

粒子跟踪法求毫米波雨衰减*

阎毅 卢宝骅

(西安电子科技大学物理系, 陕西, 西安, 710071)

摘要: 根据多重散射的解析理论, 利用粒子跟踪法研究了毫米波在离散随机介质中的传播与散射. 在考虑多重散射效应的情况下, 数值模拟了毫米波段的降雨衰减. 理论计算与实验结果^[1]相一致.

关键词: 毫米波传播, 多重散射, 粒子跟踪, 降雨衰减.

引言

随着毫米波系统工作频率逐渐提高, 在电磁波与随机介质的相互作用中, 多重散射的作用愈来愈重要^[2]. 研究多重散射效应的主要理论有输运理论和解析理论, 利用蒙特卡洛方法可严格地数值模拟电磁波在随机介质中的传播和散射. 由于多重散射的解析理论物理图像清楚, 包含了所有链式散射和返回散射项. 所以, 在毫米波段用蒙特卡洛方法对多重散射的解析理论进行数值求解, 不仅可以得到离散随机介质引起的同极化衰减, 还可以求出背景介质的后向散射对目标散射特性的影响.

我们从标量波动方程出发, 对各阶链式散射和返回散射, 采用毫米波粒子跟踪的方法, 数值模拟了毫米波段的降雨衰减, 所得结果与地面实验电路的测量结果一致.

1 理论分析

1.1 多重散射的解析理论

假设在厚度为 L 的介质层中, 随机分布着 N 个散射体, 分别位于 $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n$ 处 (见图 1), 当毫米波入射到介质层上时, 考虑层中某点 \vec{r}_a 处, 存在标量波函数 φ^a , 满足波动方程:

$$[\nabla^2 + K^2(1 + \epsilon_1)]\varphi^a = 0, \quad (1)$$

式中 $K^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \langle \epsilon_r \rangle = K_0^2 \langle \epsilon_r \rangle$ 是背景介质的波

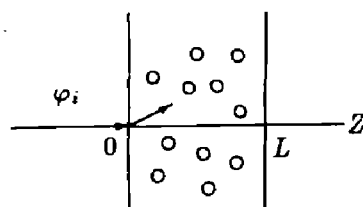


图1 毫米波入射厚度为 L 介质层示意图
Fig. 1 Millimeter wave incident on a medium slab of thickness L

本文 1992 年 6 月 16 日收到, 修改稿 1993 年 3 月 10 日收到.

* 国家自然科学基金资助项目.

数, ϵ_1 表示介质介电常数的随机起伏.

以算子 u_s^a 表示位于 \vec{r}_s 处的散射体对波的散射作用, 以 φ_i^s 表示 \vec{r}_s 处的直接入射波, 则

$$\varphi^a = \varphi_i^a + \sum_{s=1}^N u_s^a \varphi_i^s + \sum_{s=1}^N \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq s}}^N u_s^a u_t^s \varphi_i^t + \sum_{s=1}^N \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq s}}^N \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq t}}^N u_s^a u_t^s u_m^t \varphi_i^m + \dots, \quad (2)$$

式中右边第 1 项表示直接入射波, 第 2 项为经过其它散射体 1 次散射的波, 第 3 项为 2 次散射波, 第 4 项为 3 次散射波, 依次类推.

第 4 项可以改写为

$$\sum_{s=1}^N \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq s}}^N \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq t}}^N u_s^a u_t^s u_m^t \varphi_i^m = \sum_{s=1}^N \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq s}}^N \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq t \\ m \neq s}}^N u_s^a u_t^s u_m^t \varphi_i^m + \sum_{s=1}^N \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq s}}^N u_s^a u_t^s u_s^t \varphi_i^s, \quad (3)$$

式 (3) 中右边第 1 项表示不同散射体依次散射的结果, 即链式散射项; 第 2 项含有同一散射体的重复散射的贡献, 即返回散射项. Foldy-Twersky 积分方程忽略了返回散射的贡献, 只在小角度散射近似下方能得到精确的结果^[3]. 而用粒子跟踪法, 可以直接从式 (2) 出发, 考虑各阶链式散射和返回散射的贡献, 严格地模拟毫米波在离散随机介质层中的传播与散射.

1.2 粒子跟踪法

对毫米波通过离散随机介质层 (例如雨、雪、沙尘等) 引起的衰减研究时, 可以将入射波考虑成一束波粒子. 进入介质层后, 波粒子在介质空间中传播或与散射体碰撞而发生散射和吸收. 假设不考虑非线性效应, 则波粒子与散射体的碰撞不改变入射波的频率. 以波粒子经过 m 次空间传播和散射后的状态序列 $\{s_l\} (l = 0, 1, \dots, m)$ 构成样本空间, 则波粒子在介质空间中传播和散射后到达相空间点 s 是由 $m (m = 0, 1, \dots, N)$ 个互斥作用构成, 其概率由全概率公式写成

$$P(s) = \sum_{m=0}^N P_m(s), \quad (4)$$

式 (4) 中 $P_m(s)$ 为波粒子经过 m 次空间传播或散射后到达相空间点 s 的概率. 由于波粒子在介质层中的随机游动过程是一种马尔科夫过程^[4], 作为任意现象有:

$$P_m(s) = P(s_0)P(s_1/s_0) \cdots P(s/s_{m-1}), \quad (5)$$

式 (5) 中 $P(s_l/s_{l-1})$ 表示波粒子从相空间点 s_{l-1} 经传播或散射后到达 s_l 的概率, 它对应于式 (2) 中散射项 $u_{l-1}^l \varphi_i^{l-1}$.

取估计函数为^[4]

$$P_t = \sum_{m=0}^{\infty} P_m = \sum_{m=0}^{\infty} W_m \exp \left[-C_t(\alpha_m) \frac{L - Z_m}{\cos \theta_m} \right] \eta(\cos \theta_m) \prod_{l=1}^m \eta(L - Z_l) \eta(Z_l), \quad (6)$$

作为波粒子透射率的无偏估计, 其中权函数

$$W_m = W_{m-1} \exp \left[-C_\alpha(\alpha_{n-1}) \left| \frac{Z_m - Z_{m-1}}{\cos \theta_{m-1}} \right| \right], \quad (7)$$

$w_0 = 1$ 为波粒子的初始权重, $C_t(\alpha_l)$ 和 $C_a(\alpha_l)$ 分别是尺寸为 α_l 的单个散射体的衰减截面、吸收截面与数密度的乘积, θ_i 表示第 i 次碰撞时波粒子散射方向与 z 轴的夹角, 函数

$$\eta(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0, \\ 0, & x > 0; \end{cases} \quad (8)$$

若跟踪 M 个波粒子, 则平均透射率为

$$T = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^N P_t. \quad (9)$$

对每个波粒子, 跟踪其散射方向和所在位置, 其步骤如下: (1) 模拟波粒子与散射体的碰撞情况, 确定散射体的衰减截面、散射截面和不对称因子. (2) 进行波粒子传播距离的抽样. (3) 进行波粒子散射方向的抽样. (4) 跟踪波粒子所在位置. (5) 检验波粒子是否从介质层中逸出或被吸收. 当波粒子所在位置 $z > L$ 和 $z < 0$ 时, 波粒子从介质层中逸出, 则对该波粒子的跟踪过程完成; 当权函数 W_m 小于波粒子的临界生存概率时, 认为波粒子被吸收, 对该波粒子的跟踪过程结束. 然后按上述步骤重新跟踪下一个波粒子.

2 计算结果与讨论

我们用粒子跟踪法研究了毫米波通过雨区传播时, 降雨引起的同极化衰减. 图 2 为理论计算结果与测量数据的比较. 图中实线为考虑各阶链式散射和返回散射时, 粒子跟踪法计算得到的降雨衰减; 实点为文献 [1] 给出的路径长度为 0.81 km, 系统工作频率分别

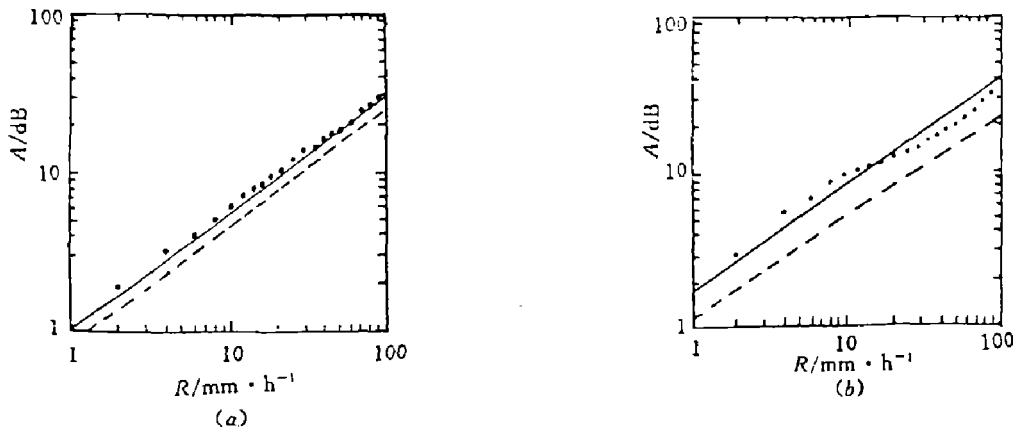


图 2 雨衰减随雨强的变化

(a) $f = 81.8$ GHz; (b) $f = 245.5$ GHz

Fig. 2 Relationship between rain induced attenuation and rain rate for 81.8 GHz (a) and 245.5 GHz (b)

为 81.8 GHz 和 245.5 GHz 的地面实验电路的测量结果;虚线为 CCIR 推荐的基于单次散射近似的雨衰减公式^[5]的计算值.由图 2 可见,粒子跟踪法求得的衰减与测量数据符合得较好,而单次散射解与测量结果的差异较大.单次散射解对衰减估计不足,这是因为它忽略了多重散射和返回散射,在毫米波段误差较大.从图中还可见,在一定的系统工作频率下,随着雨强的增大,单次散射解与粒子跟踪法结果的差异逐渐增大;对给定的雨强,随着系统工作频率的升高,粒子跟踪法结果比单次散射解更接近测量值.这是因为随着雨强增大和频率升高,多重散射和返回散射的作用逐渐增强.因此,在毫米波段,多重散射效应不容忽略.用粒子跟踪法可以严格求解各种离散随机介质中的波传播问题,可得到介质引起的衰减和后向散射的反射值.

参考文献

- 1 Manabe T, Ihava T *et al.* *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1987;**35**(11):1326
- 2 Oguchi T. *Radio Sci.*, 1981;**16**(5):691
- 3 Ishimaru A. *Wave Propagation and Scattering in Random Media, Vol. 2* New York: Academic, 1978, p.258
- 4 裴鹿成, 张孝泽. 蒙特卡洛方法及其在粒子输运问题中应用, 北京: 科学出版社, 1980
- 5 CCIR Rep. 721-1, *Reports and Recommendations of CCIR*, International Telecommunication Union, 1982

THE RAIN INDUCED ATTENUATION CALCULATED BY THE PARTICLE-TRACKING METHOD AT MILLIMETER WAVE BAND*

YAN YI, LU BAOHUA

(*Department of Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*)

Abstract: Based on the analytical theory of multiple scattering, the millimeter wave propagation and scattering in discrete random media were investigated by means of the particle-tracking method. Considering the effect of multiple scattering, the rain induced attenuation at millimeter wave frequencies was simulated numerically. The theoretical calculations are in good agreement with the experimental results of the earlier paper by Manabe T *et al.*

Key words: millimeter wave propagation, multiple scattering, particle-tracking, rain-induced attenuation.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China.