

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ, СВЯЗИ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 621.396.969

В. Г. ГУТНИК¹, В. Н. ГОРОБЕЦ², Ю. В. ГОНЧАРЕНКО²

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина

² Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61082
E-mail: gutnik@rian.kharkov.ua

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ОТРАЖЕНИЯ ОТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Проанализированы характеристики обратного рассеяния сигналов СВЧ диапазона растительностью. Показано, что при порывистом ветре радиолокационные сигналы, отраженные от небольших участков растительности, являются нестационарными – мощность отраженного сигнала и его мгновенные спектры зависят от времени. Предложен и реализован алгоритм формирования нестационарных радиолокационных сигналов в СВЧ диапазоне. Показано, что характеристики сигнала, сформированного для конкретных условий, удовлетворительно совпадают с характеристиками экспериментального сигнала, полученного при тех же условиях.

Ключевые слова: радиолокационные отражения, растительность, нестационарные сигналы, статистические характеристики, моделирование

1. Введение

Характеристики сигналов СВЧ диапазона, отраженных растительностью, используются при разработке радиолокационных систем (РЛС) для решения задач дистанционного зондирования, обнаружения, селекции, распознавания и определения координат объектов на фоне отражений от местности. Получение достоверных характеристик обратного рассеяния сантиметровых радиоволн растительностью требует всестороннего изучения рассеянных сигналов.

Большой интерес представляют сигналы, использующие информацию не только об амплитуде отраженного сигнала, но и о его фазе, в которой заложена информация о скорости перемещения отражателей. Для получения этой информации необходимо в приемном устройстве получить сигнал, фаза которого пропорциональна разности фаз отраженного и излученного сигналов. Этот

сигнал авторы называют доплеровским сигналом, поскольку он получен благодаря изменению частоты сигнала, отраженного движущимся объектом, (эффект Доплера). Сигнал содержит колебания с доплеровскими частотами и обладает доплеровским спектром (распределением мощности отраженного сигнала по доплеровским частотам), поэтому его логично назвать доплеровским. В работе дальнейшие рассуждения ведутся применительно к доплеровским сигналам.

Сигналы обратного рассеяния от участков поверхности с растительностью являются случайными функциями времени, которые полностью описываются многомерным законом распределения. Моменты этого распределения являются характеристиками обратного рассеяния. На практике в качестве основной характеристики используют дисперсию мгновенных значений принятого сигнала, которая определяется удельной эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) пространственно-распределенных рассеивателей и пространственными

© В. Г. Гутник, В. Н. Горобец, Ю. В. Гончаренко, 2012

размерами рассеивающего элемента. В доплеровских сигналах представляет значительный интерес спектральная плотность мощности принятого сигнала, которая характеризует распределение мощности этого сигнала по доплеровским частотам. Для описания нормально распределенных стационарных сигналов, отраженных растительностью, этих характеристик вполне достаточно.

С уменьшением размеров отражающего элемента поверхности сигнал, рассеянный растительностью, даже в случае растительности одного вида, перестает быть стационарным [1–3]. По-видимому, это связано с тем, что элемент разрешения радиотехнической системы и время наблюдения, необходимое для задач, которые она решает, становятся соизмеримыми с пространственно-временными неоднородностями элемента поверхности, отражающего радиоволны.

В случае использования доплеровских сигналов нестационарность отраженных сигналов проявляется потому, что с изменением интенсивности ветра в пространстве и во времени на участке растительности, отражающем радиоволны, появляются участки растительности, имеющие различные мгновенные скорости. Это обуславливает разные интенсивности рассеянного сигнала на разных доплеровских частотах. При этом принятый радиотехнической системой сигнал перестает быть стационарным, появляется изменчивость во времени характеристик отраженного сигнала. Изменчивость эта носит случайный характер со своим законом распределения, моменты которого необходимо знать для описания рассеянного сигнала. Учитывая, что все характеристики, описывающие рассеянный сигнал, в случае его нестационарности, вдобавок ко всему, будут зависеть не только от времени, но и от длительности интервала наблюдения, процесс описания такого сигнала существенно усложняется.

Усредненные характеристики обратного рассеяния позволяют оценить только эффективность функционирования разрабатываемых радиотехнических систем в среднем. Но разработчиков в большинстве случаев интересуют не усредненные характеристики. Их интересуют характеристики систем, полученные за конкретный интервал времени, характерный для реальных радиотехнических систем, решающих определенные задачи. А это, как правило, интервалы времени от долей секунды до нескольких секунд.

В этом случае альтернативой описанию статистическими характеристиками сигналов, отраженных растительностью, может быть их моделирование, в результате которого формируют сигнал с характеристиками, близкими к реальным (экспериментально полученным). В настоящее время существует много моделей рассеяния радиоволн растительностью. Но они позволяют получать либо отдельные статистические характеристики рассеяния [4, 5], либо в результате моделирования синтезируют стационарный случайный процесс [6]. В исследуемом нами случае сигнал носит явно нестационарный характер. Поэтому необходимо создать модель рассеяния радиоволн растительностью, которая будет формировать сигнал, представляющий собой нестационарный случайный процесс со статистическими характеристиками, которые совпадают с экспериментально полученными.

Для создания такой модели необходимо знать реальные характеристики рассеянного растительностью сигнала – закон распределения и его моменты, мощность принятого сигнала, эффективную полосу частот, в которой сосредоточена эта мощность, и, при необходимости, моменты более высоких порядков. При этом нужно учитывать влияние ветра и размеров участка поверхности на характеристики рассеянного растительностью сигнала. Участок с растительностью должен иметь сравнительно небольшие размеры. Они должны быть сравнимы с минимальными пространственными неоднородностями скоростей ветра, которые еще способны приводить в движение растительность. По нашим прикидкам площадь участка должна составлять примерно единицы квадратных метров.

Целью работы является создание модели рассеяния сантиметровых радиоволн от небольшого участка растительности ($1 \div 2 \text{ м}^2$), обеспечивающей получение доплеровских сигналов, которые на любом интервале времени наблюдения имеют характеристики, близкие к экспериментальным.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) анализ статистических характеристик экспериментальных доплеровских сигналов, полученных в результате отражения сантиметровых радиоволн небольшим участком растительности;
- 2) разработка и реализация алгоритмов моделирования доплеровских сигналов, получаемых в результате рассеяния сантиметровых радиоволн

небольшим участком поверхности с растительностью.

2. Экспериментальные данные. Анализ

Для получения характеристик рассеяния использовались доплеровские сигналы, полученные в процессе экспериментальных исследований обратного рассеяния сантиметровых и миллиметровых радиоволн сельскохозяйственными зерновыми культурами (ячменем) под малыми (единицы градусов) углами скольжения. В этих экспериментах записывались реализации доплеровских сигналов длительностью по 15 мин с выхода двух РЛС непрерывного излучения, трехсантиметрового и восьмимиллиметрового диапазонов, при различных скоростях приповерхностного ветра. В обеих РЛС с преобразованием отраженного сигнала на нулевую промежуточную частоту используются простейшие фазовые детекторы, позволяющие выделять информацию как об амплитуде отраженного сигнала, так и о его фазе, в которой заложена информация о скоростях отражателей. Подробно работа такого детектора рассмотрена в [7].

В качестве объекта исследований использовался небольшой участок поля, размерами 2×1 м, поросший практически созревшим ячменем. Остальная растительность в радиусе 20 м была выкошена. Высота ячменя составляла примерно 50 ÷ 70 см. РЛС располагались на расстоянии примерно 10 м от объекта исследований. Совместно с записями сигналов, отраженных от участка растительности, синхронно регистрировались флуктуации скорости ветра над этим участком, получаемые с помощью термисторного датчика скорости ветра. Средние значения скоростей ветра в экспериментах составляли от 0 до 7 ÷ 8 м/с с порывами до 15 ÷ 20 м/с. В процессе экспериментальных исследований для калибровки уровня записывались сигналы, отраженные от эталонного отражателя – латунного шарика диаметром 60 мм, что позволило при обработке получить оценки удельной ЭПР растительности. Значение удельной ЭПР исследуемой растительности в проведенном эксперименте составило -27 дБ/м² в трехсантиметровом диапазоне и -25 дБ/м² в восьмимиллиметровом диапазоне. Полученные значения удельной ЭПР удовлетворительно совпадают с данными для похожей растительности, приведенными в [1, 2]. Поскольку экспериментальные доплеровские сиг-

налы при различных скоростях ветра и в разных диапазонах длин волн зондирующих сигналов имеют разные интенсивности, для удобства проведения их сравнительного анализа проводилась нормировка мгновенных значений доплеровских сигналов на их среднеквадратические значения, полученные для всей 15-минутной длины записанной реализации. Поэтому в дальнейшем в работе все рассуждения, связанные с получением и анализом статистических характеристик, проводятся для нормированных случайных сигналов.

Доплеровские сигналы от небольшого участка растительности представляют собой случайные процессы, закон распределения которых вполне удовлетворительно описывается нормальным законом с изменяющейся во времени дисперсией. Пример гистограммы распределения мгновенных значений доплеровского сигнала восьмимиллиметрового диапазона $p(x)$ для реализации длительностью $T = 5$ с при радиальной составляющей скорости ветра 5 м/с приведен на рис. 1. Сплошной линией на рисунке нанесен нормальный закон распределения. Видно, что плотность вероятности мгновенных значений для этой реализации удовлетворительно может быть описана нормальным законом. Кроме того, были получены оценки 3-го и 4-го моментов закона распределения для нескольких реализаций, но они оказались малы. Анализ нормированных доплеровских сигналов трехсантиметрового и восьмимиллиметрового диапазонов от растительности при радиальных скоростях ветра до 7 м/с для длин реализаций от долей секунды до сотен секунд показал, что доплеровские сигналы трехсантиметрового и восьмимиллиметрового диапазонов от небольшого участка растительности можно

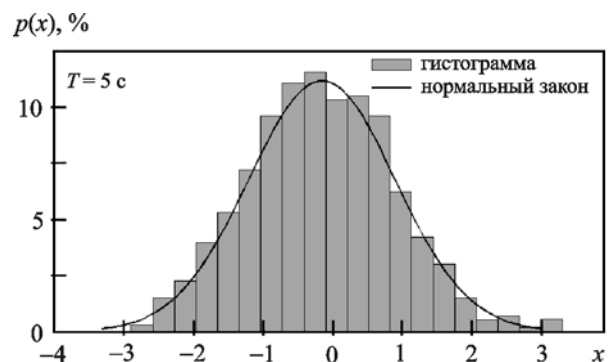


Рис. 1. Гистограмма распределения мгновенных значений доплеровского сигнала

считать реализациями случайных процессов с нормальным законом распределения.

Важно отметить, что при этом исследуемые доплеровские сигналы обладают рядом особенностей.

1. Доплеровские сигналы имеют изменяющуюся во времени дисперсию. Причем изменчивость дисперсии наблюдается как с изменением текущего времени при постоянном времени анализа, так при изменении времени анализа. На рис. 2 приведены экспериментально полученные зависимости среднеквадратического отклонения дисперсии доплеровского сигнала, нормированного на ее среднее значение, RS , от времени анализа, T .

Зависимости, приведенные на рис. 2, получены следующим образом. Для оценки флуктуаций дисперсии реализация сигнала длительностью 15 мин разбивалась на отрезки, длительностью 0.1 с (время анализа). Для каждого из этих отрезков сигнала находились значение дисперсии сигнала и ее среднеквадратическое отклонение, которое затем нормировалось на среднее значение дисперсии, полученное усреднением по всем анализируемым интервалам длительностью 0.1 с для всей длины записанного сигнала – 15 мин. Таким же образом получены значения нормированного среднеквадратического значения флуктуаций дисперсии для времен анализа от 0.1 до 450 с при разных значениях радиальной скорости ветра в трехсантиметровом и восьмимиллиметровом диапазонах волн зондирующего сигнала. Из рисунка видно, что для времен анализа меньше 1 с наблюдается сравнительно большой разброс дисперсий сигналов, до 120 % от среднего значения дисперсии, полученного для всей реализации дли-

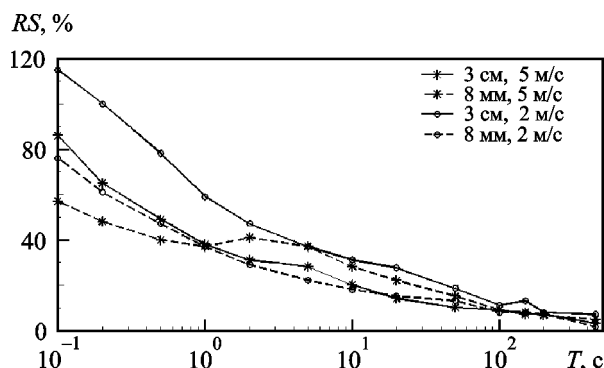


Рис. 2. Среднеквадратическое отклонение дисперсии, нормированное на ее среднее значение, в зависимости от времени анализа

тельностью 15 мин. С увеличением времени анализа значения нормированных флуктуаций дисперсии доплеровского сигнала уменьшаются. Для времен анализа более 100 с среднеквадратическое значение флуктуаций дисперсии не превышает 10 % от ее среднего значения. Причем можно сказать, что значение нормированных флуктуаций дисперсии доплеровских сигналов практически не зависит от длины волны зондирующего сигнала и от скорости приповерхностного ветра.

Исследуемый доплеровский сигнал от растительности можно представить как результат суммирования мгновенных значений элементарных сигналов от блестящих точек. Эти сигналы модулированы по фазе из-за хаотических колебаний блестящих точек, обусловленных воздействием на растительность ветра. Изменчивость дисперсии (мощности) суммарного доплеровского сигнала может быть связана с тем, что наблюдается интерференция сигналов от блестящих точек, количество которых на исследуемом участке поверхности сравнительно небольшое. Кроме того, это количество блестящих точек может изменяться во времени за счет эффекта затенения одних рассеивателей другими, что тоже может привести к изменчивости во времени мощности доплеровского сигнала.

2. Второй характерной особенностью доплеровских сигналов от небольшого участка растительности является то, что они имеют изменяющуюся во времени ширину спектральных плотностей мощности, полученных за сравнительно короткие интервалы времени. Эта изменчивость хорошо иллюстрируется рис. 3, на котором представлена спектрограмма реализации доплеровского сигнала восьмимиллиметрового диапазона длительностью 100 с при радиальной составляющей скорости ветра 5 м/с. Спектрограмма – это оконное преобразование Фурье, при котором определяется спектр произведения сигнала и некоторой оконной функции, локализованной на временной оси. Изменяя положение этой оконной функции на временной оси можно получать мгновенные спектры для отрезков сигнала определенной длительности в разные моменты времени. Эти спектры для отрезков сигнала длительностью примерно 0.6 с в зависимости от времени представлены на рис. 3, где по оси абсцисс отложено текущее время t в секундах, по оси ординат – доплеровская частота F_d , а интенсивность спектральных составляющих представ-

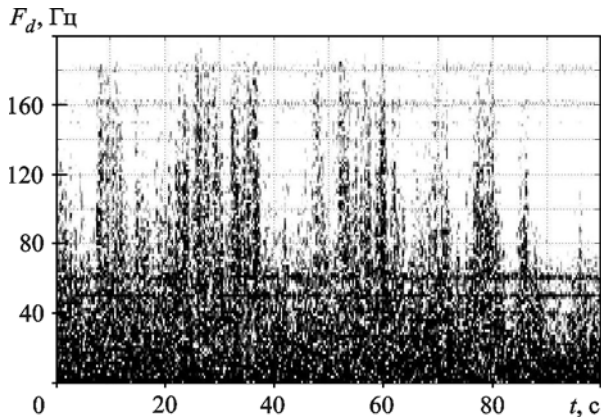


Рис. 3. Спектрограмма доплеровского сигнала восьми-миллиметрового диапазона

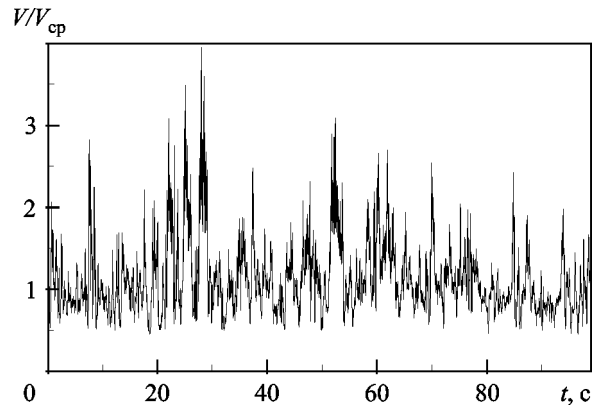


Рис. 4. Скорость ветра, нормированная на среднее значение 5 м/с

лена в оттенках серого. Чем темнее участок спектра, тем больше его спектральная плотность.

При анализе нестационарных процессов с помощью спектрограмм можно наблюдать изменчивость спектральных составляющих во времени, выявлять спектральные особенности сигнала и их положение во временной области. Из рис. 3 видно, что спектральные плотности мощности доплеровского сигнала, полученные за время анализа 0.6 с, в разные моменты времени имеют различные полосы частот. Ширина спектров изменяется в пределах от 30 до 180 Гц. Это свидетельствует о том, что в разные моменты времени элементарные рассеиватели (блестящие точки) имели разные радиальные скорости перемещения, от 0 до 0.1 м/с для минимальной ширины доплеровского спектра и до 0.6 м/с для максимальной ширины доплеровского спектра.

На рис. 4 приведена зависимость скорости ветра от времени, которая была записана синхронно с записью доплеровского сигнала, спектрограмма которого приведена на рис. 3. По оси ординат отложены значения скорости ветра, нормированные на ее среднее значение, V/V_{cp} , по оси абсцисс – текущее время. Ветер порывистый, радиальная составляющая средней скорости – 5 м/с, порывы – до 15 ÷ 20 м/с. Полоса частот спектра флуктуаций скорости ветра по уровню –3 дБ равна 2 Гц, а по уровню –10 дБ она равна 8 Гц.

Из сравнения зависимостей, приведенных на рис. 3 и рис. 4, видно, что существенные расширения доплеровских спектров наблюдаются, как правило, при всплесках скорости ветра, превышающих среднее значение в 1.5 и более раз. Расширения спектров обусловлены колебаниями

отражателей под действием ветра с достаточно большой амплитудой, которую можно оценить, используя соотношения из теории фазовой модуляции [8]. При таком виде модуляции ее индекс определяется амплитудой колебаний элементарного рассеивателя и не зависит от частоты его колебаний, а ширина спектра этих колебаний определяется произведением индекса модуляции на максимальную частоту модуляции. Если в рассматриваемом эксперименте предположить, что для спектра шириной 200 Гц максимальная модулирующая частота равна 2 Гц, то в этом случае индекс фазовой модуляции в восьмимиллиметровом диапазоне достигает значения 100 рад, что соответствует значениям максимальной амплитуды хаотических колебаний элементарных рассеивателей, равным примерно 150 мм.

3. Модельные представления. Алгоритм моделирования нестационарного доплеровского сигнала

Полученные экспериментальные результаты и проведенный анализ позволяют представить процесс формирования доплеровского сигнала, отраженного небольшим участком поверхности с однородной растительностью, в следующем виде. Этот сигнал получается суммированием сигналов от блестящих точек, случайным образом модулированных по фазе. Сигнал, отраженный i -й блестящей точкой, может быть представлен в виде:

$$u_i = U_{0i} \cos(2\pi f_0 t + \varphi_{0i}).$$

Амплитуды элементарных сигналов U_{0i} , отраженных блестящими точками, примерно равны

и могут быть случайными величинами со своими законами распределения. Местоположение блестящих точек на отражающем элементе поверхности случайно, поэтому сигналы, отраженные от них, имеют каждый свою случайную начальную фазу φ_{0i} . Под воздействием ветра местоположение блестящих точек периодически меняется относительно первоначального положения под действием флуктуаций скорости ветра. Вследствие чего сигнал, отраженный блестящими точками, приобретает модуляцию по фазе, вызванную флуктуациями скорости ветра. Отсюда следует, что для формирования доплеровского сигнала необходимо иметь модулирующий сигнал, пропорциональный скорости ветра. Этот случайный сигнал, нужной длительности, со своей спектральной плотностью мощности флуктуаций, со средним значением, соответствующим заданной скорости ветра, генерируется и запоминается на заданное время синтеза всей реализации доплеровского сигнала. Каждый сигнал от блестящей точки, имеющий некоторую несущую частоту f_0 , модулируется по фазе случайным модулирующим сигналом с амплитудой, которая обеспечивает необходимый индекс фазовой модуляции элементарного сигнала. Этот сигнал может быть представлен в виде:

$$u_i = U_{0i} \cos[2\pi f_0 t + \varphi_{0i} + v(t - t_{0i}) 2\pi m V_0 / \lambda],$$

где $2\pi m V_0 / \lambda$ – индекс фазовой модуляции моделируемого сигнала; $m V_0$ – максимальное значение отклонения местоположения блестящей точки вдоль направления зондирования, V_0 – средняя скорость ветра, m – коэффициент пропорциональности; λ – рабочая длина волны РЛС; $v(t) = (V_t - V_0) / V_0$ – нормированные значения флуктуаций скорости ветра в зависимости от времени, V_t – скорость ветра в зависимости от времени; $t_{0i} = (R_i - R_0) / V_0$ – временная задержка флуктуаций скорости ветра, обусловленная разными расстояниями блестящих точек от РЛС – R_i , R_0 – расстояние от РЛС до центра отражающего участка поверхности. Параметр t_{0i} позволяет учитывать пространственную структуру флуктуаций скорости ветра.

Сигналы со случайными начальными фазами, отраженные от блестящих точек, модулированные по фазе флуктуациями скорости ветра с индексом модуляции, пропорциональным отклонению блестящей точки от первоначального поло-

жения под действием ветра, суммируются. Суммарный сигнал может быть представлен в виде:

$$u = \sum_{i=1}^n u_i,$$

где n – количество блестящих точек, изменяющееся в процессе моделирования реализации доплеровского сигнала случайным образом в диапазоне от минимального n_{\min} до максимального n_{\max} значений. Число этих точек должно быть конечным, сравнительно небольшим и случайным образом меняться во времени. Выбор количества блестящих точек при моделировании, с одной стороны, должен обеспечить нормальный закон распределения суммарного сигнала, для этого их должно быть как можно больше. С другой стороны, небольшое количество блестящих точек способствует образованию ощутимых интерференционных минимумов и максимумов, кроме того, повышается вклад каждой блестящей точки в суммарный сигнал.

Для получения доплеровского сигнала суммарный сигнал подвергается фазовому детектированию. В качестве опорного, используется сигнал гетеродина с частотой f_0 . Результатом фазового детектирования является доплеровский сигнал, имеющий спектральные составляющие, амплитуды которых пропорциональны ЭПР блестящих точек, а частоты пропорциональны скоростям их радиальных перемещений. Затем определяется среднее квадратическое значение этого сигнала для всей длины синтезированной реализации и на него нормируются все значения доплеровского сигнала. После этого все значения нормированного сигнала умножаются на величину, равную корню квадратному из ЭПР, которая берется из экспериментальных данных для заданной небольшой площади ($1 \div 2 \text{ м}^2$) растительности типа ячменя.

Алгоритм формирования нестационарного доплеровского сигнала можно реализовать многими способами. На основе предложенного алгоритма созданы программы, позволяющие формировать нестационарный доплеровский сигнал, который соответствует сигналу, отраженному от небольшого участка растительности. Для получения модельного доплеровского сигнала необходимо задать следующие основные параметры: размеры участка поверхности, длину волны РЛС, длину реализации моделируемого сигнала, среднюю

скорость ветра, закон распределения и спектральную плотность флуктуаций скорости ветра, закон распределения местоположения блестящих точек, минимальное и максимальное их количество, закон распределения амплитуд сигналов, отраженных блестящими точками.

Смоделированные для конкретных условий отражения сигналы имеют примерно такие же характеристики, как и экспериментальные сигналы, полученные при тех же условиях, в частности, они имеют такую же ширину доплеровского спектра. Мгновенные значения модельных сигналов имеют закон распределения, близкий к нормальному. Для них наблюдаются характерные изменения дисперсии (мощности) и ширины спектра во времени. На рис. 5 приведены некоторые характеристики доплеровского сигнала, сформированного на основе приведенных модельных представлений и разработанного программного обеспечения. На рис. 5, а приведена гистограмма распределения мгновенных значений нормированного модельного доплеровского сигнала восьмимиллиметрового диапазона длительностью 10 с при радиальной составляющей скорости ветра 5 м/с. Сплошной линией на рисунке нанесен нормальный закон распределения. Сравнение зависимостей, приведенных на рис. 5, а и рис. 1, свидетельствует о совпадении законов распределения мгновенных значений экспериментальных и модельных сигналов, а также о том, что эти законы близки к нормальному закону.

На рис. 5, б приведены усредненные за время 100 с спектральные плотности мощности сигналов как экспериментальных, так и сформированных на основе модельных представлений в зависимости от доплеровской частоты. Из рисунка видно, что спектральные плотности мощности экспериментальных сигналов практически не отличаются от спектров доплеровских сигналов, сформированных на основе модельных представлений. Единственное отличие – это наличие фоновых составляющих с частотами 50, 60, 100, 150 Гц в экспериментальных спектрах и в области доплеровских частот от 140 до 200 Гц. Это частоты питающих напряжений и их гармоники, что является недостатком используемой аппаратуры.

Учитывая изменчивость ширины мгновенных доплеровских спектров и совпадение усредненных спектров, а также наличие флуктуаций мощности доплеровского сигнала и удовлетворительное совпадение законов распределения мгновен-

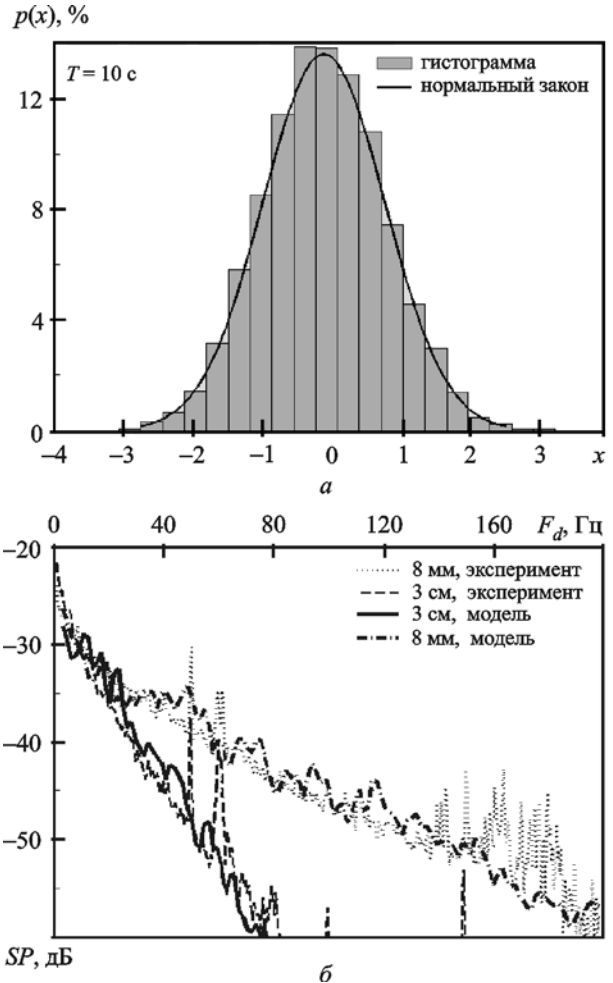


Рис. 5. Характеристики сформированного сигнала: а – гистограмма распределения мгновенных значений нормированного модельного доплеровского сигнала восьмимиллиметрового диапазона; б – спектральные плотности мощности экспериментальных и сформированных сигналов

ных значений для сформированных и экспериментальных сигналов, можно сделать вывод, что модель формирования доплеровского сигнала и алгоритм ее реализации позволяют получать доплеровские сигналы для заданных условий с характеристиками, достаточно близкими к характеристикам экспериментального сигнала, полученного при тех же условиях.

4. Результаты работы

1. Получены и проанализированы статистические характеристики доплеровских сигналов трехсантиметрового и восьмимиллиметрового диапазонов, рассеянных небольшим участком однородной растительности.

2. Показано, что мгновенные значения этих сигналов имеют законы распределения, близкие к нормальному закону.

3. Показано, что мгновенная мощность этих сигналов изменяется во времени, причем диапазон ее флуктуаций уменьшается по мере увеличения времени анализа.

4. Показано, что доплеровские сигналы имеют изменяющуюся во времени ширину спектральной плотности мощности.

5. На основе анализа экспериментально полученных статистических характеристик предложены модельные представления формирования доплеровского сигнала небольшим участком растительности, объясняющие особенности экспериментальных доплеровских сигналов.

6. Разработаны и реализованы алгоритм и программное обеспечение, позволяющие осуществлять формирование нестационарного доплеровского сигнала для конкретных условий – заданных длины волны зондирующего сигнала, размеров отражающего участка, удельной ЭПР растительности, средней скорости ветра, длины реализации формируемого доплеровского сигнала.

7. Характеристики сигнала, сформированного для определенных условий, удовлетворительно совпадают с характеристиками экспериментального сигнала, полученного при тех же условиях.

5. Выводы

В работе показано, что предложенная на основе экспериментальных данных модель позволяет формировать нестационарный доплеровский сигнал с характеристиками, совпадающими с экспериментальными. Этот сигнал может быть использован при разработке различных радиотехнических систем для оценки их эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. – Киев: Наук. думка, 1987. – 232 с.
2. Быстров Р. П., Потапов А. А., Соколов А. В. Миллиметровая радиолокация с фрактальной обработкой / Под ред Р. П. Быстрова и А. В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
3. Гутник В. Г., Шарпов Л. И., Горобец В. Н., Гончаренко Ю. В. Об эффективности доплеровской селекции в коротковолновой части миллиметрового диапазона радиоволн // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 66–76.

4. Распространение ультракоротких радиоволн / Пер. с англ. под ред. Шиллерова. – М.: Сов радио, 1957. – 710 с.
5. Андрианов В. А., Арманд Н. А., Кибардина И. Н. Рассеяние радиоволн подстилающей поверхностью с растительным покровом // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 21, № 9. – С. 1816–1821.
6. Кулемин Г. П., Тарнавский Е. В., Горошко Е. А. Помехи работе РЛС миллиметрового диапазона, создаваемые отражениями от земной поверхности // Прикладная электроника. – 2002. – Т. 1, № 1. – С. 15–24.
7. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.
8. Харкевич А. А. Спектры и анализ. – М.: Гос. изд. физмат лит., 1962. – 236 с.

В. Г. Гутник¹, В. М. Горобец², Ю. В. Гончаренко²

¹ Радіоастрономічний інститут НАН України, вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

² Інститут радіофізики та електроніки ім. А. Я. Усикова НАН України, вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

РАДІОЛОКАЦІЙНІ ВІДБИТТЯ ВІД РОСЛИННОСТІ У НВЧ ДІАПАЗОНІ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА МОДЕЛЬНІ УЯВЛЕННЯ

Проаналізовано характеристики зворотного розсіяння сигналів НВЧ діапазону рослинністю. Показано, що при поривчастому вітрі радіолокаційні сигнали, відбиті від невеликих ділянок рослинності є нестационарними – потужність відбитого сигналу і його миттєві спектри залежать від часу. Запропоновано і реалізовано алгоритм формування нестационарних доплерівських сигналів у НВЧ діапазоні. Показано, що характеристики сигналу, сформованого для конкретних умов, задовільно співпадають з характеристиками експериментального сигналу, одержаного за тих самих умов.

V. G. Gutnik¹, V. M. Gorobets², Y. V. Goncharenko²

¹ Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

² A. Usikov Institute of Radio Physics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Akad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

MICROWAVE RADAR SIGNAL REFLECTION FROM VEGETATION. EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS AND MODELS

The characteristics of microwave backscattering from vegetation are analyzed. It is shown that under fitful wind conditions the microwave signals scattered from small patches of vegetation are unsteady. The total power of scattered signal and its instantaneous spectrum strictly depends on time. The algorithm for unsteady radar microwave signal creation is proposed and actualized. It is shown that characteristics of signal, generated for particular conditions fairly agree with experimental signal characteristics obtained at the same conditions.

Статья поступила в редакцию 11.07.2012