

УДК 528.813

А.В. ПОПОВ, И.К. ВАСИЛЬЕВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ**

Приведены результаты анализа структурных характеристик гидрометеорологических объектов, влияющих на рассеяние электромагнитных волн, и наиболее широко распространенных в радиолокационной метеорологии моделей и соотношений. Разработана математическая модель гидрометеорообразования как радиолокационного объекта со статистическими свойствами. Проведено моделирование радиолокационных сигналов, отраженных различными видами облачности и осадками разной интенсивности, и сравнение результатов моделирования с имеющимися в литературных источниках экспериментальными данными. Полученные результаты создают предпосылки для исследования информативности поляризационных признаков для радиолокационного обнаружения и распознавания типа гидрометеорообразований.

гидрометеорологические образования, микрофизические параметры, рассеяние, отражаемость, деполаризация, распознавание, случайная величина, модель

Введение

В целях обеспечения безопасности полетов самолетов и вертолетов гражданской авиации одним из требований к бортовым радиолокационным средствам является возможность оперативного обнаружения и распознавания опасных для полетов гидрометеорологических образований (ГМО): мощных кучево-дождевых облаков, областей формирования града и грозоопасных зон. Распознавание ГМО бортовыми метеонавигационными радиолокационными комплексами в реальном масштабе времени возможно только за счет расширения пространства признаков, выделяемых из отраженного от ГМО сигнала. Одним из путей повышения информационных возможностей радиолокационных средств является использование поляриметрической информации, поскольку различия формы, фазового состояния частиц ГМО, их преимущественной ориентации приводят к изменению первоначальных поляризационных параметров электромагнитной волны (ЭМВ) в результате ее рассеяния на ГМО [1].

Для исследования возможности классификации ГМО по данным дистанционного зондирования (ДЗ) и выявления наиболее информативных признаков для распознавания требуется большой объем радио-

локационных данных, полученных от различных типов ГМО при различных (причем известных) значениях их микрофизических параметров (концентрации, размерах частиц, их ориентации, форме и фазовом состоянии, диэлектрической проницаемости), характеризующих свойства ГМО в удельном объеме и определяющих интегральные параметры: интенсивность, водность, радиолокационную отражаемость. Трудности, связанные с недостаточностью статистической информации, отсутствием в полном объеме экспериментальных данных ДЗ для специфических типов ГМО, погрешностями измерения и количественной оценки параметров ГМО, неточностями калибровки поляриметрических РЛС, обуславливают необходимость математического моделирования как ГМО, так и отраженных от них радиолокационных сигналов. Используемые при этом математические модели должны учитывать как общепризнанные, широко распространенные в радиолокационной метеорологии соотношения, так и экспериментальные данные о физических характеристиках ГМО. Адекватность моделирования можно определить путем сравнения рассчитанных по модели параметров с имеющимися в литературных источниках экспериментальными данными.

1. Модель ГМО

Математическая модель ГМО как отражающего объекта со статистическими свойствами должна учитывать распределение частиц по размерам, ориентацию относительно плоскости волнового фронта, их несферичность и диэлектрические свойства.

1.1. Распределение частиц по размерам

Размеры частиц, m^4 , в облаках подчиняются гамма-распределению [2, 4, 5]:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-D\Lambda); \quad (1)$$

$$\Lambda = \sqrt[3]{(\mu+1)(\mu+2)(\mu+3)} / D_3, \quad (2)$$

где $D_3 = D_{\max} / 2$ – средний кубический диаметр;

$$N_0 = N_t \Lambda^{1+\mu} / \Gamma(1+\mu). \quad (3)$$

Число частиц в единице объема

$$N_t = [6\Lambda^3 \Gamma(1+\mu) LWC] / [\Gamma(4+\mu) \rho \pi], \quad (4)$$

где ρ – плотность частиц, LWC – водность ГМО.

Для тонких капельных облаков типов St, Sc, As, в которых отсутствуют сверхкрупные капли (радиусом $r > 85$ мкм) параметры распределения могут варьироваться в пределах: μ – от 2,0 (для Sc) до 10,5 (для St); D_3 – от 15 мкм (для St) до 25 мкм (для Sc). Водность слоистых облаков составляет 0,05...0,25 г/м³, а кучевых – несколько грамм на 1 м³ [6]. Для облаков Cu cong (без осадков) $\mu=3,5$; $D_3=20$ мкм; $LWC=1...2$ г/м³. В случае крупнокапельных облаков (Ns, Cb, Cb с грозой) предлагается использовать сумму двух гамма-распределений: первое с $\mu=2,0$; $D_3=35$ мкм – для описания распределения по размерам мелких капель; второе с $\mu_1=0,1$; $D_{13}=300$ мкм – для сверхкрупных капель. Концентрация сверхкрупных капель (N_1) для облаков Ns, Cb по данным [4] составляет 1000 м⁻³; для грозовых облаков эта величина на 1–2 порядка выше, поскольку в таких типах ГМО имеют место усиленные процессы слипания капель вследствие наличия сильных электрических зарядов. Концентрация

мелких капель N_0 определяется по (3), (4), при этом в (4) вместо интегрального значения водности облака LWC подставляется величина $LWC - LWC_1$, где LWC_1 – водность сверхкрупных капель:

$$LWC_1 = \frac{\pi}{6} \rho \sum_{i=1}^{N_1} D_{i3}^3 \approx \frac{\pi}{6} \rho N_1 D_{13}^3. \quad (5)$$

По данным [4] максимальные размеры ледяных кристаллов составляют сотни мкм вдоль большой оси при толщине пластин и столбиков, равной десяткам мкм; концентрация – единицы и десятки в 1 м³ в облаках верхнего яруса и десятки и сотни в 1 м³ в системе Ns–As. Наиболее распространенными габитусами кристаллов являются пластинки, иголки и столбики. Формы частиц при моделировании аппроксимируются сфероидами: сплюснутыми (для плоских кристаллов) или вытянутыми (для кристаллов столбикового типа). Плотность пластинок составляет 900 кг/м³, игл – 300 кг/м³; параметр распределения по размерам D_3 равняется 500 мкм и 300 мкм соответственно. Для перистых облаков (Ci) $LWC=1...5$ мг/м³ при $\mu=5,5$; для Ns, As $LWC=0,1...0,35$ г/м³ при $\mu=5,5$.

Для моделирования размеров капель в дождях с интенсивностью $R \leq 35$ мм/ч используется модифицированное распределение Маршалла–Палмера [7]:

$$N(D) = 7,3 \cdot 10^3 R^{0,056} \exp(-4,3DR^{-0,21}). \quad (6)$$

Так как экспоненциальное распределение дает завышенные оценки количества малых капель, то для конвективных дождей с высокой концентрацией крупных капель (ливней, гроз) применяется логарифмически нормальное распределение [5, 8] с параметрами, представленными в табл. 1 (R , мм/ч):

$$N(D) = \frac{N_t}{D\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp\left[\frac{-(\ln D/D_g)^2}{2(\ln \sigma)^2}\right], \quad (7)$$

где D_g – среднее геометрическое диаметров капель; σ – среднее квадратическое отклонение (СКО).

Для ледяной крупы применяется гамма-распределение по размерам [2, 9] с параметрами:

$$\mu = 0,5; \Lambda = \ln(R/88) \cdot 1000/3,45; N_t = 10^6/\Lambda. \quad (8)$$

Таблица 1

Параметры ГМО

Тип ГМО	N_t	D_g	$\ln \sigma$
ливень $5 < R < 50$	$40 R^{0,44}$	$1,14 + 0,18 \ln R$	$0,29 - 0,001 R$
гроза $5 < R < 50$	$46 R^{0,55}$	$0,222 + 0,397 \ln R$	$0,5 - 0,0035 R$
гроза $50 < R < 200$	$8,8 R$	$1,76 + 0,000733 \ln R$	$1,37$

Для града предлагается использовать двумодальное распределение, соответствующее взвешенной сумме двух гамма-распределений с $\mu_1 = 1$ и $\mu_2 = 8$:

$$N(D) = N_t \left[0,6 \frac{\Lambda^2}{\Gamma(2)} D + 0,4 \frac{\Lambda^9}{\Gamma(9)} D^8 \right] e^{-D\Lambda}. \quad (9)$$

Параметр Λ вычисляется по (8), общее число градин в единице объема $N_t = 4 \cdot 10^4/\Lambda$.

Распределение снежинок по размерам описывается экспоненциальной зависимостью, параметры которой связаны с интенсивностью снегопада R :

$$N(D) = 2500R^{-0,94} \exp(-2,29R^{-0,45}D), \quad (10)$$

где D – диаметр капель, образующихся при таянии снежинок [10]. Полученные в соответствии с (10) значения диаметров приводятся к размерам снежинок с учетом плотности последних (ρ_s , г/см³):

$$D_s = \frac{D}{\sqrt[3]{\rho_s}}. \quad (11)$$

1.2. Форма частиц ГМО

Форма сфероидальных частиц определяется отношением размера частицы в плоскости симметрии b к ее размеру вдоль оси симметрии a : $m = b/a$, причем $m > 1$ для сплюснутых сфероидов и $m < 1$ для вытянутых. Для капель степень деформации зависит от размера [10] (D , мм):

$$a/b = 1,03 - 0,062 D. \quad (12)$$

Крупные капли имеют более сплюснутую форму, чем получается из этого соотношения, поэтому для ливней и гроз используется зависимость [5] (D , см):

$$a/b = 1 - 0,64 D^{1,25}. \quad (13)$$

Для ГМО типа Сб с грозой отношение размеров капель, полученное по (12), следует умножить на поправочный коэффициент ($k = 0,6 \dots 0,7$), введенный для учета дополнительного вытягивания капли в результате выстраивания дипольных молекул воды вдоль силовых линий электрического поля.

Для частиц в твердой фазе приводится только статистическая информация об отношении минимального и максимального размеров. Для ледяной крупы это отношение меняется от 0,5 до 0,9 и в среднем увеличивается при увеличении объема частиц. В соответствии с этими данными степень деформации $a/b = 0,5$ при $1 \text{ мм} \leq D \leq 4 \text{ мм}$, $a/b = 0,75$ при $4 \text{ мм} < D < 9 \text{ мм}$, $a/b = 1$ – в остальных случаях.

Для частиц града соотношение минимального и максимального размеров колеблется в пределах 0,1...1,0 с модальными значениями 0,75...0,8 [2]. Поскольку форма градин не зависит от размеров, то предлагается алгоритм, позволяющий получать случайные величины степени деформации, подчиняющиеся гамма-распределению (рис. 1):

$$\frac{a}{b} = 1,3 + 0,05 \ln \prod_{i=1}^{10} r_i, \quad (14)$$

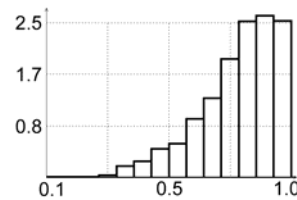


Рис. 1. Гистограмма распределения отношения a/b для градин

где r – равномерно распределенная на $(0; 1]$ случайная величина. Распределение (14) усечается до интервала допустимых значений $a/b \in [0,1; 1]$.

Отношение минимального и максимального размеров для ледяных кристаллов рассчитывают по формулам [2] (D , м):

$$a/b = D^{0,526} \cdot 10^4/1,25 \text{ – для пластинок}; \quad (15)$$

$$a/b = D^{0,073}/0,1858 \text{ – для игл}. \quad (16)$$

Агрегаты снежных кристаллов считают либо чрезвычайно сплюснутыми, либо квазисферическими телами [2, 5] со средним значением отношения

a/b , приблизительно равным 1 (для агрегатов диаметром меньше 10 мм) или 0,9 (для $D > 10$ мм) [10]. В модели предлагается рассчитывать степени деформации снежинок по формулам

$$\begin{cases} a/b = (1,03 - 0,062D)k & \text{при } D \leq 10 \text{ мм;} \\ a/b = 0,9k & \text{при } D > 10 \text{ мм.} \end{cases} \quad (17)$$

Коэффициент k может принимать значения 0,1...1.

1.3. Диэлектрическая проницаемость

Диэлектрические свойства ГМО описываются комплексной диэлектрической проницаемостью $\dot{\varepsilon} = \text{Re } \varepsilon + j \text{Im } \varepsilon$, зависящей от фазового состояния, плотности частиц, длины волны и температуры среды. Для капельных ГМО при длинах волн $\lambda > 1$ мм и температурах от 0 °C применимо модифицированное релаксационное уравнение Дебая:

$$\text{Re } \varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_0) \left(1 + (\lambda_s / \lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) \right)}{1 + 2(\lambda_s / \lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\lambda_s / \lambda)^{2(1-\alpha)}}, \quad (18)$$

$$\text{Im } \varepsilon = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_0) (\lambda_s / \lambda)^{1-\alpha} \cos(\alpha\pi/2)}{1 + 2(\lambda_s / \lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\lambda_s / \lambda)^{2(1-\alpha)}} + A\lambda,$$

где ε_0 – оптическая проницаемость; ε_s – статическая проницаемость; λ_s – критическая длина волны; $A = 0,0067$ [5]. Для расчета параметров этого уравнения используются регрессии:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= 0,00033836 \exp(2513,98/(t + 273)); \\ \varepsilon_s &= 78,54 \left\{ 1 - 4,579 \cdot 10^{-3}(t - 25) + \right. \\ &\quad \left. + 1,19 \cdot 10^{-5}(t - 25)^2 - 2,8 \cdot 10^{-8}(t - 25)^3 \right\}; \\ \varepsilon_0 &= 5,27137 + 0,0216474t - 0,00131198t^2; \\ \alpha &= -16,8129/(t + 273) + 0,0609265. \end{aligned}$$

Лед единичной плотности при $t = 0$ °C и $\lambda = 1 \dots 10$ см имеет $\varepsilon_i = 3,1684 - 0,0008188j$. Путем аппроксимации экспериментальных данных, представленных в [8], получены зависимости реальной и мнимой части ε_i от t (ниже 0 °C) (рис. 2):

$$\begin{aligned} \text{Re } \varepsilon_i &= 3,168395 + 2,6 \cdot 10^{-6} \ln(1 + \sqrt{|t|}); \\ \text{Im } \varepsilon_i &= 8,2 \cdot 10^{-3} \exp(-\sqrt{|t|}/3). \end{aligned} \quad (19)$$

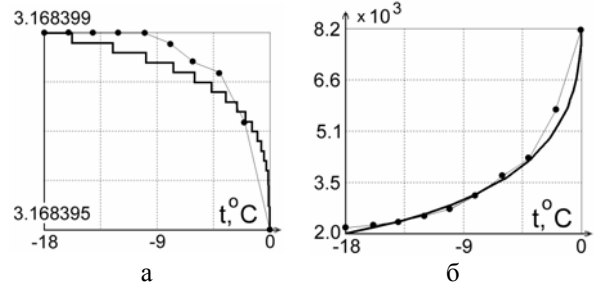


Рис. 2. Аппроксимационные кривые для зависимостей $\text{Re } \varepsilon_i$ (а) и $\text{Im } \varepsilon_i$ (б) от температуры (экспериментальные данные нанесены точками)

Частицы твердой фазы представляют смесь льда с воздухом, водой или и с тем и другим вместе. Выражение для диэлектрической проницаемости такой смеси ε_s можно получить из соотношения [10]:

$$\frac{\dot{\varepsilon}_s - 1}{\dot{\varepsilon}_s + u} = p_i \frac{\dot{\varepsilon}_i - 1}{\dot{\varepsilon}_i + u} + p_w \frac{\dot{\varepsilon}_w - 1}{\dot{\varepsilon}_w + u} + p_a \frac{\dot{\varepsilon}_a - 1}{\dot{\varepsilon}_a + u}, \quad (20)$$

где ε_i , ε_w , ε_a – диэлектрические проницаемости для льда, воды и воздуха соответственно ($\varepsilon_a = 1$); p_i , p_w , p_a – части общего объема, занятые льдом, водой и воздухом ($p_i + p_w + p_a = 1$).

Эффективная диэлектрическая проницаемость для ледяной крупы и града рассчитывается по (20) как для смеси льда и воды при значении $u = 100$. Диэлектрические проницаемости компонентов определяются соответственно: для воды – по (18) (при $t = 0$ °C), для льда – по (19).

Снежинки рассматриваются как смесь льда, воды и воздуха, при этом в (20) $u = 2$, а доли льда и воды определяются по эмпирическим соотношениям между плотностью снега ρ_s и p_i , p_w [5] (ρ_s , г/см³):

$$p_i = \rho_s (1 - \rho_s) / \rho_i, \quad p_w = \rho_s^2. \quad (21)$$

1.4. Моделирование диаметров частиц ГМО

Размеры сферической частицы определяются соотношением ее осей и диаметром D эквивалентного ей по объему шара. Последовательность таких диаметров предлагается получать с помощью метода обратной функции, который основан на преобразовании равномерно распределенной на интервале $[0; 1]$ случайной величины r в случайную величину

$D = F^{-1}(r)$ с требуемой плотностью распределения [11]. Значения $F(D)$ можно определить путем численного интегрирования аналитически заданной функции плотности распределения частиц ГМО по размерам $f(D) = N(D)/N_t$, вычисленной в равноотстоящих узловых точках D_i на интервале возможных значений случайной величины $[D_{\min}, D_{\max}]$. Для экспоненциального закона распределения $D_{\min} = 0$, а для гамма- и логарифмического нормального распределений задают отличное от нуля достаточно малое значение этого параметра. Строго говоря, математическая величина $D_{\max} = \infty$, но в практических вычислениях рекомендуется выбирать конечное число в зависимости от моделируемого класса ГМО. Обратную функцию предлагается вычислять путем кусочно-линейной интерполяции дискретных значений интегральной функции $F(D)$:

$$F^{-1}(D_i) = a_i F_i + b_i; \quad (22)$$

$$a_i = \frac{D_{i+1} - D_i}{F_{i+1} - F_i}; \quad b_i = D_i - a_i F_i. \quad (23)$$

В соответствии с (23) для j -й реализации равномерно распределенной от 0 до 1 случайной величины r , попавшей в интервал $[F_i, F_{i+1}]$, определяются значения угловых коэффициентов. Тогда j -я реализация диаметра $D_j = a_i r_j + b_i$ (рис. 3). На рис. 4 представлены гистограмма реализаций случайной величины D , сформированной по описанному алгоритму, и соответствующая теоретическая плотность распределения частиц по размерам.

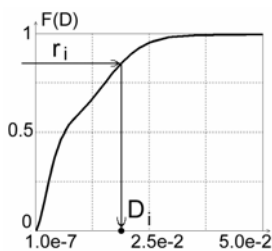


Рис. 3. Моделирование размеров частиц ($D, \text{м}$)

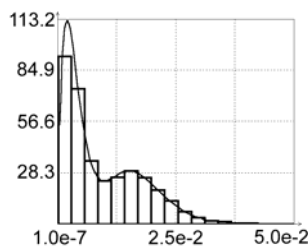


Рис. 4. Гистограмма и плотность распределения частиц по размерам

1.5. Ориентация частиц ГМО

Углы наклона частиц оказывают влияние на радиолокационные признаки ГМО из-за изменений эффективных длин рассеивателей вдоль направлений, ортогональных поляризованной излучаемой ЭМВ, что вызывает деполяризацию падающего поля. Ориентация частицы определяется углом наклона β (углом между проекцией оси симметрии частицы на плоскость волнового фронта и вертикалью) и углом ориентации γ (углом между осью симметрии частицы и плоскостью волнового фронта). Распределение углов наклона считается нормальным [10]. Параметры закона распределения зависят от класса ГМО. Для капель, которые обладают наиболее упорядоченной ориентацией, математическое ожидание $\bar{\beta} = 7 \dots 12^\circ$, а СКО $\sigma_\beta = 10 \dots 20^\circ$. Для ледяной крупы, града, ледяных кристаллов в виде пластинок и снега $\bar{\beta} \approx 0^\circ$, $\sigma_\beta = 25 \dots 45^\circ$, поскольку такие частицы имеют преимущественное направление ориентации оси вращения, близкое к вертикали, но ширина углового распределения относительно максимума больше, чем для капель. Кристаллы льда в виде игл ориентированы, как правило, хаотически в горизонтальной плоскости; для них $\bar{\beta} \approx 90^\circ$ и $\sigma_\beta = 25 \dots 45^\circ$. Так как поляризационные параметры отраженного сигнала в гораздо большей степени зависят от распределения частиц по углу β , чем по углу γ [1], то можно считать ориентацию частиц произвольной, при этом угол γ является случайной величиной, равномерно распределенной на $[-\pi; \pi]$.

2. Модель рассеяния

2.1. Рассеяние ЭМВ на одиночной частице

Полное представление о деполяризующих свойствах объекта дает комплексная поляризационная матрица рассеяния (ПМР) \mathcal{S} . ПМР описывает отражающие свойства объекта на ортогональных поляризациях при заданной частоте зондирования, а

квадраты модулей ее элементов соответствуют эффективным поверхностям рассеяния объекта (ЭПР) ($\sigma_{ij} = |S_{ij}|^2 = S_{ij} \cdot S_{ij}^*$). В поляризационном базисе (ПБ) "горизонталь – вертикаль" (HV) ПМР сферической частицы с полуосями a и b (рис. 5) может быть записана в виде

$$\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{Q}^{-1} \dot{\mathbf{S}}_0 \mathbf{Q}, \quad (24)$$

где \mathbf{Q} – унитарная матрица преобразования ПБ $\{HV\}$ в ПБ $\{\xi\eta\}$, связанный с проекциями осей частицы на плоскость волнового фронта,

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix};$$

$\dot{\mathbf{S}}_0$ – диагональная матрица, элементы которой в приближении Рэлея ($2\pi a/\lambda \ll 1$) выражаются как

$$\dot{f}_\xi = j \frac{k^2 r_0^3}{3} \left[\frac{2(\dot{\epsilon} - 1)}{(\dot{\epsilon} + 1) - (\dot{\epsilon} - 1)L} \sin^2 \gamma + \frac{\dot{\epsilon} - 1}{1 + (\dot{\epsilon} - 1)L} \cos^2 \gamma \right], \quad (25)$$

$$\dot{f}_\eta = j \frac{k^2 r_0^3}{3} \frac{2(\dot{\epsilon} - 1)}{(\dot{\epsilon} + 1) - (\dot{\epsilon} - 1)L},$$

где $r_0 = D/2$ – радиус равнообъемной сфероиды сферы; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; L – геометрический множитель, определяемый отношением $m = b/a$:

$$L = \begin{cases} \frac{m^2}{m^2 - 1} \left[1 - \frac{\arctg(\sqrt{m^2 - 1})}{\sqrt{m^2 - 1}} \right], & m > 1, \\ 1/3, & m = 1, \\ \frac{m^2}{1 - m^2} \left[\frac{1}{2\sqrt{1 - m^2}} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - m^2}}{1 - \sqrt{1 - m^2}} - 1 \right], & m < 1. \end{cases}$$

Обозначив $\Delta \dot{f} = \dot{f}_\xi - \dot{f}_\eta$, $\dot{\sigma}_0 = \frac{1}{2} \Delta \dot{f} \cos^2 \gamma + \dot{f}_\eta$,

$\dot{\nu} = \frac{\Delta \dot{f} \cos^2 \gamma}{\Delta \dot{f} \cos^2 \gamma + 2\dot{f}_\eta}$, можно записать ПМР как

$$\dot{\mathbf{S}} = \dot{\sigma}_0 \begin{bmatrix} 1 - \dot{\nu} \cos 2\beta & \dot{\nu} \sin 2\beta \\ \dot{\nu} \sin 2\beta & 1 + \dot{\nu} \cos 2\beta \end{bmatrix}. \quad (26)$$

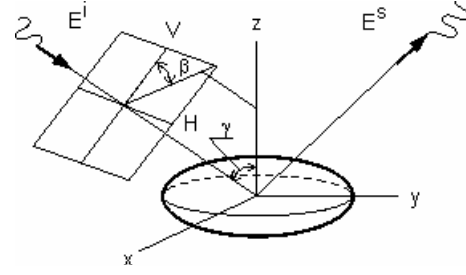


Рис. 5. Геометрия рассеяния на частице ГМО

Элементы ПМР и все поляризационные параметры ГМО, получаемые на ее основе, представляют собой случайные процессы, статистические свойства которых зависят от типа ГМО. Вид и параметры законов распределения этих свойств отличаются высокой изменчивостью и нестационарностью, поскольку определяются неоднородностью большого числа параметров (температура, давление, влажность, концентрация, размеры и агрегатное состояние частиц, направление и скорость воздушного потока, внешнее электрическое поле) [5]. Для примера на рис. 6 представлены гистограммы амплитуд элементов ПМР для града.

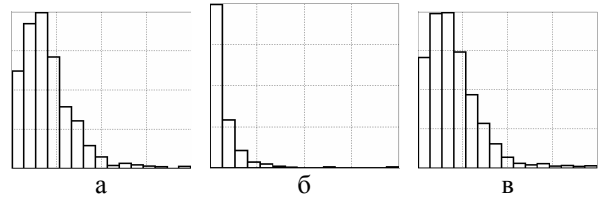


Рис. 6. Гистограммы $|S_{HH}|$ (а), $|S_{HV}|$ (б), $|S_{VV}|$ (в)

2.2. Рассеяние ЭМВ ансамблем частиц ГМО

Рассмотрим элементарный объем ГМО, содержащий N частиц, среднее расстояние между которыми значительно больше длины волны падающего излучения и среднего размера частиц. При таких условиях каждая частица ансамбля является независимым отражателем, а вклад многократного рассеяния внутри элементарного объема можно считать пренебрежимо малым. Пространственное взаиморасположение частиц предполагается хаотичным настолько, что не наблюдается систематической зависимости в фазовых сдвигах волн, отраженных от различных частиц. Тогда ПМР рассматриваемого

ансамбля ГМО можно получить путем сложения N ПМР всех одиночных независимых рассеивателей, составляющих данный объем [12]. Случайность фазовых сдвигов сигналов, отраженных от различных частиц ансамбля, учитывается множителем $\exp(j\varphi)$, где φ с равной вероятностью принимает значения от 0 до 2π :

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N S_i e^{j\varphi_i} \quad (27)$$

3. Поляриметрические параметры

К числу наиболее распространенных измеряемых поляриметрических параметров ГМО относятся показатели радиолокационной отражаемости для горизонтально и вертикально поляризованных волн Z_h и Z_v , дифференциальная отражаемость Z_{dr} , дифференциальная отражаемость градового сигнала H_{dr} , линейное деполяризационное отношение LDR_{vh} [2, 13], определяемые как

$$Z_h = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |\dot{K}_m|^2} |S_{HH}|^2, \quad Z_v = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |\dot{K}_m|^2} |S_{VV}|^2, \quad (28)$$

где $\dot{K}_m = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}$;

$$Z_{dr} = 10 \lg \left(|S_{HH}|^2 / |S_{VV}|^2 \right); \quad (29)$$

$$H_{dr} = Z - f(Z_{dr}), \quad (30)$$

где $f(Z_{dr}) = \begin{cases} 60 & \text{при } Z_{dr} > 1,74 \text{ дБ,} \\ 19Z_{dr} + 27 & \text{при } 0 < Z_{dr} < 1,74 \text{ дБ,} \\ 27 & \text{при } Z_{dr} \leq 0 \text{ дБ;} \end{cases}$

$$LDR_h = 10 \lg \left(\frac{|S_{VH}|^2}{|S_{HH}|^2} \right), \quad LDR_v = 10 \lg \left(\frac{|S_{VH}|^2}{|S_{VV}|^2} \right). \quad (31)$$

4. Методика моделирования

Данная методика моделирования разработана для расчета в приближении Рэлея полей обратного однократного рассеяния полидисперсных, хаотически ориентированных сферических частиц. Основными входными параметрами модели являются

длина волны излучения λ ; температура окружающей среды; математическое ожидание и СКО угла наклона β ; тип ГМО; значение интенсивности (либо водности). Для классов ГМО «ледяная крупа» и «град» вводится значение доли воды в общем объеме ГМО p_w (для мокрых крупы и града $p_w=1$, для сухих – $p_w=0$, для пористого града p_w принимает промежуточные значения). Алгоритм моделирования состоит в следующем:

- по принятому в зависимости от моделируемого класса ГМО закону распределения частиц по размерам (1)–(10) и данным об интенсивности (водности) определяется число частиц в единице объема:

$$N_t = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) dD; \quad (32)$$

- генерируется случайная последовательность диаметров частиц (22), (23);
- рассчитываются степени деформации (12)–(17);
- генерируется последовательность нормально распределенных углов наклона частиц β ;
- генерируется последовательность равномерно распределенных на $[-\pi; \pi]$ углов ориентации γ ;
- вычисляется эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость ε частиц (18)–(20);
- моделируется рассеяние электромагнитной волны на одиночных частицах ГМО (25), (26);
- генерируется последовательность равномерно распределенных на $[0; 2\pi]$ углов φ для учета фазового сдвига сигналов, отраженных от различных частиц со случайными пространственными координатами в единичном объеме;
- определяется одна реализация ПМР S для ансамбля частиц (27);
- моделирование выполняется в цикле по заданному количеству отсчетов N_{point} ;
- по выборке $S(N_{point})$ рассчитываются поляриметрические параметры ГМО (28)–(31) и определяются законы их распределения.

5. Результаты проверки адекватности моделирования

Адекватность методики проверялась путем сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными о значениях ряда показателей отражаемости и величинах деполяризации для ГМО (28)–(31). Результаты сравнения (табл. 2) показывают, что математические ожидания рассчитанных по модели поляриметрических параметров находятся в пределах, определенных для специфических типов ГМО по данным ДЗ. Большой разброс параметров относительно среднего значения отражает тот факт, что ГМО представляют собой флуктуирующие объекты со статистическими свойствами, а имеющиеся расхождения экспериментальных и теоретических параметров указывают на необходимость дальнейшего уточнения моделей ГМО.

Заключение

Разработанная с учетом как общепризнанных в радиолокационной метеорологии соотношений, так и данных ДЗ методика моделирования позволяет исследовать процессы отражения ЭМВ сферическими, полидисперсными, хаотически ориентированными частицами ГМО. Сравнение результатов моделирования поляриметрических признаков специфических типов ГМО с имеющимися в литературных источниках данными подтвердило достаточную адекватность моделирования. Полученные результаты создают предпосылки для исследования информативности поляризационных признаков радиолокационного обнаружения и распознавания ГМО, представляющих угрозу для безопасности полетов.

Литература

1. Рыжков А.В. Поляризационные методы в метеорологической радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 4. – С. 18–28.
2. Straka J.M., Zrníc D.S., Ryzhkov A.V. Bulk hydrometeor classification and quantification using po-

larimetric radar data: Synthesis of relations // J. Appl. Meteor. – 2000. – Vol. 39. – P. 1341–1372.

3. Степаненко В.Д., Гальперин С.М. Радиотехнические методы исследования гроз. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 204 с.
4. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Нездойминова Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 231 с.
5. Васильева И.К., Краснов О.А. Микрофизические параметры гидрометеорологических объектов дистанционного зондирования // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2002. – Вип. 29. – С. 16–24.
6. Мейсон Б.Дж. Физика облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1961. – 542 с.
7. De Wolf D.A., Zwiesler A.J. Rayleigh-Mie approximation for line-of-sight propagation through rain at 5–90 GHz // *IEEE Transaction on antennas and propagation*. – 1996. – Vol. 44. – № 3. – P. 1208–1219.
8. Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 348 с.
9. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 412 с.
10. Oguchi T. Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors // *Proc. of the IEEE*. – 1983. – Vol. 71. – № 9. – P.1029–1078.
11. Пугачев В.С. Теория случайных функций. – М.: Физматгиз, 1960. – 883 с.
12. Mishchenko M.I., Travis L.D. Electromagnetic scattering by nonspherical particles // *Exploring the atmosphere by remote sensing*. – 2002. – P. 47.
13. Васильева И.К. Информативность поляриметрических признаков радиолокационного распознавания гидрометеорологических объектов // *Вісник Технологічного університету Поділля*. – 2003. – Т. 2. – № 3. – С. 155–158.

Поступила в редакцию 15.01.04

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Я. Красовский, ГНПЦ «Природа», г. Харьков