

doi:10.3788/gzxb20134203.0368

雨介质中球形目标的 GHz 复合散射特性

李应乐¹, 李瑾², 王明军¹, 董群峰¹

(1 咸阳师范学院 电波传播与散射研究所, 陕西 咸阳 712000)

(2 陕西学前师范学院, 西安 710100)

摘 要: 将背景空间及其中存在的离散粒子作为一种连续的电介质, 得出了背景空间中离散粒子存在时混合体的等效介电常量模型. 利用该模型和国际电讯联盟给出的雨衰减测量数据, 确定了 GHz 波段雨介质的等效介电常量并验证了其有效性. 得出了雨环境中目标复合散射场的解析式, 对雨环境中球形目标的复合微分散射进行了仿真与分析, 进而研究了降雨率、电磁波频率及极化状态等因素对复合微分散射的影响. 计算表明: 降雨对微分散射的影响在 10^{-3} 分贝上, 电磁波垂直极化时降雨的影响大于其水平极化时的影响. 研究结果对精确制导和目标识别等有一定的参考意义.

关键词: 复合散射; 降雨; 目标

中图分类号: O451; O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)03-0368-5

Characteristics of Complex Scattering for a Medium Sphere in Rainfall in GHz Wave Band

LI Ying-le¹, LI Jin², WANG Ming-jun¹, DONG Qun-feng¹

(1 Institute of E. M. wave Propagation & Scattering, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

(2 Shaanxi Xueqian Normal University, Xianyang, Shaanxi 710100, China)

Abstract: The discrete particles and their existing space are supposed as a continuous medium, and its equivalent dielectric constant of the composite medium is developed. By using this constant and the attenuations induced by rainfall recommended by ITU, the dielectric constant is completely determined in GHz wave band and its validity is tested. The analytical expression of complex scattering field for a target in rainfall is presented. So the complex differential scattering in rainfall is simulated. The influences of rain, frequency and polarization etc on the scattering field are researched. Computations show that the influence induced by the rainfall on the differential scattering cross section is about 10^{-3} dB, and the effect produced by the vertical polarization wave is bigger than that resulted by the parallel polarization wave. The obtained result provides a reference in precision guide and target identification.

Key words: Complex scattering; Rainfall; Target

0 引言

目标在实际环境中的复合电磁散射特性研究为环境杂波中目标识别、跟踪与制导等高技术提供了仿真模型与理论依据, 其中球体、圆柱体等目标与粗糙面及海杂波等典型环境的电磁耦合已得到深入的研究与应用^[1-6]. 降雨、沙尘暴及雾等是一种重要的

电磁环境, 其中降雨的影响最为严重^[7-9]. 事实上当雷达工作频率高于 3GHz 时, 雨滴的影响就必须加以考虑了, 特别在恶劣的天气状况下, 雨滴等气象粒子对较高频率的电磁波存在相当强的衰减作用. 因此, 研究目标与典型环境降雨等的电磁相互作用具有理论意义和工程应用价值. 如果将雨滴及其存在的空间看成一种连续的介质, 介质的介电常量将为

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 60971079, 61271110, 61102018)资助

第一作者: 李应乐(1961-), 男, 三级教授, 博士, 主要研究方向为复杂介质的光电散射. Email: liyinglexidian@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-09-13; 录用日期: 2012-12-11

复数^[10]. 球体目标散射特性解析研究是在自由空间推导出来的^[11-12], 可为复杂目标的散射研究提供评价标准. 目标外的电磁波传播波数 k 为实数, 当目标处于降雨环境中, 目标外的介质为有耗介质, 电磁波的传播波数成为复数, 散射电磁场中的有关系数必须用修正贝塞尔函数加以表达. 如何准确地应用修正贝塞尔函数表示散射系数需要进一步研究, Mie 理论难以直接应用于研究降雨环境中球体目标的散射特性.

本文将雨滴及其存在的空间看成一种连续的介质, 利用文献[9]的实际测量数据, 得到了 GHz 波段雨滴及其存在空间混合体的介电常量. 计算了其中电磁波传播衰减因子与传播波数大小, 研究了球体目标的复合散射特性. 以建议的测量模型为准, 对降雨、频率等因素对目标散射特性的影响进行了仿真, 为研究恶劣气象环境中目标散射等做了有益的尝试.

1 雨介质的等效介电常量

设椭球粒子的介电常量为 ϵ_1 , 悬浮于介电常量为 ϵ_2 的均匀介质中, 单位体积中的粒子数为 n_0 . 将这一复合介质置放于均匀外场为 \mathbf{E}_{0x} 静电场中, 从椭球坐标系出发^[13] 已求得该粒子的内部电场为

$$\mathbf{E}_x^1 = \frac{\mathbf{E}_{0x}}{1 + A_1(\epsilon_1 - \epsilon_2)/\epsilon_2}$$

$$A_1 = \frac{abc}{2} \int_0^\infty \frac{1}{(s+a^2)\sqrt{(s+a^2)(s+b^2)(s+c^2)}} ds \quad (1)$$

式中, A_1 为极化因子, a 、 b 、 c 分别为椭球的三个半轴, s 为积分变量, 如果将悬浮粒子与其背景介质的混合体当成连续介质, 那么该混合体的等效介电常量为

$$\epsilon_{\text{eq}} = \epsilon_2 \left(1 + V \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\epsilon_2 + A_1(\epsilon_1 - \epsilon_2)} \right) \quad (2)$$

一般情况下, 粒子悬浮在大气中, 即 $\epsilon_2 = \epsilon_0$, $\epsilon_1 = \epsilon$, 那么等效介电常量变为

$$\epsilon_{\text{eq}} = \epsilon_0 \left[1 + V \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_0 + A_1(\epsilon - \epsilon_0)} \right] \quad (3)$$

式中, ϵ_{eq} 是悬浮椭球粒子的等效介电常量, ϵ_0 、 ϵ 分别为背景和悬浮粒子的介电常量, V 为单位体积中粒子所占的体积; 将雨滴看成球形粒子, 利用 Weibull 雨滴谱^[14] 乘以雨滴的体积在对雨滴的半径进行积分可估计雨滴的相对体积 V 大约为 $V = 10^{-6}$; A_1 是雨滴的极化因子, 与雨滴的绝对大小无关, ϵ_0 是真空中介电常量. 令雨滴粒子的介电常量为

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

将其代入式(3)并作级数展开可得相对介电常量为

$$\epsilon_r = \left(1 + \frac{V}{A_1} - \frac{V(\epsilon' - 1)}{A_1((\epsilon' - 1)^2 + \epsilon''^2)} \right) - j \frac{V\epsilon''}{A_1((\epsilon' - 1)^2 + \epsilon''^2)} \quad (4)$$

式(4)的虚部为

$$\epsilon''_r = \frac{V\epsilon''}{A_1((\epsilon' - 1)^2 + \epsilon''^2)} \quad (5)$$

雨滴的极化因子 A_1 大约为 1, ϵ' 、 ϵ'' 分别为雨滴介电常量的实部与虚部, V 为雨滴的相对体积. 所以, 将有关的数据代入式(5)可得降雨的等效相对介电常量的虚部应在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 数量级上, 这一理论估计与下面的仿真结果完全一致, 同理可得等效介电常量的实部近似为 1. 因此可设混合体的相对介电常量模型为

$$\epsilon_{hr} = 1 - j\epsilon''_h \quad (6)$$

2 混合体的传播常量

设混合体的传播常量为 $k_c = \beta - j\alpha$, 由于

$$k_c = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_{hr}} \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)可得

$$\beta = \sqrt{k_0^2 + \alpha^2}$$

$$\epsilon''_h = \frac{2\alpha \sqrt{k_0^2 + \alpha^2}}{k_0^2} \quad (8)$$

式(8)表明: 如果已知衰减因子, 则可获得传播因子. 混合体的相对介电常量变为

$$\epsilon_{hr} = 1 - j \frac{2\alpha \sqrt{k_0^2 + \alpha^2}}{k_0^2} \quad (9)$$

3 雨介质衰减因子的确定

设雨介质中电磁波的传播为: $E = E_0 e^{-\alpha z} \cdot e^{-j(\beta z - \omega t)}$. 利用分贝的定义可得降雨引起的电磁波衰减 A 为 8.686α (单位: $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$). 同时 $A = \kappa R^r$, R 是以 mm/h 为单位的降雨率, 其他参量的确定见国际电讯联盟 (International Telecommunications Union-Recommendation, ITU-R). 即

$$\alpha = \kappa R^r / 8686 \quad (10)$$

式(10)表明: ITU-R 给出的雨对电磁波的衰减 A 完全可以确定电磁波传播的衰减因子 α . 通常 A 的大小约为几分贝到几十分贝, 衰减的具体大小不仅和电磁波的频率有关, 还和电磁波的极化、传播路径以及降雨率有关. 那么, 由式(10)可得衰减因子

$$\alpha \ll 1 \quad (11)$$

其大小与频率、降雨率的关系如图 1. 传播因子等可以写为

$$\beta = \sqrt{k_0^2 + \alpha^2} \approx k_0 + \frac{\alpha^2}{2k_0}$$

$$\epsilon''_h = \frac{2\alpha \sqrt{k_0^2 + \alpha^2}}{k_0^2} \approx \frac{2\alpha}{k_0} \quad (12)$$

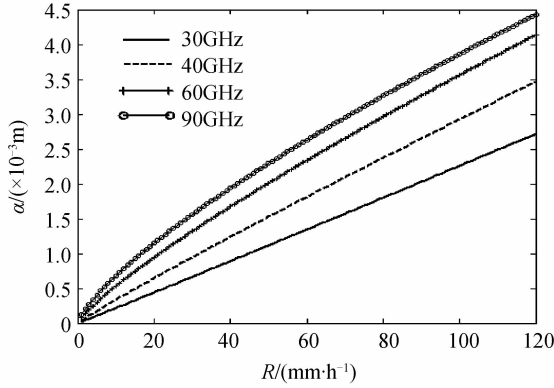


图1 衰减因子随降雨率的变化

Fig. 1 Change of attenuation factor with rainfall

以上结果表明:当降雨为零时,衰减因子 $\alpha=0$, 电磁波的传播因子 $\beta=k_0$, 证明了结果的正确性。

4 雨介质中目标的复合散射特性

设入射的单位平面电磁波沿 x 方向极化,沿 z 轴传播,即 $E = \hat{x} e^{-\alpha z} e^{-j(\beta z - \omega t)}$. 对于一般的目标而言,其大小在 0 到几百米的量级上,即 $\alpha z < 1$, 因此,在目标坐标系中入射波可以展为

$$E_x = e^{-j(\beta z - \omega t)} - \alpha z e^{-j(\beta z - \omega t)} \quad (13)$$

式(13)的第一项为平面电磁波,该平面波投射到半径为 R_0 的球体目标上时,其散射场称为一次散射场,具体的表达式为

$$E_{\theta_1}^s = \frac{j \cos \varphi}{r \beta^2} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n c_{n_1} \frac{\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)}{\partial r} \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} + \frac{\omega \mu_0 \cos \varphi}{r \eta_c \beta^2} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n d_{n_1} \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \quad (14)$$

$$E_{\varphi_1}^s = \frac{-j \sin \varphi}{r \beta^2} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n c_{n_1} \frac{\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)}{\partial r} \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} - \frac{\omega \mu_0 \sin \varphi}{r \eta_c \beta^2} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n d_{n_1} \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} \quad (15)$$

$$H_{\theta_1}^s = \frac{|k_c|^2 \sin \varphi}{r \mu_0 \omega \beta^2} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n c_{n_1} \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} + \frac{j \sin \varphi}{r \eta_c \beta^2} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n d_{n_1} \frac{\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)}{\partial r} \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} \quad (16)$$

$$H_{\varphi_1}^s = \frac{|k_c|^2 \cos \varphi}{r \mu_0 \omega \beta^2} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n c_{n_1} \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} + \frac{j \cos \varphi}{r \eta_c \beta^2} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n d_{n_1} \frac{\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)}{\partial r} \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \quad (17)$$

式中 $y_n = (2n+1)/n(n+1)$, η_c 为雨介质中的波阻抗,系数 c_{n_1} 、 d_{n_1} 为

$$c_{n_1} = \frac{cnfz_1}{cnfm_1}, \quad cnfz_1 = -(mk_0)^2 \hat{J}_n(mk_0 r) \frac{\partial \hat{J}_n(\beta r)}{\partial r} + |k_c|^2 \frac{\partial \hat{J}_n(mk_0 r)}{\partial r} \hat{J}_n(\beta r),$$

$$cnfm_1 = (mk_0)^2 \hat{J}_n(mk_0 r) \frac{\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)}{\partial r} - |k_c|^2 \frac{\partial \hat{J}_n(mk_0 r)}{\partial r} \hat{J}_n^{(2)}(\beta r), \quad d_{n_1} = \frac{dnfz}{dnfm},$$

$$dnfz_1 = \hat{J}_n(mk_0 r) \frac{\partial \hat{J}_n(\beta r)}{\partial r} - \frac{\partial \hat{J}_n(mk_0 r)}{\partial r} \hat{J}_n(\beta r), \quad dnfm_1 = -\hat{J}_n(mk_0 r) \frac{\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)}{\partial r} +$$

$$\frac{\partial \hat{J}_n(mk_0 r)}{\partial r} \hat{H}_n^{(2)}(\beta r).$$

式中 m 为目标相对折射率;当式(13)的第二项为非均匀平面电磁波,该平面波投射到球体目标上时,其散射场称为二次散射场,具体表达式为

$$E_{\theta_2}^s = \frac{\alpha \cos \varphi}{r \beta^3} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n c_{n_2} [\partial^2 \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} - \frac{j \omega \mu_0 \alpha \cos \varphi}{r \eta_c \beta^3} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n d_{n_2} [\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \quad (18)$$

$$E_{\varphi_2}^s = \frac{-\alpha \sin \varphi}{r \beta^3} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n c_{n_2} [\partial^2 \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} + \frac{j \omega \mu_0 \alpha \sin \varphi}{r \eta_c \beta^3} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n d_{n_2} [\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} \quad (19)$$

$$H_{\theta_2}^s = \frac{-j |k_c|^2 \alpha \sin \varphi}{r \omega \beta^3 \mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n c_{n_2} [\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} + \frac{\alpha \sin \varphi}{r \beta^3 \eta_c} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n d_{n_2} [\partial^2 \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} \quad (20)$$

$$H_{\varphi_2}^s = \frac{-j |k_c|^2 \alpha \cos \varphi}{r \omega \beta^3 \mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n c_{n_2} [\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] \frac{dP_n^1(\cos \theta)}{d\theta} + \frac{\alpha \cos \varphi}{r \beta^3 \eta_c} \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} y_n d_{n_2} [\partial^2 \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \quad (21)$$

式中

$$c_{n_2} = \frac{cnfz_2}{cnfm_2} \Big|_{r=R_0}$$

$$cnfz_2 = |k_c|^2 [\partial^2 \hat{J}_n(m)] [\partial \hat{J}_n(\beta)] - k_0^2 m^2 [\partial \hat{J}_n(m)] [\partial^2 \hat{J}_n(\beta)]$$

$$cnfm_2 = k_0^2 m^2 [\partial \hat{J}_n(m)] [\partial^2 \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] - |k_c|^2 [\partial^2 \hat{J}_n(m)] [\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta)]$$

$$d_{n_2} = \left. \frac{dnfz_2}{dnfm_2} \right|_{r=R_0}$$

$$dnfz_2 = -[\partial^2 \hat{J}_n(m)][\partial \hat{J}_n(\beta)] + [\partial \hat{J}_n(m)][\partial^2 \hat{J}_n(\beta)]$$

$$dnfm_2 = -[\partial \hat{J}_n(m)][\partial^2 \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] + [\partial^2 \hat{J}_n(m)][\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta)]$$

$$[\partial \hat{J}_n(\beta)] = \left[\beta \frac{\partial \hat{J}_n(\beta r)}{\partial \beta} - \hat{J}_n(\beta r) \right], [\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] = \left[\beta \frac{\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)}{\partial \beta} - \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \right], [\partial^2 \hat{J}_n(\beta)] =$$

$$\left[\beta \frac{\partial^2 \hat{J}_n(\beta r)}{\partial \beta \partial r} - \frac{\partial \hat{J}_n(\beta r)}{\partial r} \right], [\partial^2 \hat{H}_n^{(2)}(\beta)] = \left[\beta \frac{\partial^2 \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)}{\partial \beta \partial r} - \frac{\partial \hat{H}_n^{(2)}(\beta r)}{\partial r} \right]$$

由式(14)~(21)可以得到目标外的总散射场.

5 部分数值仿真结果与分析

本文以国际电讯联盟提供的降雨引起的电磁波衰减为准,在 GHz 波段,对半径 R_0 为 2 m,相对折射率 n 为 6 的球体目标在雨环境中的微分散射截面 σ_d 进行仿真.微分散射截面是指目标散射振幅绝对值的平方,其大小反映了目标散射的电磁波功率所观测位置的变化.对 σ_d 进行空间立体角积分可以获得目标的散射截面. σ_d 部分结果如下:当电磁波水平极化时,雨介质中目标的微分散射与自由空间目标微分散射之比随降雨率的衰减如图 2. 由图可以看出,在 GHz 波段,随着降雨的增强,微分散射在减小,衰减在 5×10^{-3} dB,随频率的变化呈非线性关系,与图 5 结果一致.图 3 中的观测方位与图 2 相同,垂直极化时降雨对散射的衰减较大,这是由于当电磁波垂直极化时,雨滴的下落方向与电磁波的极化在同一条线上,雨滴在极化方向上的运动使雨滴的极化增强,等效介电常量增大,从而引起较大的衰减.图 4 为 $f=60$ GHz,衰减常量 α 取为圆极化波时目标折射率与降雨率对散射的影响.由图可以看出:

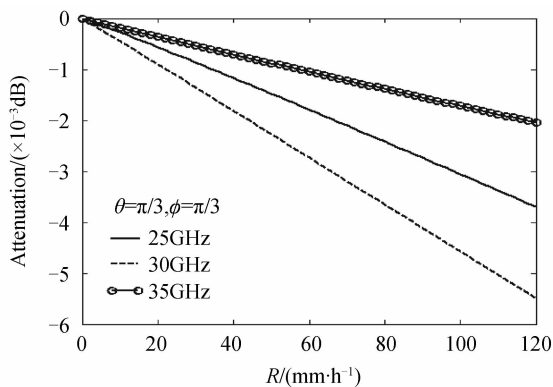


图 2 水平极化时微分散射随降雨率的衰减
Fig. 2 Attenuation differential scattering with rainfall illuminated by parallel polarization

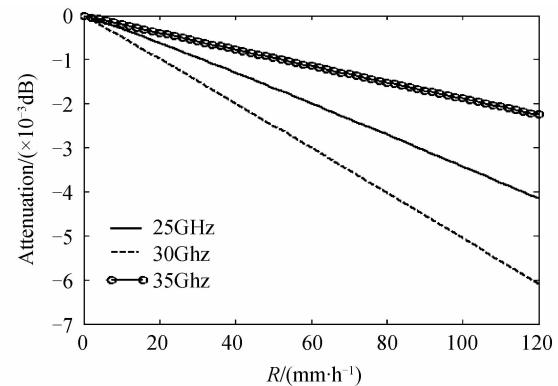


图 3 垂直极化时微分散射随降雨率的衰减
Fig. 3 Attenuation differential scattering with rainfall illuminated by vertical polarization

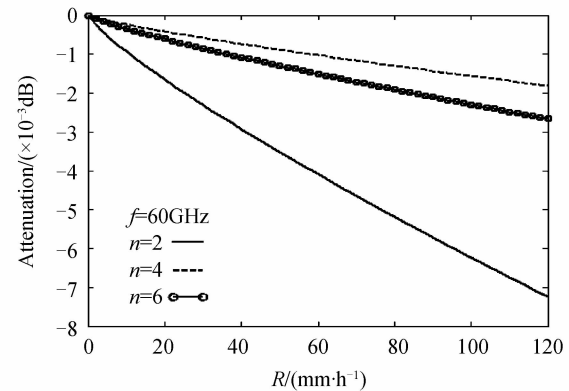


图 4 圆极化时微分散射与折射率的关系
Fig. 4 Relation of differential scattering and refractive index by circular polarization

目标折射率对散射的影响呈非线性关系,这是由于目标折射率的变化可以等效于电磁波频率的变化,所以,图 4 与图 2、图 3 实际上一致.当降雨率 $R=45$ mm/h,目标大小给定时,散射随频率的变化如图 5.由图可以看出:当频率 $f < 150$ GHz 时,散射随频率敏感的变化;当 $f > 150$ GHz 时,微分散射的衰减减小,散射随频率的增大趋于平稳,随着频率的升高,雨对电磁波的衰减增强,但散射随着频率的升高也在增强,它们达到了平衡.

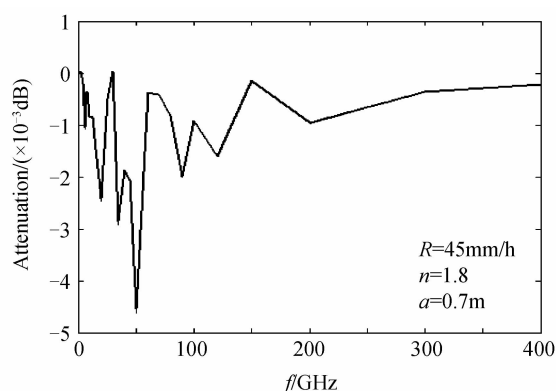


图5 圆极化时微分散射与频率的关系

Fig. 5 Relation of differential scattering and frequency by circular polarization

6 结论

本文从雨滴粒子的极化出发,得出了背景空间中离散粒子存在时混合体的等效介电常量模型,以该模型和 Weibull 雨滴谱分布为基础,提出了自由空间中降雨这一混合体的等效介电常量的可能的表达式.根据该表达式和国际电讯联盟给出的雨衰减测量数据,确定了降雨这一混合体在 GHz 波段的等效介电常量有效表达式、雨环境中平面电磁波的等效衰减因子和传播波数.在球坐标系中,用矢量磁位和矢量电位的径向分量研究了雨环境中任意球形介质目标的复合散射特性;得出了目标的一次、二次散射场,仿真计算了降雨率、电磁波频率及极化状态等因素对复合散射的影响.结果表明:降雨对微分散射的影响在 10^{-3} 分贝上,电磁波垂直极化时降雨的影响大于其水平极化时的影响;给定降雨率时,电磁波频率对微分散射的影响呈现出较复杂的非线性关系;当频率高于 150 GHz 时,这一影响趋于平稳,对精确制导等有一定的参考意义.

由于本文从国际电讯联盟给出的测量数据和理论出发得到了目标的复合散射特性,实际的雨环境是极其复杂的,受地理位置、气象条件等因素的影响,如何解决实际降雨环境中目标的复合散射有待进一步研究.

参考文献

- [1] LIU Peng, JIN Ya-qiu. Simulation with FEM for target bistatic scattering on rough surface with low-grazing angle [J]. *Science in China*, 2004, **34**(7): 793-803.
刘鹏,金亚秋.低掠角入射粗糙面上低空目标双站散射的有限元数值模拟[J]. *中国科学*, 2004, **34**(7): 793-803.
- [2] BILLINGSLEY J B. Measurements of L-band inland-water surface-clutter Doppler spectra [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, **34**(2): 378-390.
- [3] TOPORKOV J V, BROWN G. Numerical simulations of scattering from time-varying randomly rough surfaces [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(4): 1616-1625.
- [4] CHIU T, SARABANDI K. Electromagnetic scattering interaction between a dielectric cylinder and slightly rough surface [J]. *IEEE Transactions on Antenna Propagation*, 1999, **47**(5): 902-913.
- [5] PINO M R, LANDESA L, RODRIGUES J L, et al. The generalized forward-backward method for analyzing the scattering from targets on ocean-like rough surfaces [J]. *IEEE Transactions on Antenna Propagation*, 1999, **47**(6): 961-968.
- [6] LIU P, JIN Y Q. Numerical simulation of bistatic scattering from a target at low altitude above rough sea surface under an EM-Wave incidence at low grazing angle by using the finite element method [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **52**(5): 1205-1220.
- [7] LI L W, KOOI P S, LEONG M S, et al. Microwave attenuation by realistically distorted raindrops: Part I-Theory [J]. *IEEE Transactions on Antenna Propagation*, 1995, **43**(8): 811-821.
- [8] LI Ying-le, LI Jin, WANG Ming-jun, et al. THz scattering property for a magnetized cold plasma sphere [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 619-623.
李应乐,李瑾,王明军,等.磁化冷等离子体球的太赫兹散射特性[J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 619-623.
- [9] ITU. Recommendation P. 838-1: Specific attenuation model for rain for use in prediction method [R/OL]. (1999-10-01) [2012-09-13] <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-1-199910-S/en>.
- [10] LI Ying-le, HUANG Ji-ying. A model of equivalent dielectric constant for rain [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **32**(3): 378-381.
李应乐,黄际英.雨介质的等效介电常量模型[J]. *光子学报*, 2002, **32**(3): 378-381.
- [11] Akira Ishimaru. Wave propagation and scattering in random medium [M]. New York: Academic press, 1978, 27-30.
- [12] CAO Xian-ping, SUN Ping. Characteristics of degree of polarization of backscattering light in scattering medium at different wavelength [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 609-612.
曹先平,孙萍.不同波长的散射介质后向散射光偏振度特性[J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 609-612.
- [13] STRATTON J A. Electromagnetic theory [M]. New York: McGraw-Hill, 1941: 23-24.
- [14] YANG Yi-feng, YANG Hui, ZHENG Gang, et al. Backscattering spectroscopy for sizing spherical sub-micron particles [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1652-1656.
杨依枫,杨晖,郑刚,等.用于亚微米颗粒测量的后向散射光谱法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1652-1656.