

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ДИАПАЗОНЕ САНТИМЕТРОВЫХ И МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

© 2019 г. Д. А. Садов¹, А. В. Христенко¹, *, А. В. Новиков¹, М. Е. Ровкин¹

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Российская Федерация, 634050 Томск, просп. Ленина, 40

*E-mail: hristenko@main.tusur.ru

Поступила в редакцию 22.09.2017 г.

После доработки 04.06.2018 г.

Принята к публикации 08.10.2018 г.

Приведены результаты зондирования различных типов подстилающей поверхности в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн горизонтальной поляризации под малыми углами скольжения. Рассчитаны удельная эффективная площадь рассеяния и корреляционные характеристики отраженного сигнала по времени и дальности.

DOI: 10.1134/S0033849419040089

ВВЕДЕНИЕ

Перед современной радиолокацией стоит множество сложных задач, например, из-за лавинообразного роста географии применения [1] и численности используемых беспилотных летательных аппаратов становится актуальной задача по обнаружению подвижных (в частности, низколетящих) малоразмерных целей (с ЭПР около 0.01 м^2 [2, 3]) на фоне подстилающей поверхности [4–7]. Известно, что характеристики радиолокационного обнаружения движущихся объектов в реальных условиях зависят от типа подстилающей поверхности. Сигнал радиолокационного отклика формируется за счет обратного рассеяния не только от цели, но и от подстилающей поверхности, включающей элементы ландшафта, растительности и неподвижные антропогенные объекты. Растительность не является неподвижным объектом, так как часть составляющих ее элементов (стебли и колосья, ветви и листья) колеблется под воздействием ветра.

Поэтому для проектирования радиолокационных систем требуется знание не только среднего уровня отраженного от подстилающей поверхности сигнала, но и его корреляционных характеристик по времени и пространственным координатам. Только знание таких характеристик позволяет оптимальным образом выбирать параметры встроенной в РЛС системы подавления помех от подстилающей поверхности.

Обзор литературы показал, что исследованию эффективной площади рассеяния посвящено го-

раздо большее число работ, чем оценкам ее корреляционных и спектральных характеристик [8–16]. Знание этих характеристик позволяет создать более точные модели подстилающей поверхности и более обоснованно выбрать метод обнаружения движущихся (в частности, низколетящих) малоразмерных объектов.

Радиостатистические свойства земных покровов важны также в задачах радиолокационного дистанционного зондирования земли различными системами [17, 18], в том числе системами на основе антенн с синтезированной апертурой. А также численные параметры подстилающей поверхности используются в моделировании околоземных радиоканалов, например, как описано в [19].

Целью данной работы является получение численных характеристик рассеяния электромагнитных волн подстилающей поверхностью в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн. К таким характеристикам относятся удельная ЭПР и интервал корреляции.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования указанных статистических характеристик отраженного сигнала были проведены прямые экспериментальные измерения. Радиолокационные (РЛ) измерения выполнены по методу калибровки радиолокатора по эталонной цели [8, 16, 20, 21] с использованием радиолокационных станций (РЛС) сантиметрового (X) и миллиметрового (Ka) диапазонов (производство

Таблица 1. Подстилающие поверхности для РЛ-зондирования

Объект	Средняя дальность до объекта, м	Средний угол скольжения, град
Склон с деревьями	490	1.9
Речной лед	540	6.6
Береговая линия	950	3.4
Поле	1200	2.5
Лиственный лес	1730	1.7

АО “НПФ “Микран”) [22]. Обе РЛС формируют квазинепрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и работают на горизонтальной поляризации. В этих РЛС реализована гомодинальная [23, 24] обработка принимаемого сигнала с периодом зондирования $\tau_{и} = 3.5$ мс. Разрешающая способность обеих РЛС по дальности $\delta R = 1.5$ м (ширина полосы сигнала 200 МГц), по азимуту и углу места – 1 и 30 град соответственно, уровень боковых лепестков –20 дБ.

Методика проведения измерений заключалась в следующем: на первом этапе проводили калибровочный обмер эталонного трехгранного уголкового отражателя, ЭПР которого на частоте 9.4 ГГц составляет 250 м², а на частоте 35 ГГц – 3500 м². Для ослабления влияния переотражений от подстилающей поверхности “уголок” поднимали на 3 м над ней, при этом расстояние от РЛС до “уголка” составляло 1 км, а РЛС относительно условного горизонта была на 50 м выше “уголка”.

На втором этапе проводили РЛ-зондирование подстилающих поверхностей согласно табл. 1. Направление на каждый объект измерения устанавливали относительно “уголка” с помощью датчика углового положения радара. Длительность одного сеанса зондирования составляла 10 с, максимальная дальность 3 км. Из-за нехватки стабильности частоты опорного генератора, измеренный сигнал в каждом строке дальности делился на 10 частей по 1 с.

Измерения проводили в течение летнего и зимнего периодов. Величина отношения сигнал-шум не хуже 10 дБ, скорость ветра во время проведения измерений составляла 2...5 м/с, угол облучения во всех измерениях был близок к 90 град. В качестве объектов исследования были выбраны следующие виды подстилающей поверхности: склон с деревьями, речной лед, береговая линия, поле, лиственный лес (см. табл. 1).

2. ПЕРВИЧНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Результатом экспериментальных измерений являются двумерные массивы комплексных амплитуд (пачка РЛ-откликов, полученных в следующих друг за другом периодах излучения-приема

сигнала), при этом размерность массивов соответствует пространственной R (строки) и временной t (столбцы) координатам, кратным разрешению по дальности и периоду зондирования РЛС, соответственно. На рис. 1 представлен один из результатов измерений – временная реализация относительной амплитуды флуктуирующего принимаемого сигнала в отдельном строке дальности (столбце двумерного массива), отраженного склоном с деревьями.

По результатам измерений был рассчитан массив удельных ЭПР σ_0 согласно известному соотношению [8, 20]:

$$\sigma_0 = \frac{PR^3 \sigma_y \sin \beta}{\delta R P_y R_y^4 \theta}, \tag{1}$$

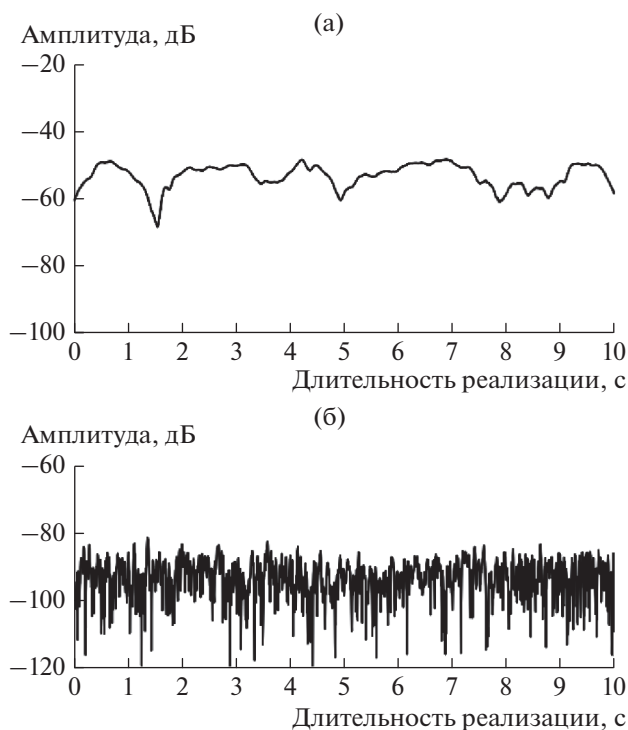


Рис. 1. Относительная амплитуда принимаемого сигнала, флуктуирующая на фоне склона с деревьями для одного сеанса зондирования, для X-диапазона (а) и Ka-диапазона (б).

Таблица 2. Полученные параметры подстилающей поверхности

Объект	Диапазон	Время года	$M[\sigma_0]$, дБ	$D[\sigma_0]$, дБ	$r_{\text{ц}}(0.5)$, мс	S , дБ
Склон с деревьями	X	Лето	-25	-49	63	1
		Зима	-14	-28	101.5	3
	Ka	Лето	-3	-5	14	0.8
		Зима	-7	-16	42	2.4
Речной лед	X	Зима	-19	-35	<3.5	5
	Ka		-12	-24	56	5.6
Береговая линия	X	Лето	-22	-45	21	4.1
		Зима	-20	-34	45.5	1.5
	Ka	Лето	-6	-12	10.5	3.2
		Зима	-14	-28	21	4.5
Поле	X	Лето	-35	-73	42	4.8
		Зима	-40	-85	<3.5	5.3
	Ka	Лето	-14	-41	<3.5	5.3
		Зима	-17	-48	<3.5	5.6
Лиственный лес	X	Лето	-24	-52	14	3.3
		Зима	-13	-31	101.5	4.2

Примечание: $M[\sigma_0]$ – средние значения удельной ЭПР подстилающей поверхности, $D[\sigma_0]$ – дисперсия удельной ЭПР подстилающей поверхности, $r_{\text{ц}}(0.5)$ – средние значения интервала корреляции по уровню 0.5 для “центрированной” АКФ, S – отношение регулярной составляющей к флуктуационной.

где R – дальность до точки зондирования на подстилающей поверхности, м; δR – разрешающая способность по дальности, м; θ – разрешающая способность по азимуту, градусы; β – угол облучения, градусы; R_y – дальность до “уголка”, м; σ_y – ЭПР “уголка”, м², P – мощность сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, Вт; P_y – мощность сигнала, отраженного от “уголка”, Вт.

Также был вычислен набор нормированных автокорреляционных функций (АКФ) центрированного сигнала для оценки временного спектра флуктуаций отраженного подстилающей поверхностью сигнала. Вычисление проводилось известным методом с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) [25, 26] от взаимного спектра центрированных сигналов, спектры которых также были получены с использованием алгоритма БПФ:

$$C_t = \frac{1}{N} \text{iffi} [\text{fft} (A_t - \bar{A}) \text{fft} (A_t - \bar{A})^*], \quad (2)$$

$$C_{\text{н}} = C_t / C_0, \quad (3)$$

где fft и iffi – операции прямого и обратного быстрого преобразования Фурье соответственно; C_t – ненормированная АКФ; $C_{\text{н}}$ – нормированная АКФ; A_t – комплексная амплитуда частот биений; \bar{A} – среднее значение комплексной ампли-

туды частот биений; * – операция комплексного сопряжения.

Набор нормированных АКФ для каждого сеанса зондирования рассчитывали для протяженной в пространстве цели (около 100 м) и усредняли по дальности.

На основании перечисленного дополнительно были оценены:

- гистограммы удельной ЭПР;
- средние значения удельной ЭПР $M[\sigma_0]$ (табл. 2) для выбранных видов подстилающей поверхности (среднее значение пересчитывалось в децибелы как $10\lg(M[\sigma_0])$);
- дисперсия удельной ЭПР $D[\sigma_0]$ (табл. 2) для выбранных видов подстилающей поверхности (дисперсия пересчитывалась в децибелы как $10\lg(D[\sigma_0])$);
- средние, по дальности, значения временных центрированных интервалов корреляции $r_{\text{ц}}$ по уровню 0.5 нормированных АКФ (см. табл. 2);
- отношения S амплитуд регулярной составляющей сигнала к флуктуационной, усредненных по пространственной R и временной t координатам (см. табл. 2).

В данной статье приводятся “центрированные” интервалы корреляции (табл. 2), но поскольку для некоторых РЛ задач требуется знание

“нецентрированного” $r_{\text{нц}}$ интервала корреляции, то для его вычисления можно воспользоваться выражением, следующим из основ статистической радиотехники [15]:

$$r_{\text{нц}} = \frac{r_{\text{ц}} + S^2}{1 + S^2}. \quad (4)$$

В качестве примера на рис. 2а и 2б представлены гистограммы собственных шумов приемника, а также удельной ЭПР для склона с деревьями в летний и зимний периоды в X- и Ka-диапазонах соответственно.

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение результатов измерений в X-диапазоне для шероховатого льда, припорошенного снегом (табл. 2), с теоретической моделью [14] для углов облучения более 40 град показало, что в X-диапазоне значение удельной ЭПР на 7 дБ меньше, чем для модели, представленной в [14]. Сравнение результатов для Ka-диапазона (см. табл. 2) с результатами измерений пресноводного льда из работы [15] показало, что удельная ЭПР меньше на 30 дБ относительно данных табл. 2. Согласно [15] это объясняется тем, что пресноводный лед на озере гладкий в отличие от речного льда, поверхность которого имеет неровности. Также в [15] указано, что удельная ЭПР снега превышает ЭПР пресноводного льда, поэтому наличие снега на льду могло сказаться на том, что полученная в данной статье удельная ЭПР больше, чем ЭПР в [15].

Для объяснения выявленных статистических свойств сигнала (см. табл. 2), отраженного от деревьев, воспользуемся моделью из [10]. В соответствии с ней зона отражения от деревьев делится на три части: земля под деревьями, стволы деревьев и их кроны. Поэтому сигнал, отраженный от лиственного леса и склона с деревьями, предположительно является суммой трех сигналов, при этом большее влияние вносит отражение от стволов деревьев. Из табл. 2 видно, что удельная ЭПР лиственного леса в X-диапазоне ниже, чем в Ka-диапазоне. В зимний период удельная ЭПР в X-диапазоне возрастает, а в Ka-диапазоне уменьшается. Такое изменение удельной ЭПР свидетельствует о поглощении в листве электромагнитных волн X-диапазона. В свою очередь, в Ka-диапазоне сильнее проявляются отражающие свойства листвы. Это же справедливо и для береговой линии, на которой расположен кустарник.

Результаты измерений показали, что удельная ЭПР возрастала на 10...20 дБ при увеличении частоты в три раза для всех типов подстилающей поверхности, кроме тех, где есть деревья, что качественно согласуется с данными работ [8–16].

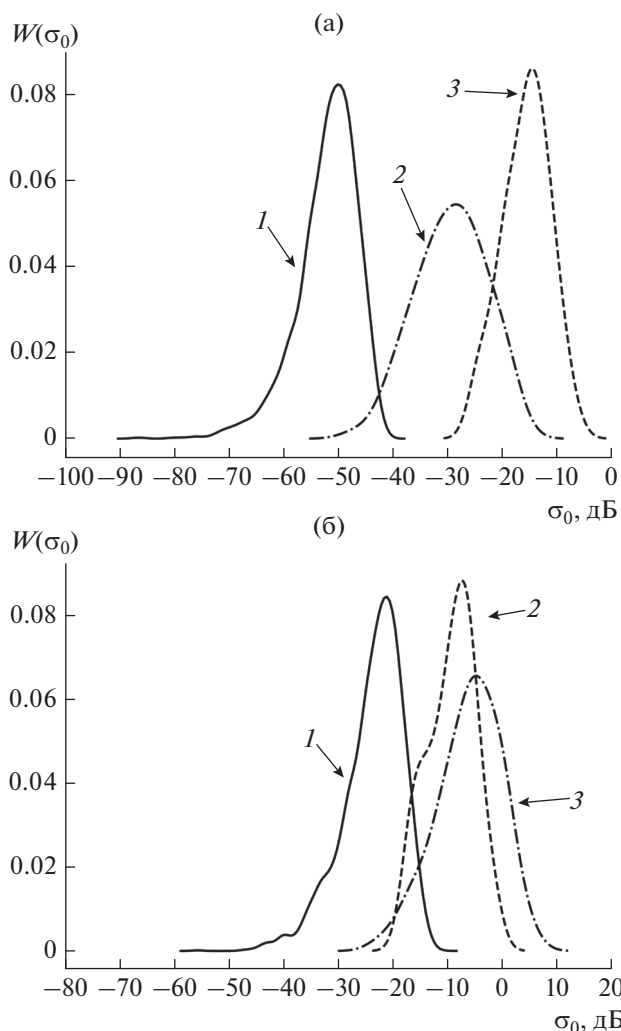


Рис. 2. Гистограмма удельной ЭПР в X-диапазоне (а) и Ka-диапазоне (б) для склона с деревьями: собственные шумы приемника (кривая 1), сигнал от склона с деревьями летом (кривая 2) и зимой (кривая 3).

Как и следовало ожидать, наибольшее отношение регулярной составляющей к флуктуационной (см. табл. 2) наблюдается у сигналов, отраженных от поля и льда, наименьшее же — для отраженных от склона с деревьями.

Интервал корреляции флуктуационной составляющей сигнала, отраженного от различных типов поверхности (табл. 2), в большинстве случаев не превышает 100 мс, а в некоторых случаях, таких как, например, поле, интервал корреляции меньше разрешающей способности оборудования. Из табл. 2 видно, что для склона с деревьями, береговой линии и лиственного леса в летний период, когда на деревьях и кустарниках большое количество листвы, интервал корреляции меньше, чем в зимний, когда листвы отсутствует.

Важным для практики фактом является относительно большой измеренный интервал корреляции.

ляции по времени (не менее 14 мс в X диапазоне) флуктуационной составляющей отражений от элементов растительности в сравнении с его часто приводимой в литературе оценкой 5 мс [28], которая является обратной величиной ширина спектра флуктуаций (200 Гц в X-диапазоне). Это объясняется тем, что максимально широкий спектр флуктуаций наблюдается при очень сильном ветре, что в климатических условиях проведения измерений (юг Западной Сибири) случается редко.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что измеренные характеристики качественно согласуются с другими экспериментальными и теоретическими моделями.

Результаты измерений (см. табл. 2) являются параметрами модели подстилающей поверхности, которую можно получить известными методами, описанными в [17, 18]. Ее можно применить для оценки эффективности методов радиолокационного обнаружения и селекции движущихся целей [29]. Также эти результаты измерений расширяют справочные данные и позволяют количественно оценить в реальных условиях значение удельной ЭПР и интервала корреляции подстилающей поверхности на частотах 9.4 и 35 ГГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.577.21.0279 от 26.09.2017, идентификатор RFMEFI57717X0279).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Asadi A., Andrews R., White J. et al.* // The Drones Book. 3rd ed. Bournemouth: Imagine Publ. Ltd., 2016. P. 164.
2. *Khristenko A.V., Konovalenko M.O., Rovkin M.E. et al.* // IEEE Trans. 2018. V. AP-66. № 4. P. 1977.
3. *Khristenko A.V., Konovalenko M.O., Rovkin M.E. et al.* // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). Astana, Kazakhstan. 2017. P. 1.
4. Вопросы перспективной радиолокации // Под ред. Соколова А.В. М.: Радиотехника, 2003.
5. *Янакова Е.С.* // Электронный журнал "Труды МАИ". 2013. № 65. С. 35.
6. *Ritchie M., Fioranelli F., Griffiths H., Torvik B.* // 2016 IEEE Radar Conf., Philadelphia. 2–6 May N.Y.: IEEE, 2016. P. 7485181.
7. *Еремин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И.* // Арсенал отечества. 2014. № 5. С. 14.
8. *Skolnik I.M.* // Radar Handbook. 3rd ed. N.-Y.: McGrawHill, 2008.
9. *Ulaby F.T., Stiles H.W., Abdelrazik M.* // IEEE Trans. 1984. V. GRSS-22. № 2. P. 126.
10. *Ulaby F.T., Sarabandi K., McDonald K. et al.* // Intern. J. Remote Sensing. 1990. V. 11. № 7. P. 1223.
11. *Кравченко В.Ф., Кривенко Е.В., Луценко В.И. и др.* // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4. № 4. С. 3.
12. *Pinel N., Bourlier C., Saillard J.* // Proc. 2nd Europ. Radar Conf. EURAD 2005. Paris. 3–7 Oct. N.Y.: IEEE, 2005. P. 37.
13. *Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T.* // IEEE Trans. 1992. V. GRSS-30. № 2. P. 370.
14. *Kim Y.S., Moore R.K., Onstott R.G., Gogineni S.* // J. Glaciology. 1985. V. 31. № 109. P. 214.
15. *Павельев В.А., Хаминов Д.В.* Рассеяние электромагнитных волн миллиметрового диапазона природными и антропогенными объектами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
16. *Кулемин Г.П., Разказовский В.Б.* Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. Киев: Наук. думка, 1987.
17. *Пригарин С.М.* Методы численного моделирования случайных процессов. Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ, 2005.
18. *Радиовидение.* Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учеб. пособие для вузов // Под ред. Кондратенкова Г.С. М.: Радиотехника, 2005. (Сер. Радиолокация).
19. *Anikin A. S., Vershinin A.S.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 803. № 1. P. 1.
20. *Бакулев П.А.* Радиолокационные системы. Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2004.
21. *Knott E.F* Radar Cross Section Measurements. N.Y.: Van Nostrand Reinhold, 1993.
22. <http://www.micran.ru/productions/radiolocation/mrs/>
23. *Rovkin M.E., Khlusov V.A., Hristenko A.V. et al.* // 2016 Dynamics of System, Mechanisms and Machines. Omsk, Russia, 15–17 November 2016. P. 191.
24. *Доценко В.В., Осупов М.В., Хлусов В.А.* // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2011. № 1. С. 29.
25. *Бендат Д., Пирсол А.* Применение корреляционного и спектрального анализа: Пер. с англ. М.: Мир, 1983.
26. *Айфичер Э., Джервис Б.* Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е изд. / Пер. с англ. М.: ИД "Вильямс", 2004.
27. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966.
28. Справочник по радиолокации. В 4-х тт. Т. 1. Основы радиолокации / Под ред. Ицхоки Я.С. М.: Сов. радио, 1976.
29. *Плескин В.Я.* Цифровые устройства селекции движущихся целей: Учеб. пособие. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2003.