

УДК 621.371.3.029.65

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В. С. Коростелев, Г. И. Хлопов, В. П. Шестопалов

Приведены результаты экспериментального исследования доплеровских спектров сигналов двухмиллиметрового диапазона, отраженных от травяного покрова, кустарника, одиночного дерева и опушки леса на приземных трассах. Для измерений использована когерентная измерительная РЛС на основе генератора дифракционного излучения, параметры которого обеспечивают значительное снижение шум-фактора приемного устройства локатора в диапазоне доплеровских частот по сравнению с генераторами других типов. Показано, что основная энергия отраженных сигналов сосредоточена в области частот меньше 100 Гц.

В связи с освоением миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов радиоволн значительный интерес представляет исследование спектральных характеристик сигналов, отраженных от растительности. К настоящему времени накоплен большой опыт при проведении подобных исследований, основные результаты которых обобщены в монографии [1], однако в коротковолновой части миллиметрового диапазона (КВЧ ММД) данные весьма малочисленны [2-4], а в части спектральных характеристик когерентных сигналов практически отсутствуют.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию доплеровских спектров сигналов двухмиллиметрового диапазона, отраженных от травяного покрова, кустарника, одиночного дерева и опушки леса на приземных трассах.

Так как значительная часть мощности отраженных сигналов сосредоточена в области весьма низких частот ≤ 100 Гц, то измерительная РЛС должна обеспечить достаточно низкий уровень собственных частотных шумов в указанном диапазоне. Как показано в работе [5], этому в немалой степени способствует применение генератора дифракционного излучения (ГДИ), параметры колебания которого обеспечивают значительное снижение шум-фактора приемного устройства РЛС (более 25 дБ) в диапазоне доплеровских частот по сравнению с генераторами других типов, в частности ЛОВ. Поэтому для измерений нами использована когерентная РЛС на основе ГДИ [6], сигналы с выхода которой записываются на магнитографе НО-67 и вводятся в ЭВМ типа БЭСМ-6 с помощью комплекса разработанной цифровой аппаратуры [7]. Динамический диапазон регистрируемых сигналов составляет не менее 40 дБ, а полоса анализируемых частот равна $0,8 \div 3000$ Гц.

Результаты многочисленных исследований, выполненных в сантиметровом и длинноволновой части миллиметрового диапазона, показывают, что спектральные характеристики сигналов, отраженных от растительности, хорошо описываются моделью [1,2,7], согласно которой форма спектра до уровня $-(10 \div 15)$ дБ аппроксимируется гауссовой кривой

$$S(f) = S_0 \exp\{-0,69(f/\Delta f)^2\}, \quad (1)$$

а на крыльях спектра — степенной зависимостью:

$$S(f) = S_0 [1 + (f/\Delta f)^n]^{-1}, \quad (2)$$

где Δf — ширина спектра по уровню 0,5. Чтобы оценить возможности использования в КВЧ ММД разработанной модели спектральных характеристик в виде (1), (2), полученные экспериментальные данные обрабатывались с целью измерения параметров n , Δf , S_0 , а также их зависимости от средней скорости ветра \bar{V} и его направления (параллельно \bar{V}_{\parallel} и перпендикулярно \bar{V}_{\perp} трассе). Характеристики ветра контролировались с помощью анеморумбометра типа М-63М-1, а результаты измерений спектральных параметров группировались для весенне-летнего и осенне-зимнего периодов, что позволяет оценить вклад лиственного покрова в формировании отраженного сигнала.

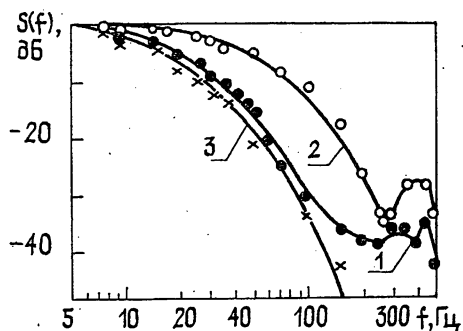


Рис. 1.

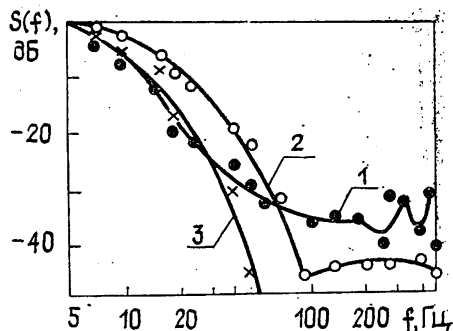


Рис. 2.

На рис. 1—4 приведены примеры спектров доплеровских сигналов, отраженных, соответственно, от высокой травы ($h=0,3\div 0,5$ м) при скользких углах $\gamma \approx 1^\circ$, кустарника, одиночного дерева (береза) и опушки лиственного леса, которые получены в результате усреднения 128 реализаций записанного сигнала. При этом кривые 1 и 2 получены в летне-весенний период для средней скорости ветра 1—2 и 4—5 м/с соответственно, а кривые 3 в осенне-зимний при скорости ветра 3 м/с.

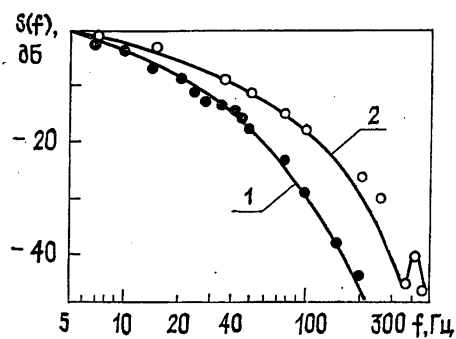


Рис. 3.

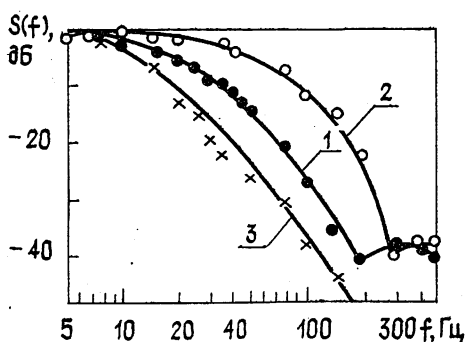


Рис. 4.

Анализ формы исследованных спектров показывает, что в отличие от более длинноволновых диапазонов последние практически не содержат гауссовой компоненты (1) и, начиная с самых малых частот, описываются степенной зависимостью (2). При этом можно условно выделить энергонесущую часть спектра (до уровня -10 дБ) и крылья (ниже уровня -20 дБ), которые характеризуются своими значениями по-

казателя степени n_{10} и n_{20} . Обработка результатов измерений в диапазоне изменения средней скорости ветра 1—7 м/с позволяет рекомендовать эмпирическую зависимость в виде

$$n = n(0) + \alpha \bar{V}, \quad (3)$$

значения параметров которой приведены в табл. 1.

Как видно, особенность спектров сигналов, отраженных от растительности в КВЧ ММД, состоит в том, что увеличение скорости ветра приводит к возрастанию прямогоугольности формы спектра: скорость убывания для энергонесущей части спектра уменьшается, а на крыльях увеличивается. Кроме того, сравнение полученных данных с рекомендованной в [1] зависимостью $n = 2(\bar{V} + 2)(\bar{V} + 1)^{-1}$ показывает, что скорости убывания спектральной плотности в своей энергонесущей части практически не отличаются ($n = 2 \div 3$) для умеренной скорости ветра

$\bar{V} = 1 \div 4$ м/с. Однако при более сильном ветре и на крыльях спектра его убывание происходит заметно быстрее, причем чем подвижнее отражатели, тем выше скорость убывания.

Рассмотренные особенности спектров характерны для ЧМ сигналов с большим индексом модуляции, что также подтверждается результатами работы [8], где увеличение показателя степени n связывается с уменьшением вклада амплитудных флуктуаций за счет случайных поворотов и взаимных затенений отражателей. Поэтому приведенные данные позволяют сделать вывод о превалирующей роли доплеровского смещения частоты при формировании сигналов, отраженных от растительности в КВЧ ММД, как было отмечено в [2]. Кроме того, при большом удалении от несущей частоты и сильном ветре в спектрах появляется осциллирующая и слабо убывающая компонента, которая нарушает ход степенной зависимости (2) на крыльях спектра и является, по-видимому, особенностью, присущей КВЧ ММД, так как для более длинноволновых диапазонов подобная форма спектра ранее не отмечалась [1,2,8,9]. В настоящее время пока не представляется возможным дать исчерпывающее объяснение отмеченной особенности, однако проведенные наблюдения показывают, что последняя обусловлена наличием лиственной кроны, так как указанные изменения в спектрах сигналов имеют место только для весенне-летнего периода (кривые 1, 2), в то время как для осенне-зимнего периода (кривые 3) форма спектра описывается степенной зависимостью вплоть до уровня —45 дБ. При этом уровень осциллирующей компоненты для кустарника и деревьев (рис. 2—4) выше на 5—10 дБ, чем для травяного покрова (рис. 1).

Указанные обстоятельства безусловно сказываются и на ширине спектра Δf , для которой различными авторами [1,2,8,9] рекомендуется зависимость от средней скорости ветра в виде

$$\Delta f (\text{Гц}) = \beta \lambda^{-1} \bar{V}^\gamma, \quad (4)$$

где показатель степени $\gamma = 1 \div 1,3$; λ (м); \bar{V} (м/с). Полученные в настоящей работе данные, к сожалению, не позволяют достоверно уточнить величину γ , в связи с чем нами в дальнейшем было принято $\gamma = 1$, что, тем не менее, дает возможность удовлетворительно аппроксимировать

экспериментальные данные в диапазоне скоростей ветра $\bar{V} = 1 \div 7$ м/с.

В табл. 2 приведены значения параметра β для параллельного (β_{\parallel} — графа 1) и перпендикулярного (β_{\perp} — графа 2) направления ветра, полученные в результате обработки экспериментальных данных. Как видно, ширина спектра в осенне-зимний период (зима) в два—пять раз меньше, чем в весенне-летний (лето), что просто объясняется [1] отсутствием лиственного покрова, играющего важную роль в формировании спектра флуктуаций отраженного сигнала и обеспечивающего повышенное ветровое сопротивление растительности.

Таблица 1

Параметр	Трава	Кустарник	Одинокое дерево	Олушка леса
α_{10}	— 0,3	— 0,2	— 0,34	— 0,32
$n_{10}(0)$	2,85	3,7	3,6	4,3
α_{20}	0,064	0,15	0,72	1,0
$n_{20}(0)$	5,1	4,3	2,8	4,3

Таблица 3

Параметр	Трава	Кустарник	Дерево	Олушка
$S_0(0), \frac{\text{дБ}}{\text{Гц}}$	— 36,7	— 23,6	— 4,0	— 5,8
$\epsilon, \frac{\text{дБ} \cdot \text{с}}{\text{м} \cdot \text{Гц}}$	— 2,4	— 4,0	— 8,6	— 4,8

Таблица 2

Параметр	Трава		Кустарник		Дерево		Олушка	
	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима
$\beta_{\parallel} \cdot 10^2$	1,0	0,57	2,9	0,57	3,3	0,64	1,6	1,0
$\beta_{\perp} \cdot 10^2$	0,74	0,4	2,7	0,4	0,74	0,44	0,8	0,8
$\beta_{\parallel}^{\text{эфф}} \cdot 10^2$	3,4	1,4	7,8	1,4	11,8	2,3	4,0	1,9
$\beta_{\perp}^{\text{эфф}} \cdot 10^2$	1,9	1,3	6,5	1,3	5,4	2,2	1,9	1,7
$\beta_{\text{эфф}} \cdot 10^2$	2,2*				25,4**		39,5***	
$\beta_{\text{эфф}} \cdot 10^2$					21,0****			

Примечание. Данные взяты из работ: [1] ($\lambda = 2,2$)*; [2] ($\lambda = 2,2$)**; [3] ($\lambda = 3,16$)***; [2] ($\lambda = 3,16$)****.

Кроме того, ширина спектра зависит от направления скорости ветра и достигает максимума, когда последняя параллельна трассе (неважно, на РЛС или от РЛС). В отдельных случаях разница достигает 100%, что также указывает на возрастание вклада фазовых флуктуаций в КВЧ ММД, так как проекция амплитуды перемещений отражателей на направление трассы для параллельного направления ветра максимальна (в среднестатистическом смысле).

В графах 3 и 4 (табл. 2) приведены значения параметра $\beta^{\text{эфф}}$, полученные в результате численного интегрирования экспериментально измеренных спектров для вычисления их эффективной ширины

$$\Delta f_{\text{эфф}} = \frac{2}{S(0)} \int_0^{\infty} df S(f), \quad (5)$$

позволяющей просто оценить время декорреляции отраженного сигнала $\tau_k = \Delta f_{\text{эфф}}^{-1}$. При этом сравнение с расчетной зависимостью [1] в виде

$$\Delta f_{\text{эфф}} = 3,2 \cdot 10^{-2} \lambda^{-1} \bar{V}^{1,3}$$

хорошо описывает ширину спектра в диапазоне скоростей ветра $\bar{V} = 1 \div 8$ м/с для травяного покрова и опушки леса, в то время как для кустарника и одиночного дерева расчетное выражение дает заметно заниженную оценку. По-видимому, это объясняется существенно более глубокой хаотической модуляцией скорости колебаний отдельных отражателей для одиночно стоящих объектов растительности (в рассматриваемом случае — кустарник и дерево), чем это предусмотрено в разработанной модели [1], использующей данные о пограничном слое тропосферы с учетом затененности ветрового поля, характерного для поверхности, покрытой более или менее однородной растительностью.

Сравнивая приведенные данные со значениями параметра $\beta^{\text{эфф}}$ в графе 5 (табл. 2), которые соответствуют результатам немногочисленных опубликованных экспериментальных работ в КВЧ ММД [2-4] при некогерентной обработке сигналов в РЛС, можно отметить заметное превышение ранее опубликованных значений в случае одиночного дерева и особенно опушки леса, в то время как для травяного покрова наблюдается хорошее соответствие результатов. Указанное отличие вполне может быть объяснено различными условиями проведения эксперимента, а также невысокой точностью измерения параметра σ^2 ветрового потока. Тем не менее, расчетная модель [2] в виде $\Delta f_{\text{эфф}} = 2\sqrt{2} \lambda^{-1} m_V \bar{V}$ ($m_V = 0,05 \div 0,1$ — глубина хаотической модуляции скорости колебаний отдельных отражателей для растительности) хорошо аппроксимирует экспериментальные данные в [2,3] и также обеспечивает завышенные значения для приведенных в настоящей работе условий эксперимента.

Для измерения уровня спектральной плотности отраженного сигнала вблизи нулевых доплеровских частот S_0 необходимо осуществить абсолютную калибровку энергетического потенциала измерительной РЛС, которая в рассматриваемом случае проводилась с помощью доплеровского имитатора в виде вибрирующего уголкового отражателя (УО), установленного в раскрые диффузора электродинамического громкоговорителя. Как показано в работе [5], значение ЭПР отражателя на первой гармонике частоты вибраций при условии их гармонического закона записывается в виде

$$\sigma_1 = 4\sigma_0 J_1^2(2k\Delta R), \quad (6)$$

где σ_0 — ЭПР собственно УО, $J_1(x)$ — функция Бесселя 1-го рода, ΔR — амплитуда вибраций, $k = 2\pi/\lambda$. При этом значение σ_0 рассчитывается, как правило, с достаточной точностью [10], а условие применимости (6) состоит в отсутствии нелинейных искажений в колебаниях

подвески громкоговорителя, что нетрудно обеспечить при их малой амплитуде. В использованном макете имитатора ЭПР отражателя составила $\sigma_0 = 3,9 \text{ м}^2$, а вибрация осуществлялась с частотой 240 Гц, что обеспечивало значение $\sigma_1 = 0,35 \text{ м}^2$. Величина $S_0 = S(0)$, равная спектральной плотности удельной ЭПР растительности вблизи нулевых доплеровских частот, измерялась в децибелах относительно 1 м^2 в полосе 1 Гц и рассчитывалась в рамках приближений [1,11], традиционных для радиолокационных измерений,

$$S_0 = \eta \sigma_1 \left[R_{\text{им}}^4 \int_{S_{\text{ос}}} dS \frac{G\{\theta(S), \varphi(S)\}}{R^4(S)} \right]^{-1}, \quad (7)$$

где $\eta = P/P_\sigma$ — отношение спектральной плотности мощности исследуемого сигнала к мощности 1-й гармоники сигнала имитатора, $R_{\text{им}}$ — дальность до имитатора, R — дальность до элемента dS освещенной площадки $S_{\text{ос}}$, $G(S)$ — значение нормированной диаграммы направленности (ДН) антенны по мощности в направлении на элемент dS . Значение интеграла в (7) численно рассчитывалось для каждого исследованного объекта в отдельности с учетом измерений ДН антенны и геометрии конкретной трассы, а зависимость расстояния R и угловых координат θ и φ ДН антенны определялась выражениями, которые мы приведем, опуская громоздкие выкладки:

$$R = [x^2 + z^2 + R_0^2 + 2R_0z \cos \gamma]^{1/2}, \quad (8)$$

$$\theta = \arccos \frac{R_0 + z \cos \gamma}{R}, \quad \varphi = \arctg \left[\sin \gamma \frac{z}{x} \right],$$

где x, z — координаты в плоскости освещенной площадки (z лежит в плоскости ДН антенны при $\varphi = 0$), R_0 — расстояние до центра освещенной площадки по оси ДН, $\gamma \in [0, \pi/2]$ — угол скольжения (угол между осью ДН и осью z системы координат x, y, z освещенной площадки). При этом низшая частота измеряемого спектра определяется временем наблюдения и ограничивается стабильностью параметров аппаратуры, в результате чего величина S_0 измерялась на частоте 5 Гц, что, тем не менее, в некоторых случаях позволяет приближенно считать $S(5 \text{ Гц}) \simeq S(0)$ ввиду пологого характера изменения спектральной плотности при $f \rightarrow 0$ (рис. 1—4). Так как увеличение скорости ветра приводит к перераспределению энергии отраженного сигнала по спектру доплеровских частот, то значение S_0 убывает по закону, который можно приближенно аппроксимировать линейной зависимостью

$$S_0(\bar{V}) = (S_0(0) + \varepsilon \bar{V}), \text{ дБ/Гц}, \quad (9)$$

где значения параметров $S_0(0)$ и ε в диапазоне изменения средней скорости ветра 1—7 м/с соответствуют приведенным в табл. 3.

К сожалению, авторам неизвестны опубликованные данные о поведении спектральной плотности в области нулевых доплеровских частот. Тем не менее характер поведения параметра $S_0(0)$ согласуется с данными для удельной ЭПР растительности [1] (отражаемость деревьев существенно выше, чем для кустарника и особенно для травы), а скорость убывания ε (дБ·с/Гц·м) максимума спектра меняется синхронно с параметром β (см. табл. 2), определяющим степень расширения спектра с увеличением скорости ветра. Таким образом, полученные в двухмиллиметровом диапазоне результаты экспериментального исследования в целом согласуются с ранее развитыми представлениями о спектральных характеристиках когерентных сигналов, отраженных от растительности [1—4, 8, 9].

Тем не менее, следует отметить и ряд особенностей, в том числе:

по сравнению с более длинноволновыми диапазонами форма спектра характеризуется большей прямоугольностью (в энергонесущей части показатель степенной зависимости $S(f) \sim f^{-n}$ ближе к значению 2, а на крыльях спектра $n \geq 5 \div 6$);

при сильном порывистом ветре в спектре появляется пьедестал на уровне — (30÷40) дБ, обусловленный, по-видимому, амплитудной модуляцией отраженного сигнала движениями листового покрова;

ширина спектра существенно зависит от направления ветра относительно трассы (когда вектор скорости ветра параллелен трассе, ширина спектра всегда больше);

основной вклад в формирование спектров когерентных сигналов, отраженных от растительности в КВЧ ММД, вносят эффекты, связанные с доплеровской модуляцией частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами. — Киев: Наукова думка, 1987. — 232 с.
2. Андреев Г. А., Потапов А. А., Хохлов Г. И. // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27. № 10. С. 1863.
3. Trebits R. N., Heyes R. P., Vogtag L. C. // Microwave J. 1978. V. 21. № 8. P. 49.
4. Андреев Г. А., Потапов А. А. // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 11. С. 28.
5. Коростелев В. С., Хлопов Г. И., Шестопалов В. П. // В сб.: Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн. Научное приборостроение. — Киев: Наукова думка. 1988. С. 120.
6. Дзюбан В. Г., Коростелев В. С., Хлопов Г. И. и др. // В сб.: II Все-союзная школа-симпозиум по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере. — Фрунзе: Илим. 1986. С. 250.
7. Дзюбан В. Г., Коростелев В. С., Хлопов Г. И., Шестопалов В. П. // В сб.: Труды Всесоюзной конференции по статистическим методам обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды. — Рига, 1986. С. 92.
8. Арманд Н. А., Дякин В. А., Кибордина И. Н. и др. // Радиотехника и электроника. 1975. Вып. 7. Т. 20. С. 1337.
9. Капитонов В. А., Мельничук Ю. В., Черников А. А. // Радиотехника и электроника. 1973. Т. 18. № 9. С. 1816.
10. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. — М.: Сов. радио. 1975.—248 с.
11. Сколник М. Справочник по радиолокации: Перевод с англ. / Под ред. К. Н. Трофимова. — М.: Сов. радио, 1976. Т. 1. — 454 с.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
25 апреля 1989 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF COHERENT SIGNALS REFLECTED FROM VEGETATION IN THE SHORTWAVE MILLIMETER RANGE

V. S. Korostelev, G. I. Khlopov, V. P. Shestopalov

The paper deals with the results of experimental investigation of 2 mm range Doppler spectra signals reflected from grass, bushes, a single tree and forest at earth paths. For measurement a coherent radar is used on a diffraction radiation generator which provides a considerable lowering of the noise-factor of the locator's receiver in the range of Doppler frequencies as compared with generators of different types. It is shown that the main energy of the reflected signals is concentrated in the frequency range lower than 100 Hz.