от несущей частоты измерения и скорости ветра.

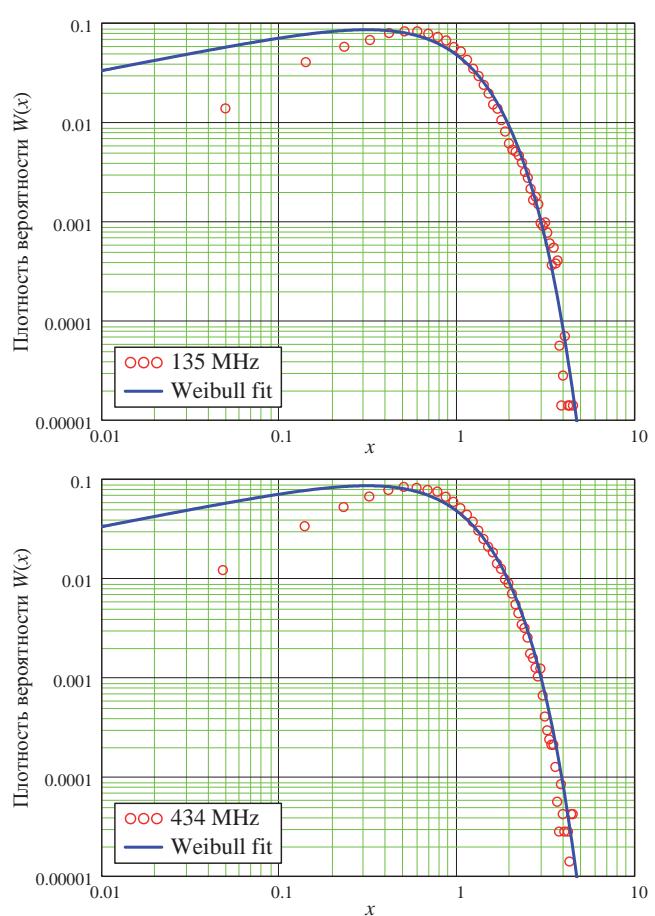
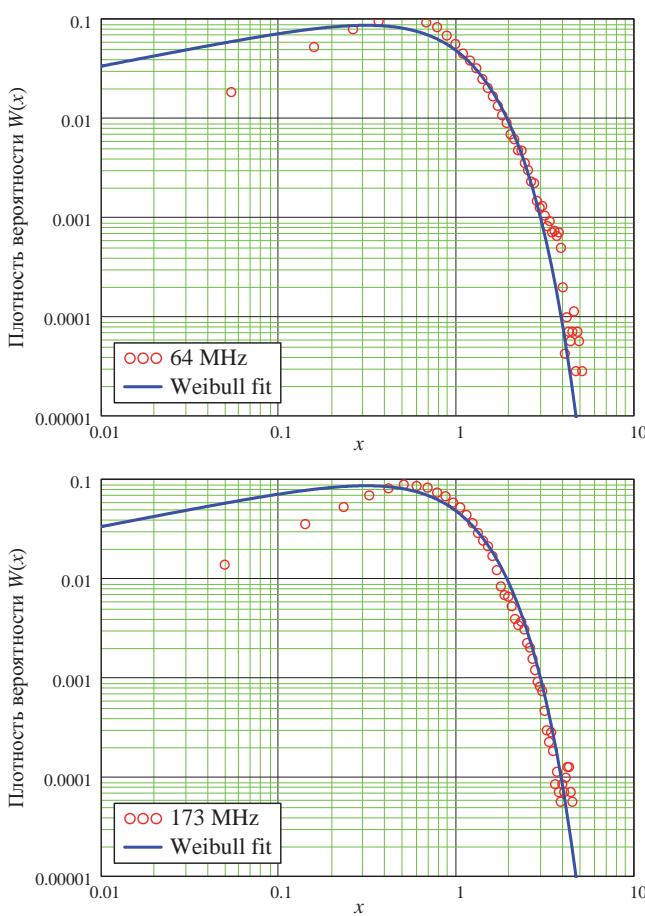


Рис. 6. Функция плотности распределения измеренных реализаций клаттера при сильном ветре

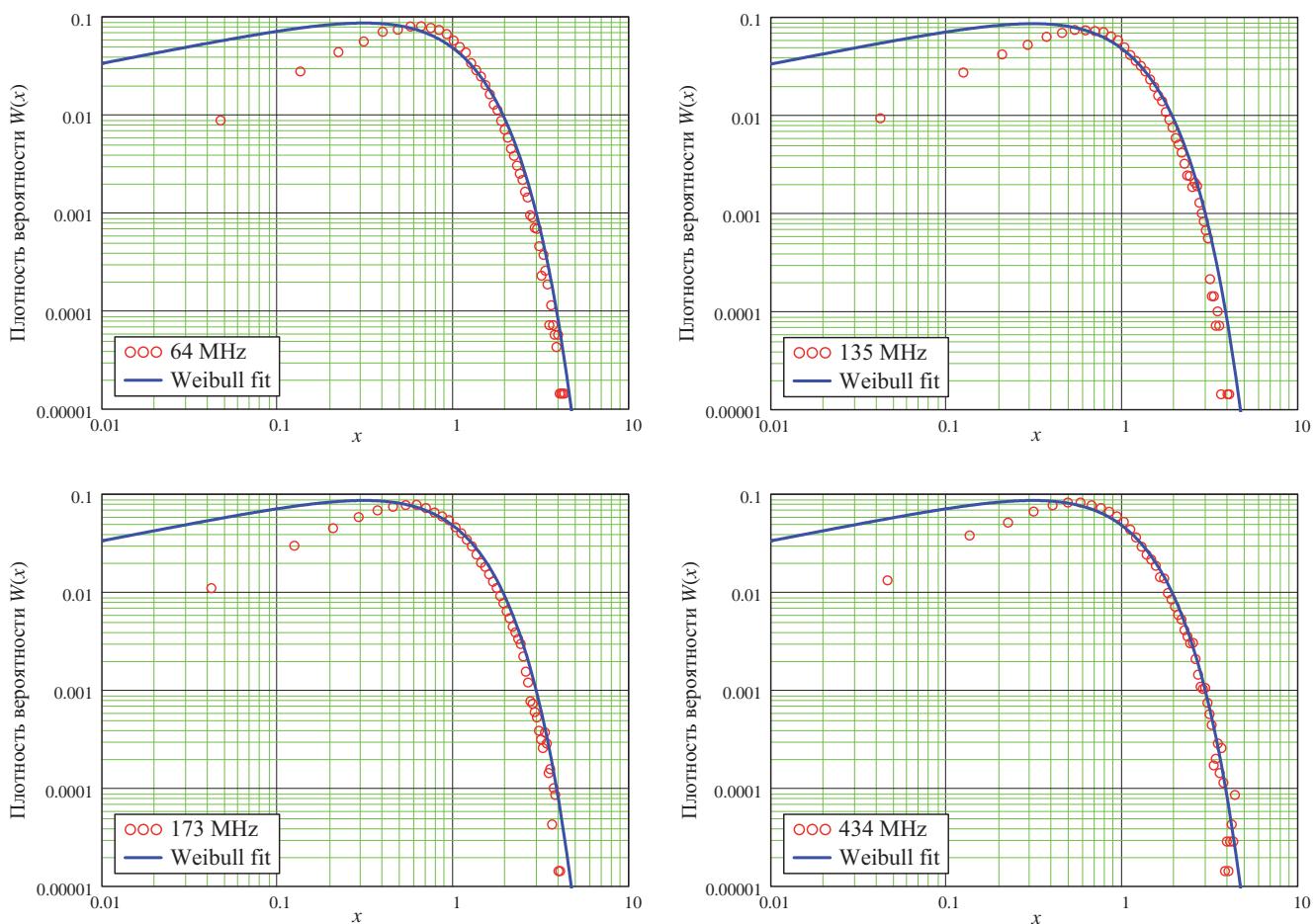


Рис. 7. Функция плотности распределения измеренных реализаций клаттера при слабом ветре

Из рисунка видно, что форма спектра практически не изменяется ни в зависимости от несущей частоты системы, ни от силы ветра при ее вариациях от слабого до очень сильного. Основная часть энергии клаттера сосредоточена в полосе до 1 Гц.

В спектре наблюдается точка резкого перегиба в районе 0,5–0,6 Гц. В области очень низких частот до точки перегиба спектральная плотность мощности спадает с наклоном примерно 10 дБ/декаду. После точки перегиба скорость спада резко увеличивается до 40 дБ/декаду (рис. 5а).

На рис. 5 также хорошо заметна зависимость спектральной плотности мощности от несущей частоты: при ее увеличении от 64 до 434 МГц (на 8,3 дБ) СПМ клаттера увеличивается примерно в 4-й степени от частоты: около 30 дБ при очень сильном ветре и около 36 дБ при очень слабом.

Статистические характеристики

Знание статистических характеристик огибающей клаттера имеет большое значение при вычислении кривых обнаружения сигналов на фоне клаттера и расчета энергетических характеристик системы.

Вычисление огибающей шумового сигнала клаттера производилось вычислением преобразования Гильберта исходного сигнала и последующим вычислением модуля комплексной амплитуды по методике, описанной в [10].

На рис. 6 и 7 приведены характеристики плотности вероятности огибающей клаттера для различных частотных каналов

при сильном ветре (3-й час наблюдений) и слабом ветре (31-й час записи), соответственно.

Из сравнения рис. 6 и 7 видно, что и статистические свойства клаттера практически не зависят ни от несущей частоты системы измерения, ни от силы ветра.

В области сильных и средних амплитуд огибающей (при $x > 0,5$) статистика огибающей клаттера хорошо аппроксимируется распределением Вейбулла

$$W(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha} \right],$$

где $W(x)$ — плотность вероятности, α и β — параметры распределения, x — амплитуда сигнала. На рис. 6 и 7 непрерывной линией показана аппроксимирующая кривая распределения Вейбулла с параметром $\alpha = 1,35$, одинаковым для всех графиков!

Значения функции плотности распределения для малых амплитуд отклоняются от распределения Вейбулла, приближаясь к распределению Рэлея при $\alpha = 2$.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛАТТЕРА

Парадоксальная, на первый взгляд, независимость характеристик клаттера от частоты измерения (по крайней мере, в диапазоне УКВ и более длинных волн) и силы ветра требует объяснения, и такое объяснение может быть дано на базе физической модели растительности, предложенной в [11].

Согласно этой модели любое дерево, куст и другая растительность может быть представлены в виде ансамбля эквивалентных

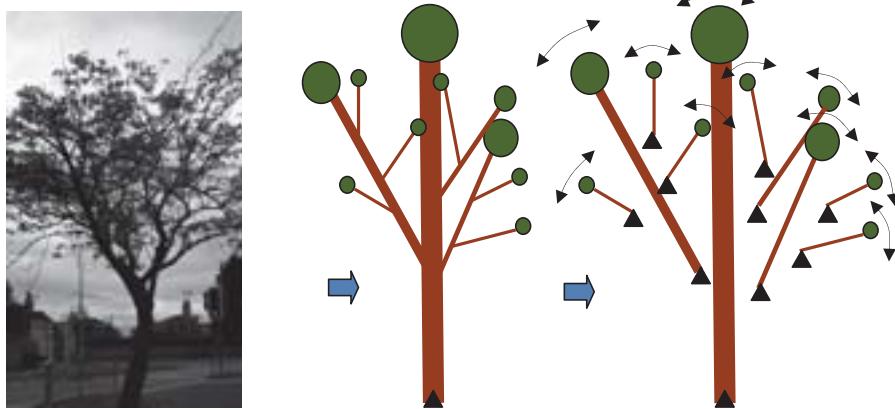


Рис. 8. Представление растительности как ансамбля независимо колеблющихся маятников

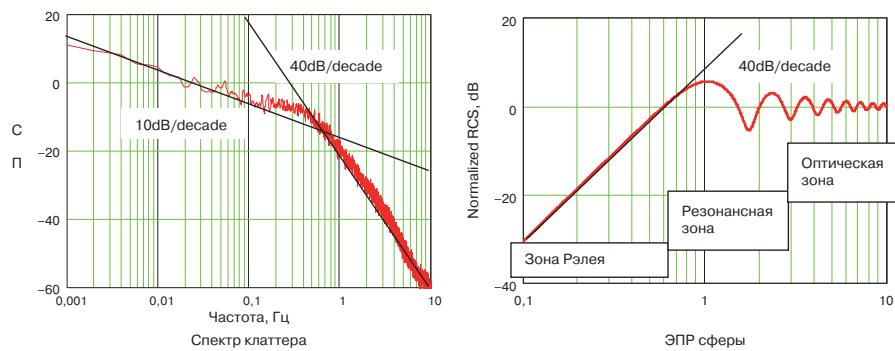


Рис. 9. Сравнение спектра клаттера и ЭПР сферы

маятников (рис. 8), колеблющихся под ветром каждый со своей амплитудой и частотой. В соответствии с центральной предельной теоремой статистики сумма таких стационарных колебаний должна создавать шум, близкий к нормальному шуму.

В работах [11] и [14] показано, что если амплитуда колебаний неподвижно закрепленного маятника меньше длины волны системы, он не создает допплеровского сдвига частоты в радиолокационной системе. Независимо от несущей частоты системы наблюдаются лишь первая и (при большей амплитуде колебаний) высшие гармоники его резонансной частоты. Этот эффект хорошо объясняет независимость спектра клаттера от несущей частоты и некоторое расширение спектра на высшей частоте измерений (434 МГц) при усилении ветра, что заметно на рис. 5.

Сопоставление размеров элементов растительности с длиной волны излучения от 4,5 м до 0,8 м в описываемой серии измерений показывает, что большинство элементов растительности (листья, мелкие ветви) имеют размеры меньше или сопоставимые с длиной волны. Поэтому их эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) и, следовательно, отраженная от них мощность радиосигнала, подчиняется закону рассеяния Рэлея, снижаясь в 4-й степени с уменьшением относительного размера в длинах волн. На рис. 9 приведено сравнение спектра сигнала клаттера (а) и ЭПР идеально проводящего шара (б), которое хорошо объясняет скорость спадания спектра клаттера в четвертой степени от частоты (40 дБ/декаду). Элементы растительности с меньшими размерами имеют собственную частоту колебаний более высокую, а амплитуду отраженного сигнала — в 4-й степени меньшую, чем элементы с большими размерами. Наличие на графике точки перегиба объясняется также просто — ограничением минимального

размера листьев. Для каждого конкретного типа растительности все листья примерно одинаковы по размеру и меньших просто нет.

Аналогичные соображения приводят к требованию ограничения спектра клаттера снизу — есть некоторые характерные для заданного типа растительности максимальные размеры или высоты стволов с минимально возможными частотами колебаний. Более низких частот в спектре быть не должно.

Эффектом рассеяния Рэлея можно объяснить и возрастание мощности клаттера в четвертой степени от несущей частоты системы: каждый в отдельности элемент растительности, кроме самых больших ветвей и стволов, отражает в четвертой степени сильнее на более высокой частоте. А в силу независимости их колебаний, суммарная мощность отражения от растительности определяется суммой мощностей отдельных элементов и также растет в четвертой степени с повышением несущей частоты системы.

Таким образом, при гипотетическом условии постоянства амплитуды колебаний эквивалентных маятников, клаттер должен представлять собой ограниченный по частоте сверху и снизу белый шум с нормальным распределением. Однако

элементы растительности не качаются постоянно с одинаковыми амплитудами, а раскачиваются ветром пропорционально его скорости. Мгновенные скорость и направление ветра в зоне растительности не остаются постоянными. Ветер представляет собой совокупность местных вихрей, движущихся лишь с более-менее постоянной средней скоростью переноса, но в каждый заданный момент времени в зоне конкретной ветки или листа скорость и направление ветра случайным образом меняются. Амплитуда колебаний элементов растительности в среднем растет с увеличением скорости ветра. Нормальный шум ансамбля маятников модулируется по амплитуде мгновенными порывами ветра. Ветер есть процесс хаотического переноса вещества атмосферы, а в физике известно, что такие процессы переноса описываются фликкер-шумом, или шумом вида $1/f$, спектр которого спадает со скоростью 10 дБ/декаду. Этому закону подчиняется и электронный шум полупроводниковых приборов, и шум кипящего чайника, и радиошум Вселенной, и многие другие процессы переноса. Именно ветровая модуляция обуславливает появление наклонной части спектра в области очень низких частот ниже точки перегиба. Правильность этой гипотезы проверена путем моделирования клаттера.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (ГЕНЕРАТОР) КЛАТТЕРА

На основе физических представлений о природе возникновения клаттера и особенностях его свойств предложена модель, имитирующая сигнал клаттера, или эквивалентный генератор клаттера.

Модель (рис. 10) является уточненным вариантом математической модели, предложенной в [12].

Модель содержит две основные ветви:

- генератор белого шума (Шум 2) с ограниченным частотным диапазоном со стороны как нижних, так и верхних частот (обеспечивается фильтрами ФНЧ2 и ФВЧ2);
- генератор изменяющейся амплитудной огибающей на основе низкочастотного розового шума (Шум 1, $1/f$) дополнительно ограниченного по частоте фильтром ФНЧ1, сигнал которого служит для амплитудной модуляции стационарного шума листвы. Степень нестационарности сигнала во времени задается параметром G (от gust factor в англоязычной метеорологической литературе), изменяющимся в пределах $G = 0-10$ и определяющим отношение максимальной амплитуды ветра в порывах к его среднему значению.

Для увеличения точности соответствия реально измеренного и моделируемого сигналов может быть введена третья ветвь, добавляющая эквивалентный тепловой (белый) шум приемника к сигналу клаттера с отношением клаттер/шум (К/Ш).

Поскольку при изменениях полос пропускания фильтров (в каждой ветви) меняется амплитуда шума, введены дополнительные нормировки к дисперсии шума в каждом канале (σ_1 , σ_2 и σ_3) для неизменности мощности полученного сигнала при изменении параметров модели.

На рис. 11 представлено сравнение характеристик сгенерированного и реально измеренного сигналов клаттера для сильного ветра (18-й час записи, частота 434 МГц).

Параметры модели выбирались из условия максимальной схожести с измеренным сигналом и были заданы следующими:

а) ветвь, имитирующая стационарный нормальный шум листвы, имеет фильтр нижних частот Чебышева 2-го порядка с частотой среза 0,5 Гц и неравномерностью 0,5 дБ, и последовательно включенный с ним фильтр высоких частот Баттервортса первого порядка с частотой среза 0,1 Гц (параметры этого фильтра практически не сказываются на результирующем сигнале);

б) ветвь модуляции ограничивается по полосе частот фильтром нижних частот Баттервортса первого порядка с частотой среза около 0,03 Гц (порядок и частота среза также достаточно слабо влияют на результат), гораздо важнее, что в качестве источника шума используется генератор фликкер-шума $1/f$ со спектром,

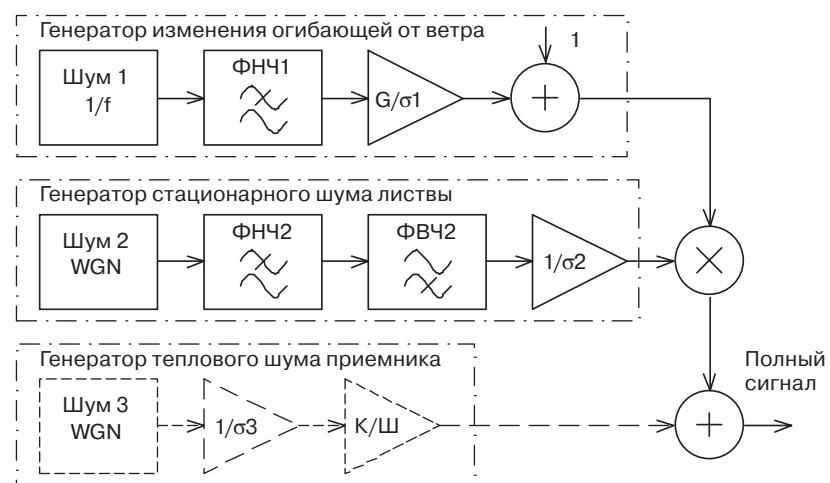


Рис. 10. Структурная схема эквивалентного генератора шума растительности

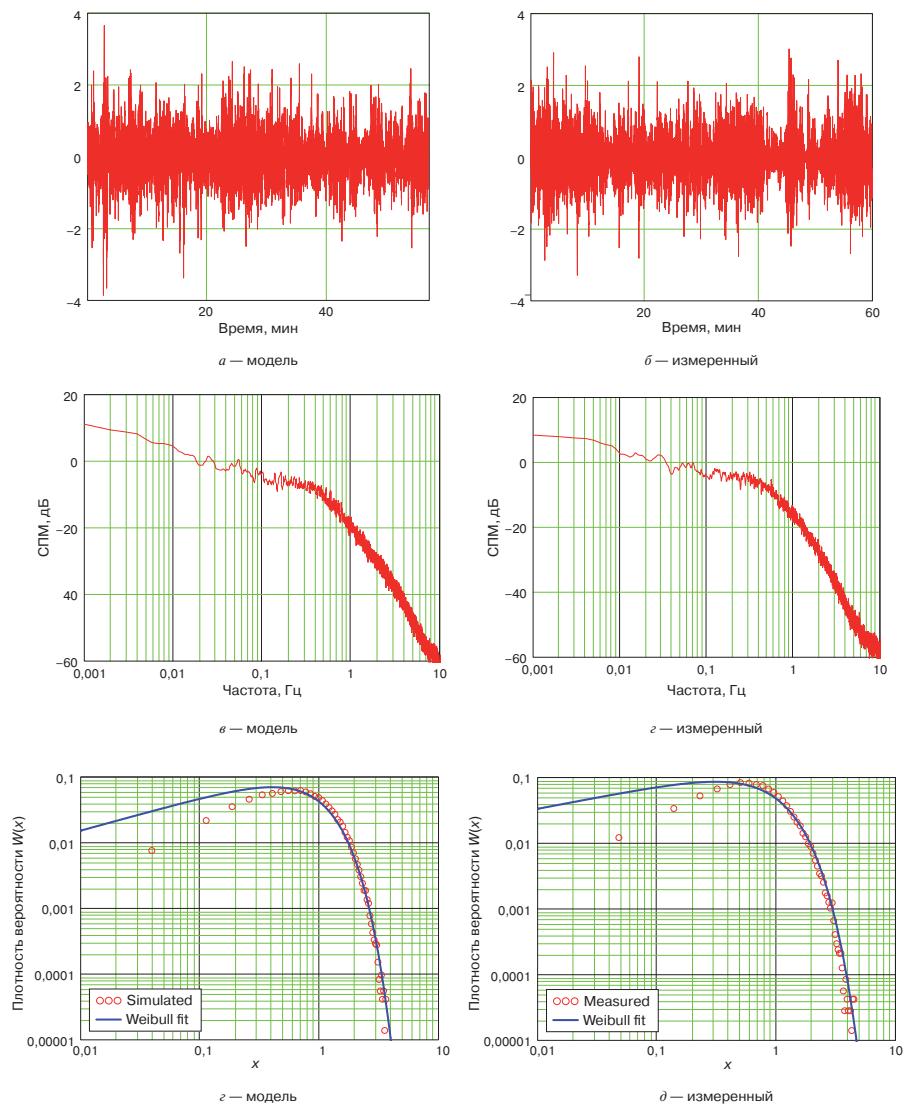


Рис. 11. Сравнение характеристик промоделированного и измеренного шума растительности: (а, б) — во временной области; (в, г) — в спектральной области; (д, е) — плотность вероятности (синяя кривая — распределение Вейбулла с эквивалентными параметрами)

спадающим на 10 дБ/декаду. Характеристики смоделированного клаттера на рис. 10 получены при $G = 1$.



Ветвь теплового шума приемника (стационарного нормального белого шума) дает очень слабый изгиб спектральной характеристики на частотах около 10 Гц и при моделировании клаттера для сильного ветра практически не участвует в формировании выходного сигнала. При более слабом ветре ветвь теплового шума позволяет получить «полку» в спектральной плотности на высоких частотах, аналогичную сигналам на рис. 5.

Модель реализована в системе САПР MATHCAD (v.15) с использованием стандартных средств генерации шума и фильтрации сигналов, но ничто не мешает ее реализации в любой другой среде программирования.

Полученный нестационарный случайный процесс (рис. 1а, б, г) близок как по спектральным, так и по статистическим характеристикам к реально измеренному сигналу клаттера (на рис. 1б, г, е). При этом даже точно повторяется отклонение статистики от распределения Вейбулла в области малых амплитуд сигнала. Это доказывает как адекватность собственно модели по отношению к измеренным реализациям клаттера, так и правильность физических представлений о природе и особенностях возникновения клаттера, на основе которых модель была сконструирована.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ результатов длительных измерений радиолокационного клаттера от растительности на различных частотах УКВ диапазона. Большая длительность реализаций дала возможность провести расчет спектральной плотности клаттера до очень низких частот (до 0,001 Гц), что позволило выявить не замеченные в предшествующих работах закономерности в форме спектра (медленный спад спектральной плотности мощности с наклоном 10 дБ/декаду в области очень низких частот) и связать их с ветровой модуляцией.

Отмечено, что и спектральные, и статистические характеристики сигналов клаттера практически не зависят ни от несущей частоты системы измерений, ни от силы ветра.

На основе физических представлений о механизме возникновения клаттера как ансамбля из огромного числа маятников, соответствующих отдельным элементам растительности и колеблющихся под ветром с независимыми и различными амплитудами и фазами, предложена математическая модель клаттера. Этот «ансамбль» издает один и тот же сложный «аккорд», отличающийся лишь громкостью и обертонами при усилении ветра и повышении рабочей частоты системы.

Модель представляет собой генератор эквивалентного шума, содержащий две основные ветви, — стационарный нормальный шум с ограниченным спектром (имитирующий стационарный шум растительности, каким бы он был при постоянной силе ветра) и модулирующий его по амплитуде розовый шум (модуляция по амплитуде в зависимости от изменения мгновенной силы ветра), также ограниченный по частоте сверху.

Сигнал эквивалентного шума растительности, полученный с помощью модели, очень хорошо согласуется по временной форме, спектральным и статистическим характеристикам с реально измеренными записями клаттера, что доказывает адекватность как собственно модели, так и правильность физических представлений, положенных в ее основу.

Предлагаемая модель применима для моделирования сигналов и оценки характеристик наземных однопозиционных и многопозиционных систем радиолокации и связи, работающих в УКВ диапазоне.

Практическая независимость характеристик измеренных реализаций клаттера от несущей частоты системы и силы ветра позволяет рассматривать модель как достаточно универсальную для различных частот и условий применения.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых — докторов наук МД-8949.2016.8. В работе использованы результаты экспериментальных измерений отражений от растительности, полученные в результате совместных работ МИЭТ и Университета Бирмингема (Великобритания).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зосимов В.В., Перееверзев А.Л., Сизов В.И. «Модуль сбора и обработки информации для исследования радиолокационных отражений от растительности», Международный форум «Микроэлектроника-2016», Республика Крым, г. Алушта, 26–30 сентября 2016 г. Тезисы докладов. — Москва: Техносфера, 2017. — С. 126–127.
2. Antoniou M., Sizov V., Hu Cheng, Jancovic P., Abdullah R., Rashid N. E. A., Cherniakov M. *“The Concept of a Forward Scattering Micro-Sensors Radar Network for Situational Awareness”*, 2008 International Conference on Radar, 2–5 Sept. 2008, Adelaide, SA, pp. 171–176.
3. Сизов В. И., Гуреев А. В. Концепция и состояние исследований сети наземных радиолокационных датчиков малой дальности, Международный форум «Микроэлектроника-2015», Республика Крым, г. Алушта, 28 сентября–3 октября 2015 г. Сборник докладов, — М.: Техносфера, 2016. — С. 615–626.
4. Sekine M., Mao Y. *“Weibull Radar Clutter”*, Peter Peregrins Ltd., 1990.
5. Billingsley J. B. *“Low Angle Radar Land Clutter. Measurements and Empirical Models”*, William Andrew Publishing, 2002.
6. Joshi G. G., Dietrich C. B., Anderson C. R. *et al. Near Ground Channel Measurements Over Line-of-site and Forested Paths*, IEE Proceedings — Microwaves, Antennas and Propagation, 152, (6). 2005, pp. 589–596.
7. Cheffena M., Ekman T. *“Dynamic Model of Signal Fading due to Swaying Vegetation”*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009, Article ID 306876, 11 p.
8. Cheffena M., Pérez Fontán F. *“Channel Simulator for Land Mobile Satellite Channel Along Roadside Trees”*, IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2005, 59, (5), pp. 1699–1706.
9. Cheffena M., Ekman T. *“Modeling the Dynamic Effects of Vegetation on Radiowave Propagation”*, Proc. ICC '08. IEEE Int. Conf. on Communications, Kjeller, Norway, May 2008, pp. 4466–4471.
10. Sizov V., Gashinova M., Zakaria N. A. and Cherniakov M. *“VHF Communication Channel Characterizations Over Complex Propagation Paths with Applications to Near Ground Wireless Sensors Network”*, IET Microwave, Antennas and Propagation, 2013, 7(3), pp. 166–174.
11. Sizov V., Hu Cheng, Antoniou M., Cherniakov M. *“Vegetation Clutter Spectral Properties in VHF/UHF Bistatic Doppler Radar”*, Proc. 2008 IEEE Radar Conference, May 26–30, 2008, Rome, Italy, pp. 1–6.
12. Gashinova M., Cherniakov M., Sizov V., Zakaria N. A. *“Empirical Model of Vegetation Clutter in Forward Scatter Radar Micro-Sensors”*, Proc. 2010 IEEE Radar Conference, May 10–14, 2010, Washington DC, USA, pp. 899–994.
13. <http://radiometrix.com/our-products/multichannel>.
14. Sizov V., Cherniakov M., Antoniou M. *“Forward Scattering Radar Power Budget Analysis for Ground Targets”*, IET Radar, Sonar and Navigation, 2007, 1, (6), pp. 437–446.