

УДК 621.396.96

А.И. Омельченко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ВЕКТОРОВ РАССЕЙНИЯ ОБРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ ОТ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА РАДИОВОЛН

Представлен статистический способ моделирования выборок поляризационных векторов рассеяния подстилающих поверхностей различных типов в сантиметровом диапазоне волн. Результаты могут быть использованы для оценки эффективности алгоритмов обнаружения и распознавания целей на фоне подстилающей поверхности при помощи метода полного поляризационного зондирования пространства.

Ключевые слова: поляризационный вектор рассеяния, поляризационная матрица рассеяния, подстилающая поверхность.

Введение

Постановка проблемы. Существует большое количество математических моделей процесса отражения электромагнитных волн (ЭМВ) от поверхностей различных типов. Однако моделей, позволяющих получить выборочные значения поляризационных векторов рассеяния (ПВР) обратного отражения от подстилающей поверхности для сантиметрового диапазона волн нет. Исходя из того факта, что результаты моделирования необходимы в первую очередь для оценки статистических характеристик законов распределения ПВР, а также предварительной оценки эффективности алгоритмов обнаружения целей на фоне подстилающей поверхности при использовании метода полного поляризационного зондирования пространства (ППЗП), необходимо воспользоваться достаточно не сложным способом моделирования, который в наиболее полной мере позволит получить необходимый результат. В этой связи, модели, осуществляющие лишь расчет коэффициента отражения от подстилающей поверхности, не позволят получить в необходимой степени адекватный результат анализа статистических характеристик ПВР. Таким образом, наиболее подходящим путем решения задачи моделирования будет разработка статистической математической модели [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросу рассеяния волн на статистически неровной поверхности посвящена обширная литература, в которой отражается как физико-математическая сущность процессов рассеяния [2 – 4], так и результаты экспериментальных исследований [4 – 7]. Кроме того, разработан мощный математический аппарат моделирования отражений ЭМВ от различных объектов и поверхностей [3, 8, 9]. Каждый из указанных источников содержит обширную библиографию по рассматриваемому вопросу.

В общем случае, задача дифракции волн на произвольной поверхности, применительно к сантиметровому диапазону волн, в полном объеме не может быть

решена. В реальных условиях приходится иметь дело со значительным разнообразием типов рассеивателей на подстилающих поверхностях – от отдельных анизотропно проводящих пластин в растительном покрове до слоистой структуры с вкраплениями объемных неоднородностей диэлектрической проницаемости и статистически неровными границами, примером могут являться ледовые поверхности различного типа. С этой точки зрения можно сказать, что из-за разнообразия электрических характеристик исследуемых объектов создание общей модели вызывает очень большие трудности. Отсюда следует значительное разнообразие математических приемов, предлагаемых различными исследователями [3, 8, 9]. Между тем, в рассматриваемом случае, весьма важен вопрос о сопоставимости интенсивности поля рассеяния на различных подстилающих поверхностях в рамках единой модели рассеяния. Таким образом, выбор типа математической модели обуславливается тем, какие характеристики отраженного сигнала необходимо исследовать. В частности при использовании метода ППЗП исследуются статистические свойства ПВР объектов.

Таким образом, **целью статьи** является разработка статистической математической модели ПВР обратного отражения от подстилающей поверхности различных типов для сантиметрового диапазона радиоволн, которая позволит осуществлять предварительную оценку статистических характеристик ПВР подстилающей поверхности различных типов, а также использовать результаты моделирования при оценивании показателей качества обнаружения целей на фоне подстилающей поверхности.

Основной материал

В основу разрабатываемой статистической математической модели положены результаты экспериментальных исследований отражения от подстилающей поверхности [5 – 7].

В этой связи, логично использовать способ статистического моделирования, описанный в [1], который является достаточно простым. Адекватность мо-

дели основывается на том, что в качестве её основы взяты экспериментальные данные по изучению отражающих свойств подстилающей поверхности [5 – 7].

Суть модели заключается в следующем. Амплитуда принятого сигнала представляется в виде [6]:

$$\dot{S}_{kl}(t) = \sqrt{\sigma_{kl}} \cdot e^{j\varphi_{kl}(t)}, \quad (1)$$

где $\dot{S}_{kl}(t)$ $k, l = (\overline{1, 2})$ - комплексная амплитуда принятого сигнала от подстилающей поверхности при облучении на l -й ортогональной и приеме на k -й ортогональной поляризациях; σ_{kl} и φ_{kl} - эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) и фаза подстилающей поверхности при облучении на l -й ортогональной и приеме на k -й ортогональной поляризациях.

Такое представление справедливо для рассмотрения собственного поляризационного базиса подстилающей поверхности. Для получения ПВР подстилающей поверхности в поляризационном базисе антенны необходимо осуществить преобразование ПВР полученных в результате моделирования. Для этого можно воспользоваться способом, предложенным в [10]. Значение ПВР подстилающей поверхности $\dot{S}_{пп}^a$ получается путем преобразования вида [10]:

$$\dot{S}_{пп}^a = \dot{B}_{пп} \cdot \dot{S}_{пп}, \quad (2)$$

где $\dot{S}_{пп}$ - значение ПВР подстилающей поверхности в собственном поляризационном базисе; $\dot{B}_{пп}$ - матрица преобразования, составленная из собственных векторов поляризационно-ковариационной матрицы подстилающей поверхности. Дальнейшие расчеты производятся для случая, когда коэффициенты корреляции между согласованной кроссовой составляющими поляризации (элементами ПМП \dot{S}_{11} и \dot{S}_{21} , \dot{S}_{22} и \dot{S}_{12}) равны 0,75...0,85, а между сигналами на согласованных и кроссовых поляризациях (элементами ПМП \dot{S}_{11} и \dot{S}_{22} , \dot{S}_{21} и \dot{S}_{12}) равны 0,4...0,5.

Согласно известным данным экспериментальных исследований [4 – 6], мгновенные амплитуды, сигналов отраженных от подстилающей поверхности, распределены по закону Рэлея. В этой связи, моделирование мгновенных значений амплитуд необходимо осуществлять с помощью датчика случайных чисел, генерирующего случайную последовательность, имеющую распределение Рэлея. При этом в качестве дисперсии целесообразно выбрать ЭПР участка моделируемой поверхности, для соответствующей поляризации на прием и передачу. Значения этих ЭПР можно вычислить на основе экспериментальных данных. Результаты оценки удельной ЭПР подстилающих поверхностей для углов скольжения менее 1° приведены в табл. 1 [5, 6].

Учитывая характеристики РЛС, можно найти значение ЭПР $\sigma_{п}$ участков подстилающих поверхностей, входящих в разрешаемый объем локатора согласно формуле [11]:

Таблица 1
Результаты экспериментальной оценки удельной ЭПР подстилающей поверхности

Тип подстилающей поверхности	Удельная ЭПР
Травяное покрытие	-20...-25 дБ
Смешанный редкий лес	-20...-23 дБ
Густой лиственный лес	-12...-14 дБ

$$\sigma_{п} = \sigma_{уд} \cdot D \cdot \delta\beta \cdot \delta D \cdot \frac{1}{\cos \varepsilon}, \quad (3)$$

где $\delta\beta$ - ширина диаграммы направленности антенны в радианах; D - наклонная дальность до цели; δD - разрешающая способность РЛС по дальности; ε - угол облучения.

Приняв в рассмотрение, например, следующие характеристики РЛС - ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности $\delta\beta = 0,5^\circ$, разрешающая способность по дальности $\delta D = 100$ м, согласно (3) можно найти значение ЭПР участков поверхности различных типов, размер которых зависит от дальности D . Следовательно, величина ЭПР будет зависеть от размеров разрешаемой площади и, как следствие, от дальности D (3). Таким образом, в табл. 2 представлены результаты расчета величин ЭПР для разрешаемой площади подстилающей поверхности на дальностях D 10км и 20км для заданных параметров РЛС.

Таблица 2
Результаты расчета ЭПР подстилающей поверхности для заданных параметров РЛС

Тип подстилающей поверхности	ЭПР, м ²	
	D = 10 км	D = 20 км
Травяное покрытие	27...87	54...170
Смешанный редкий лес	43...87	86...170
Густой лиственный лес	346...500	600...1600

В табл. 2 приведен расчет для вертикальной поляризации на передачу и прием. Соответствующие величины для других поляризаций можно рассчитать, зная соотношения для уровня отражений на соответствующих поляризациях [5, 6]. Значение ЭПР на горизонтальной поляризации на передачу и прием на 5...10 дБ ниже, чем на вертикальной [5, 6], значение ЭПР на кроссовых поляризациях на 7...12 дБ ниже, чем на соответствующих согласованных [5, 6].

В указанном случае, может возникнуть вопрос о распределении выборки ПВР подстилающей поверхности. По результатам моделирования, модули элементов ПВР распределены по закону Рэлея, в этом случае можно сказать, что квадратурные составляющие распределены по нормальному закону. Известно [5, 6], что модули элементов ПВР аэродинамических объектов распределены по обобщенному закону Рэлея. По результатам оценки в случае измерения ПВР с абсолютными фазами, закон распределения выборки ПВР приближается к нормальному с вероятностью около 0,92.

Положим, что измерение ПВР производится с абсолютными фазами, при этом измерения полагаются такими, что фазовая структура ПВР не зависит от дальности до участка подстилающей поверхности.

Исследования отражений от подстилающей поверхности показывают, что принятый сигнал будет коррелированным во времени. Кроме распределения амплитуды сигнала рассеиваемого распределенной целью, вызывает интерес также спектральное распределение энергии этого сигнала, так как оно определяет способность радиолокационной станции с аппаратурой селекции движущихся целей ослаблять сигналы, отраженные от различных нежелательных распределенных целей. В [12] показано, что спектр сигналов, рассеиваемых распределенными целями почти всех типов, можно представить гауссовой кривой следующего вида:

$$W(f) = W_0 \exp(-a \cdot f^2 / f_t^2), \quad (4)$$

где W_0 – плотность мощности сигнала от распределенной цели на нулевой частоте флуктуаций; f – отклонение частоты флуктуаций от рабочей частоты РЛС; f_t – рабочая частота РЛС; a – безразмерный параметр, который характеризует относительную стабильность частоты сигнала, отраженного от распределенной цели. Значения параметра a изменяются согласно [12] от $3,9 \cdot 10^{19}$ для редкого леса в безветренный день и до $2,8 \cdot 10^{15}$ – для дождевых облаков. Из расчетов с учетом приведенных данных следует, что ширина спектра флуктуаций сигналов, рассеянных различными распределенными целями на рабочей частоте радиолокатора, например 9ГГц, может находиться в диапазоне от 1,2 до 140Гц. В случае отражений только от различных видов земной поверхности для возможного диапазона изменения ширины спектра флуктуаций сигналов на той же рабочей частоте получим: от 1,2Гц до 23Гц. Следовательно, время корреляции сигнала рассеянного земной поверхностью находится в пределах от 0,83 с до 0,04 с. При этом, возможности обнаружения целей на фоне подстилающей поверхности будут определяться возможностями обнаружения соответствующего коррелированного полезного сигнала на фоне коррелированной помехи. Таким образом, для разработки решающих правил и алгоритмов обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности необходимо разработать методику моделирования коррелированной выборки ПВР подстилающей поверхности.

Для моделирования коррелированной выборки ПВР рассмотрим, как это можно осуществить в одномерном случае, а затем обобщим его для многомерного сигнала. Положим, что имеется реализация белого шума. В этом случае, корреляционная функция этого процесса будет иметь вид δ -функции $R(\tau) = W_0 \delta(\tau)$ [13]. Спектральная плотность белого шума постоянна на всех частотах и равна $W(\omega) = W_0 = \text{const}$ [13]. Рассмотрим реализацию квазизелого (коррелированного) шума. Для этого

процесса спектральная плотность мощности равна:

$$W(\omega) = \begin{cases} W_0, & \text{при } |\omega| < \omega_0 \\ 0, & \text{при } |\omega| > \omega_0 \end{cases}, \text{ корреляционная функция } R(\tau) = 2W_0 \cdot \frac{\sin(\omega_0 \tau)}{\tau},$$

таким образом, данный случайный процесс является коррелированным с временем корреляции $\tau_{\text{корр}} = \pi / \omega_0$. Квазизелый шум получается путем прохождения белого шума через идеальный фильтр нижних частот (ФНЧ) [13]. Сигнал на выходе ФНЧ $u_{\text{вых}}(t)$ можно записать в виде интеграла Дюамеля [13]:

$$u_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^t u_{\text{вх}}(\tau) h(t-\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $u_{\text{вх}}(\tau)$ – сигнал на входе ФНЧ, $h(t-\tau) = (K_0 \omega_b / \pi) \cdot (\sin(\omega_b t) / (\omega_b t))$ – импульсная характеристика ФНЧ [13], здесь K_0 – коэффициент передачи ФНЧ, ω_b – граничная частота фильтра. Так как, нас интересуют дискретные случайные величины, то выражение (5) для дискретной выборки можно записать в виде:

$$U_{\text{вых}j} = \sum_{i=-\infty}^j h(j-i) \cdot U_{\text{вх}i}. \quad (6)$$

Для дискретной выборки ПВР объема N выражение (6) примет вид [13]:

$$\dot{S}_{\text{кор}j} = \sum_{i=0}^j H(j-i) \cdot \dot{S}_{\text{некор}i}, \quad (7)$$

где $\dot{S}_{\text{некор}i}$ – некоррелированная выборка ПВР, $\dot{S}_{\text{кор}j}$ – моделируемая коррелированная выборка ПВР; $H(j-i)$ – матрица импульсных характеристик.

Таким образом, процесс моделирования коррелированной выборки ПВР можно сформулировать следующим образом. Моделируется некоррелированная выборка ПВР подстилающей поверхности. Затем, с помощью выражения (7) вычисляются значения для коррелированной выборки ПВР $\dot{S}_{\text{кор}j}$. При этом в качестве матрицы импульсных характеристик целесообразно взять матрицу вида:

$$H(i) = I \cdot \sin\left(\frac{i}{\pi \cdot n}\right) / \left(\frac{i}{\pi \cdot n}\right), \quad (8)$$

где n – число взаимно коррелированных выборок ПВР; I – единичная матрица. При таком представлении формируется коррелированная выборка ПВР, но при этом коэффициент взаимной корреляции элементов ПВР не изменяется.

Выводы

Разработанная статистическая математическая модель позволяет рассчитывать коррелированную выборку ПВР обратного отражения от подстилающей поверхности на основе экспериментальных данных. Результаты моделирования могут быть использованы при оценивании статистических харак-

теристик подстилающих поверхностей различных типов, а также при оценивании показателей качества обнаружения целей на фоне подстилающей поверхности при использовании методов радиолокации, основанных на поляризационных отличиях полезных и мешающих сигналов.

Список литературы

1. Моделирование в радиолокации / А.И. Леонов, В.Н. Васенев, Ю. И. Гайдуков и др.; Под ред. А.И. Леонова. – М.: Сов. радио, 1978. – 246 с.
2. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. – М.: Наука, 1972 – 424 с.
3. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Ю.К. Сиренко, И.В. Сухаревский, О.И. Сухаревский, Н.П. Яшина; Под ред. Ю.К. Сиренко. – Х.: Крок, 2000. – 344 с.
4. Beckman P., Spizzichino A. The scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. – London: Pergamon Pres, Oxford, 1963. – 503 p.
5. Бакулев П. А., Степин В. М. Методы и устройства селекции движущихся целей. – М.: Радио и Связь, 1986. – 288 с.
6. Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами. – К.: Наукова думка, 1987. – 232 с.

7. Соловьев Н.П. Отражающие свойства земных покровов // Труды Рижского института ГВФ. – 1963. – Вып. 27. – С. 37-41.

8. Расчет рассеяния электромагнитной волны на идеально проводящем объекте, частично покрытом радиопоглощающим материалом, с помощью триангуляционных кубатурных формул / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, А.З. Сазонов, К.И. Ткачук // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, № 1. – С. 47-54.

9. ЭПР объектов с неидеально отражающей поверхностью, имеющей изломы / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.А. Горельшев, С.В. Нечитайло, К.И. Ткачук // Зарубежная радиоэлектроника. – 2001. – № 6. – С. 41-48.

10. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

11. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. – М.: Сов. Радио, 1983. – 496 с.

12. Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 280 с.

13. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.

Поступила в редколлегию 23.07.2008

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. В.А. Василец, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

СТАТИСТИЧНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ВЕКТОРІВ РОЗСІЯННЯ ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ РАДІОХВИЛЬ

А.І. Омельченко

У статті запропоновано статистичний спосіб моделювання вибірових значень поляризаційних векторів розсіяння підстильних поверхонь різних типів в сантиметровому діапазоні радіохвиль. Отримані результати можуть бути використані при оцінці ефективності алгоритмів виявлення і розпізнавання цілей на тлі підстильної поверхні при використанні методу повного поляризаційного зондування простору.

Ключові слова: поляризаційний вектор розсіяння, поляризаційна матриця розсіяння, підстильна поверхня.

STATISTICAL MATHEMATICAL MODEL OF POLARIZING VECTORS OF DISPERSION OF RETURN REFLECTION FROM A SPREADING SURFACE FOR A CENTIMETRIC RANGE OF RADIO WAVES

A.I. Omelchenko

The statistical way of modelling polarizing vectors of dispersion of spreading surfaces of various types in a centimetric wave band is presented. Results can be used for an estimation of efficiency of algorithms of detection and recognition of the purposes on a background of a spreading surface by means of a method of full polarization probing.

Keywords: Polarizing vector of dispersion, the polarizing matrix of dispersion, a spreading surface.