

雨滴的衰落截面模型和参数估计

李应乐^{1,2}, 黄际英¹

(1. 西安电子科技大学理学院 273 信箱, 陕西西安 710071; 2. 咸阳师范学院物理系, 陕西咸阳 712000)

摘要: 以国际无线电协会推荐的雨衰公式和 Weibull 雨滴谱为基础, 得出了雨滴衰减截面的统计模型, 模型具有简单实用的特点; 由模型所得结果、结论与有关文献完全一致。

关键词: 衰减截面; 模型; 系统辨识; 雨滴谱

中图分类号: O454 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2004)03-0505-03

The Model of Attenuation Cross Section for Raindrops and Estimation of the Parameters

LI Ying-le^{1,2}, HUANG Ji-ying¹

(1. Box 273, Xi'an University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Department of Physics, Xi'an Yang Teacher's College, Xi'an, Shaanxi 712000, China)

Abstract: The models of attenuation cross section for raindrops are presented based on Weibull raindrops' spectrum and the formula of ITU-R. The incoming models have the characteristic of briefness and utility. The results and conclusions obtained with the models are in good agreement with the references.

Key words: attenuation cross section, modes, system identification, raindrops' spectrum

1 引言

当电波在随机介质系统如降雨、沙尘暴等所形成的介质系统等传播时会受到严重的衰减,引起电波的交叉极化,在毫米波段,降雨的这种影响尤为严重;在降雨率一定的情况下,毫米波的衰减主要由两个因素决定^[2-6]:雨滴的衰减截面和尺寸分布,关于雨滴的尺寸分布已有不少文献报道,得出了较为一致的结论;因此,对雨滴衰减截面的研究十分重要;Mie从理论上得到了各向同性的均匀介质球体对平面电磁波散射的准确解;雨滴的介电常数和形状受气象条件的影响,其介电常数严格地来讲应是一个随机量,其形状也不是球体形状,显然,Mie理论只能用来近似的研究雨滴对电磁波的衰减,没有考虑雨滴对电磁波的多次散射效应;Rayleigh^[7]研究了粒子的尺寸远小于工作波长时的小粒子散射特性,发现散射特性由粒子的介电常数、等效球体积和频率决定;然而,毫米波的波长和粒子的尺寸相比一般不满足 Rayleigh 近似条件,如雨滴的半径在 3 毫米左右,所以用 Rayleigh 散射研究降雨对毫米波的影响必然产生较大的误差。文献[3]利用体积方程研究了椭球粒子对电磁波的散射;大气中悬浮的随机粒子由于受气象因素的影响,其形状一般类似于椭球形状;文献[1]给出了适用于 0.6~100GHz 的衰减截面的一个经验公式,具有实际应用价值,不但公式中所包含的参数较多,而且还要求出

雨滴的平均半径。由此可见,以上所述的方法所得到的雨滴的散射特性及衰减截面受各种因素的限制,结果的普遍性受到的限制,而且表达式复杂,不便于工程应用;因此,得到普遍适用的、形式简单的雨滴衰减面,将具有理论意义和工程应用价值;本文首先建立随机雨滴衰减面的系统模型,得到模型的有关参数;将所得结果与有关实测数据或文献进行比较,说明所得模型的正确性。

2 雨滴衰减截面的系统模型

2.1 衰减截面结构的确定

从电磁理论可知,在频率一定的情况下,目标的散射截面应是其尺寸的线性函数;因此,我们假设雨滴的衰减截面与雨滴直径的统计关系为

$$Q_t(D) = a_1 D^3 + a_2 D^2 + a_3 D \quad (2a)$$

上式中的雨滴直径以米为单位,由于雨滴的直径为零时对电磁波不产生衰减,所以式(2)中没有常数项;其高阶项反映了小雨滴对电波的散射,但计算结果表明:式(2)取后两项已能够准确地反映衰减截面与直径的统计关系,而且公式简单;理论上,当雨滴的直径趋于 0 时(即 Rayleigh 近似),雨滴的衰减截面应与雨滴直径的三次方成正比,但体积特别小的雨滴非常少,对衰减的贡献可忽略不计;式(2)是统计意义上的表达式。故本文采用雨滴的衰减截面表达式:

$$Q_i(D) = a_1 D^2 + a_2 D \quad (2b)$$

其中 a_1, a_2 是电磁波频率的函数。

2.2 衰减截面的系统模型

众所周知, 雨介质中电磁波的衰减与衰减截面的关系为:

$$A \text{ (dB/km)} = 4.343 \int_0^{\infty} n(D) Q_i(D) dD \quad (3)$$

将式(3)离散化, 考虑到雨滴的最大直径不会超过 12 毫米, 将式(2b)代入其中得衰减率为

$$A = 4.343 \nabla D [a_1 (\nabla D) D_1^2 + D_2^2 n_2 (2 \nabla D) + \dots + D_k^2 n_k (k \nabla D) + a_2 (n_1 (\nabla D) D_1 + D_2 n_2 (2 \nabla D) + \dots + D_k n_k (k \nabla D))] + \zeta$$

上式中 k 表示直径的间隔数目, ∇D 为直径间隔, ζ 代表误差, $n_i (i \nabla D)$ 为 Weibull 雨滴谱, 是降雨率的函数; 将上式在不同的降雨率 R_1, R_2, \dots, R_m 取值后, 可写成最小二乘格式

$$Z = \Phi \Theta + \zeta \quad (4)$$

其中

$$z = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix}$$

$$\Phi = 4.343 \Delta D \bullet$$

$$\begin{bmatrix} n_{11} D_1^2 + D_2^2 n_{12} + \dots + D_k^2 n_{1k} & n_{11} D_1 + D_2 n_{12} + \dots + D_k n_{1k} \\ n_{21} D_1^2 + D_2^2 n_{22} + \dots + D_k^2 n_{2k} & n_{21} D_1 + D_2 n_{22} + \dots + D_k n_{2k} \\ \vdots & \vdots \\ n_{m1} D_1^2 + D_2^2 n_{m2} + \dots + D_k^2 n_{mk} & n_{m1} D_1 + D_2 n_{m2} + \dots + D_k n_{mk} \end{bmatrix}$$

$$\zeta = \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \vdots \\ \zeta_m \end{bmatrix}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

式(4)的最小二乘解为^[9]

$$\Theta = (\Phi \Phi)^{-1} \Phi Z \quad (5)$$

利用文献[8]的结果和式(5), 可得各频率点的雨滴的衰减截面的统计参数。

2.3 衰减截面的数值仿真

雨滴的直径在 0~12 毫米之间, 将其分为 48 等份, 以 Weibull 雨滴谱为基础, 应用式(5)可得各个频率点的衰减截面参数。计算表明: 雨滴的水平衰减截面与垂直衰减截面略有不同, 所以当电磁波在其中传播时, 会引起交叉极化, 以上参数是从雨滴对电磁波的衰减中获得的, 具有统计意义; 事实上, 利用式(5)还可以获得电磁波任意极化时的等效衰减截面; 仿真结果表明: 在 1~150GHz 的范围内, 式(5)所得的雨滴衰减截面不但适用于 Weibull 雨滴谱计算雨衰减, 而且适用于其它雨滴谱如 Gamma 雨滴谱计算雨衰减, 如图 1 所示。由此可知, 在降雨率小于 100mm/h 时, 不论是采用 Weibull 雨滴谱还是 Gamma 雨滴谱, 模型所得结果与文献基本一致。

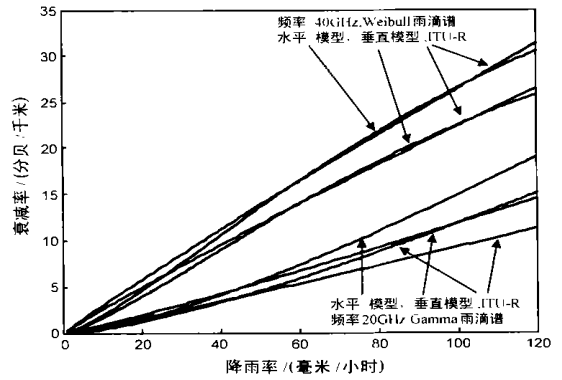


图1 基于 Weibull 雨滴谱、Gamma 雨滴谱的模型比较

3 模型的进一步改进

模型(2b)中的系数应该是电磁波频率的函数; 为此, 可进一步将各种频率下所得系数 a_1, a_2 分别作为系统的输出, 将以 GHz 为单位的频率变量 f^2, f, f^0 作为它的输入变量(待辨识的参数变为 6 个), 可得衰减截面的改进模型(电波水平极化)

$$Q(D) = (0.006 f^2 - 1.6015 f + 10.548) D^2 + (-1.8215 \times 10^{-5} f^2 + 0.0044 f - 0.0235) D \quad (7)$$

同理可得当电磁波垂直极化时

$$Q(D) = (0.005 f^2 - 1.4342 f + 9.6958) D^2 + (-1.5014 \times 10^{-5} f^2 + 0.0040 f - 0.0225) D \quad (8)$$

式(8)、(9)就是我们所得到的毫米波段雨滴等效衰减截面; 应该指出的是: 以上两式是在电磁波沿水平方向传播时的雨滴等效衰减截面, 当电波水平传播沿任意方向极化时, 雨滴的等效衰减截面应介于式(7)、(8)之间。只要将电磁波沿任意方向传播时的衰减结果代入式(5), 重复以上方法, 还可以得到电波任意方向传播的雨滴等效衰减截面, 此不赘述。将式(7)、(8)代入式(3)可得毫米波段降雨对电磁波的衰减并与国际无线电协会推荐的结果进行比较, 如图 2 所示: 对应的频率为 70GHz; 文献[7]将降雨分为: 毛毛雨、大雨—16mm/h 等, 由此可见, 在小雨到大雨的范围, 模型所得结果与 ITU-R 所得结果完全一致, 在暴雨时, 模型所得结果略大于 ITU-R 的结果, 但能够满足实际问题的需要。

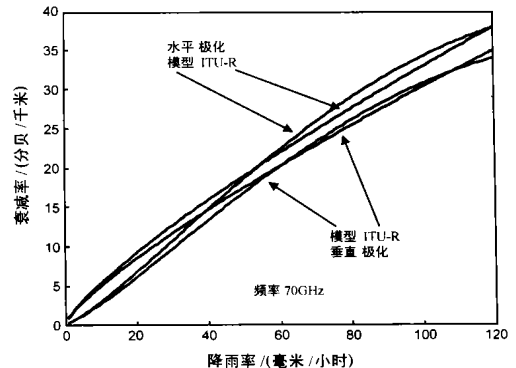


图2 模型(7)、(8)所得衰减随降雨率的变化

4 结论

本章基于 Weibull 雨滴谱, 利用现有的文献建立了雨滴衰减截面的系统模型, 利用最小二乘法和共扼梯度法对提出的模型参数进行了仿真估计; 首先得出了各频率点 (12~150GHz) 的模型衰减截面参数, 将模型代入降雨引起的衰减公式和国际无线电协会推荐的结果进行了比较, 发现本文所得模型能够满足工程实际的需要, 具有统计意义. 将模型衰减截面和 Mie 理论所得的衰减截面进行了比较, 发现 Weibull 雨滴对小雨滴的数量估计偏低, Gamma 雨滴谱对大雨滴数量的估计过高, 和有关文献的报道完全一致, 具有结构简单的特点; 由于测量数据已考虑了电波的多次散射效应及当地的气象条件等因素, 故所得模型已考虑了这些因素. 不但适用于 Weibull 雨滴谱, 而且还适用于其它的雨滴谱; 由此可见, 模型具有较为普遍的适应性和实用性, 所用方法为研究其它随机粒子的衰减截面做了有益的尝试.

参考文献:

- [1] Der Phone Lin, Hsing Yi Chen. An empirical formula for the prediction of rain attenuation in frequency range 0.6- 100GHz [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 2002, 50(4): 545- 551.
- [2] Yingle Li, Jiyang Huang. Rain attenuation at millimeter wavelengths [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 23(7): 1119- 1126.
- [3] 杨瑞科, 等. 雨滴谱及对毫米波的雨衰减与降雨去极化 [J]. 光子学报, 1998, 27(Z3): 143- 146
- [4] S O Ajoze, M N O Sadiku, U Goni. Computation of attenuation, phase rotation, and cross polarization of radio waves due to rainfall in tropical region [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1995, 43(1): 1- 5.

- [5] L W Li, P S Kooi, et al. Microwave attenuation by realistically distorted raindrops: Part F Theory [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1995, 43(8): 811- 821.
- [6] 黄际英, 王一平. 应用 Weibull 分布计算毫米波降雨去极化 [J]. 电子学报, 1993, 21(12): 90- 96.
- [7] Akira Ishimaru. Wave propagation and scattering in random medium [M]. Part I, New York: Academic press, 1978. 27- 30.
- [8] Recommendation IT-R, P 838-1. Specific Attenuation Model For Rain For Use in Prediction Methods [S].
- [9] 夏天长. 系统辨识最小二乘法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1983. 75- 79.

作者简介:



李应乐 男, 1961 年生于陕西西安, 副教授, 现为西安电子科技大学博士研究生, 研究兴趣: 毫米波与随机介质的相互作用.



黄际英 女, 1939 年生于江西南昌, 西安电子科技大学物理系教授, 博士生导师, 中国电子学会会员; 主要从事电波传播散射等方面研究.