

预测毫米波雾衰减的抛物方程模型研究

盛楠¹, 廖成¹, 张青洪¹, 陈伶俐¹, 周海京²

(1. 西南交通大学电磁场与微波技术研究所, 四川成都 610031; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘要: 雾是影响毫米波通信系统性能的典型气象条件之一. 针对传统经验模型无法精确预测多径效应下的电波传播问题, 给出了基于抛物方程的雾衰减预测模型. 以自由空间雾特征衰减的预测为例, 将本文模型与 Rayleigh 近似及经验模型的计算结果进行对比, 验证了该方法的可靠性. 最后将该模型应用于预测 35 GHz 和 94 GHz 毫米波在分别含有平流雾和辐射雾的复杂环境中的传播特性, 仿真结果表明该模型有效地反映了地形绕射、地表反射等对电波传播的影响, 为快速准确地预测复杂地理环境及特殊气象条件下的电波传播特性提供了一种有效的预测模型.

关键词: 抛物方程; 雾衰减; 复杂环境; 毫米波

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2014)05-0958-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.05.019

The Parabolic Equation Model for Estimating Fog Attenuation at Millimeter Wavelengths

SHENG Nan¹, LIAO Cheng¹, ZHANG Qing-hong¹, CHEN Ling-lu¹, ZHOU Hai-jing²

(1. Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: Fog is one of the crucial factors in determining the performance of millimeter-wave communication systems. Because of the fact that the multipath propagation is not be taken into account by the traditional empirical formulae, this paper developed a parabolic equation model for estimating fog attenuation. The fog attenuation rate predicted by the model agrees well with that obtained by the Rayleigh approximation and an empirical formula, which verify the accuracy of our method. Finally, the model is applied to simulate the propagation characteristics of millimeter-wave at frequency of 35 GHz and 94 GHz in Advection fog and Radiation fog with complex environments, respectively. The results demonstrate that the model can take account of wave diffraction and reflection, and thus our scheme provides an efficient numerical method for computation of the propagation characteristics of millimeter-wave in complex environments.

Key words: parabolic equation; fog attenuation; complex environment; millimeter wave

1 引言

随着无线通信技术的迅速发展,毫米波在通信、雷达、成像、遥感等领域得到了广泛的应用^[1-4]. 由于毫米波的波长较短,使其在传播过程中容易受到各种特殊气象条件的影响,其中雾是影响毫米波通信系统性能的典型气象条件之一.

雾是由悬浮在近地面大气中的微小水滴或冰晶形成的一种胶体系统,通常水平能见度小于 1 km. 由于雾滴的吸收和散射作用,使电磁波产生衰减. 观测表明,海雾对 3mm 波信号的衰减最大可达 7.55dB/km,相当于一

场中雨的衰减量^[5]. 因此研究雾对毫米波的传播影响具有重要意义.

以往对毫米波雾衰减的计算多采用经验模型^[5-8], 然而经验模型无法精确预测电波的多径传播特性. 抛物方程 (Parabolic Equation, PE)^[9] 作为一种有效的电波传播损耗高效预测模型,其本身就能体现电波传播的折射和绕射效应,而不需要引入额外的修正传播机制;抛物方程的数值求解可采用分步傅里叶变换 (Split-step Fourier transform, SSFT) 快速算法,可以得到公里级的大区域空间的场分布. 近年来,抛物方程方法得到国内外学者的广泛关注和研究^[10-16]. 而对预测雾衰减的抛物方程模

型的研究,目前还未见文献报道。

2 抛物方程模型

直角坐标系中,设电磁场的时谐因子为 $e^{-i\omega t}$,以标量 u 表示与 y 方向无关的任一电磁场分量,在电波传播过程中,若只考虑电波的向前传播,则由二维标量亥姆霍兹方程可以得到如下形式的宽角抛物方程(Wide-Angle Parabolic Equation, WAPE)^[9]

$$\frac{\partial u}{\partial x} = ik_0 \left[\sqrt{\frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + 1 + n - 1} \right] u = 0 \quad (1)$$

$k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的传播常数; $n = \sqrt{\epsilon_r}$ 为媒质的折射率, ϵ_r 为媒质的相对介电常数. 式(1)为平地球 WAPE 模型,若考虑地球球面曲率的影响,则需引入修正折射率参数

$$\tilde{n} = n \left(1 + \frac{z}{R} \right) \quad (2)$$

R 为地球半径; z/R 对应于地球球面曲率. WAPE 的数值求解方法主要有 SSFT 法和有限差分法. 其中 SSFT 解法采用快速傅里叶变换结合步进方法,且其空间步长几乎不受波长的限制,非常适合求解大尺度范围内的电波传播问题. SSFT 解的形式为^[16]

$$u(x + \Delta x, z) = e^{ik_0 \Delta x (n-1)} \mathfrak{F}^{-1} \left[e^{i\Delta x \sqrt{k_0^2 - p^2}} \mathfrak{F}(u(x, z)) \right] \quad (3)$$

式中: \mathfrak{F} 、 \mathfrak{F}^{-1} 分别表示傅里叶正变换和逆变换; $p = k_0 \sin \alpha$ 为傅里叶变换的频域变量, α 为电波的掠射角.

式(3)右边第 1 个指数项反映了不同媒质对电波传播的影响,因此,用雾媒质的等效介电常数对 PE 模型的折射项进行修正,即可考虑电波传播的雾衰减特性.

3 雾媒质的电磁建模

对雾媒质的电磁建模,可将雾媒质等效为雾滴与空气形成的混合物. 当温度高于 $-18 \sim -20^\circ\text{C}$ 时,雾多半是由水滴组成,且雾滴直径为 $0.001 \sim 0.1\text{mm}$,由于雾滴尺度很小,一般认为其形状为球形,因此可利用 Maxwell-Garnett 公式计算雾媒质的等效介电常数^[17]

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_0 + \frac{3f\epsilon_0(\epsilon_w - \epsilon_0)/(\epsilon_w + 2\epsilon_0)}{1 - f(\epsilon_w - \epsilon_0)/(\epsilon_w + 2\epsilon_0)} \quad (4)$$

式中: ϵ_0 为背景媒质即空气的介电常数; ϵ_w 为雾滴即水的介电常数,可由双 Debye 公式求解^[18]; f 为雾滴的体积浓度. 由式可以看出,雾媒质的等效介电常数与雾滴谱分布无关.

根据形成雾的地域和机理,可把雾分成两大类:平流雾和辐射雾. 平流雾是暖的空气移到冷的下垫面时形成的雾,海雾通常为平流雾;辐射雾主要是由于地面辐射冷却造成的,内陆雾通常为辐射雾. 雾的含水量 W

(g/m^3) 和能见度 $V(\text{km})$ 的可用经验公式表示^[5]:

$$\text{平流雾: } W = (18.35V)^{-1.43} = 0.0156V^{-1.43} \quad (5)$$

$$\text{辐射雾: } W = (42.0V)^{-1.54} = 0.00316V^{-1.54} \quad (6)$$

因此,根据雾的能见度可计算其含水量,从而得到雾滴的体积浓度 f ,利用式即可求得雾媒质的等效介电常数. 图 1~2 显示了温度为 0°C 和 10°C 、能见度分别为 30m 和 100m 时,平流雾与辐射雾的等效介电常数随电波频率的变化曲线. 需要指出的是,为了更清楚地显示雾媒质等效介电常数随频率的变化情况,图 2 中等效介电常数的实部是雾媒质与空气的差值,即 $\text{Re}(\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_0)$. 从图 1~2 中可以看出,雾媒质的等效介电常数虚部随频率的增加逐渐增大,频率在 100GHz 以上时趋于稳定;而实部在 $10 \sim 30\text{GHz}$ 频率范围内变化不明显,至 30GHz 以上时,实部随着频率的增加而减小;等效介电常数随温度的变化较小,这种现象是由于温度主要影响雾滴的电磁参数所致.

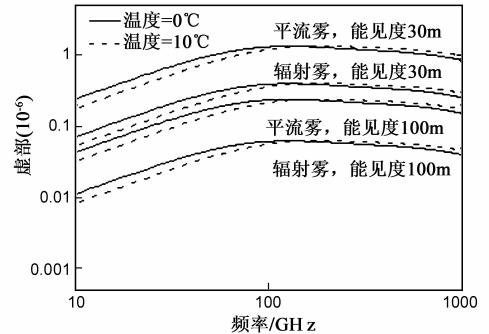


图1 雾媒质的等效介电常数虚部

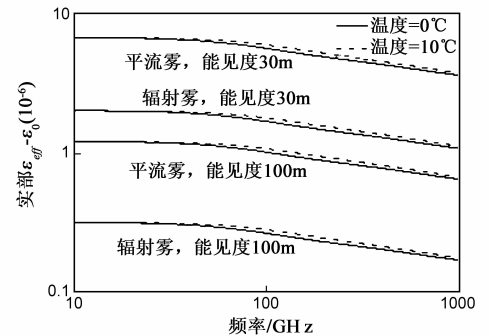


图2 雾媒质的等效介电常数实部

4 模型正确性验证

利用雾媒质的等效介电常数对空间折射率进行修正,即可应用 PE 模型预测其中的电波传播特性. 在自由空间中利用 PE 模型计算的雾特征衰减与 Rayleigh 近似及经验模型^[6]计算结果的对比如图 3、4 所示. 图 3 显示了频率为 35GHz , 温度为 10°C 时,平流雾与辐射雾特征衰减率随能见度变化曲线;图 4 显示了能见度为 100m , 温度为 10°C 时,平流雾与辐射雾特征衰减率随频

率变化曲线.

PE 模型的计算结果与 Rayleigh 近似及经验模型具有较好的吻合(见图 3~4),这表明应用 PE 模型计算雾衰减的方法是可靠的;同时从图 3~4 可以看出,由于含水量的减少,雾媒质的特征衰减随能见度的增加迅速减小;而随着频率的增加,特征衰减逐渐增大;在相同能见度情况下,由于平流雾的雾滴尺寸大于辐射雾,因此其含水量较多,对同频率的电磁波衰减较辐射雾要高出近一个数量级.

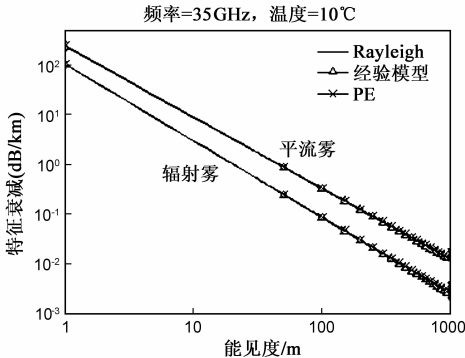


图3 雾特征衰减随能见度的变化

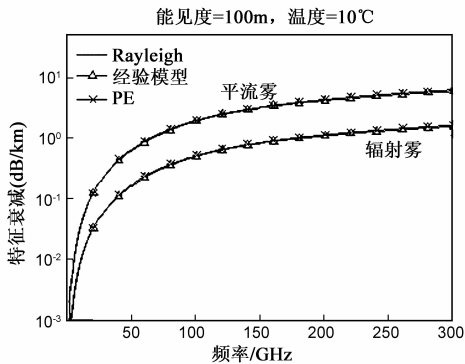


图4 雾特征衰减随频率的变化

5 复杂环境中雾衰减的仿真实验与结果分析

5.1 粗糙海面上的平流雾衰减

本算例应用 PE 模型仿真了含有平流雾的粗糙海面上的电波传播特性,其中平流雾能见度为 100m,且在空间均匀分布,海面风速为 3m/s,温度为 10°C.发射天线的高度为 20m,水平极化方式,高斯方向图的 3dB 宽度为 3°.图 5、6 分别为 35GHz 和 94GHz 毫米波在平流雾与标准大气环境中的传播损耗随高度变化的曲线,其中接收点距发射天线 20km.

从图 5~6 可以看出 PE 模拟结果考虑了粗糙海面的反射效应,与标准大气环境相比:(1)平流雾中的传播损耗明显增加,其中 35GHz 最大雾衰减约为 6dB(见图 5),94GHz 最大雾衰减达到 35dB 左右(见图 6);(2)平

流雾中电波相干波瓣变宽,相应的波峰高度增加,当频率为 35GHz 时,近海面的第一个波峰距海面 10m,比标准大气环境中高 3m 左右;当频率为 94GHz 时,近海面的第一个波峰距海面 6m,比标准大气环境中高 2m 左右.

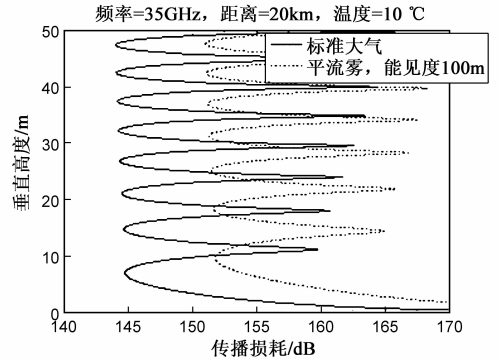


图5 35 GHz毫米波在粗糙海面环境中的传播损耗随高度变化曲线

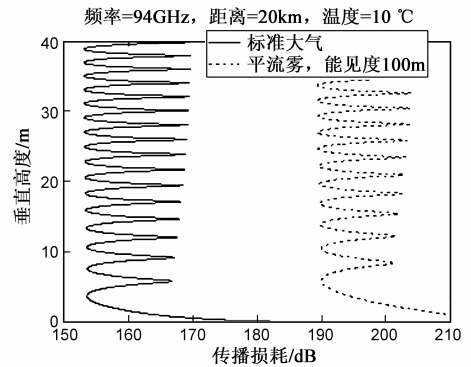


图6 94 GHz毫米波在粗糙海面环境中的传播损耗随高度变化曲线

5.2 复杂地理环境中的辐射雾衰减

仿真的复杂地理环境如图 7 所示(35GHz 毫米波传播损耗覆盖图).地表是中等干燥地面,温度为 10°C,发射天线高度为 50m,水平极化方式,高斯方向图的 3dB 宽度为 1°.可以看出 PE 模型本身体现了障碍物的绕射效应.图 8、9 分别为 35GHz 和 94GHz 毫米波在辐射雾和

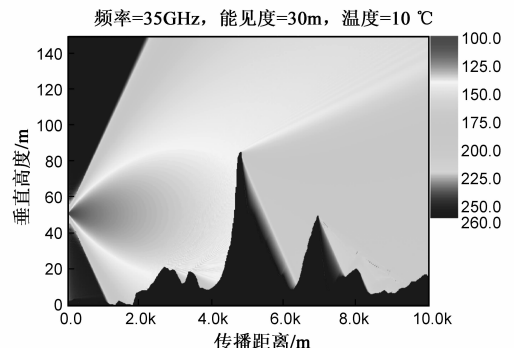


图7 复杂地理环境(35 GHz毫米波传播损耗覆盖图)

标准大气环境中的传播损耗随高度变化的曲线,其中辐射雾的能见度为 30m,且在空间均匀分布,接收点距发射天线 10km.由于地形的遮挡作用,阴影区的衰减很大;与标准大气环境相比:(1)辐射雾中的传播损耗增大,其中 35GHz 最大雾衰减约为 6dB,94GHz 最大雾衰减为 30dB 左右;(2)辐射雾中电波相干波瓣变宽,相应的波峰高度增加.

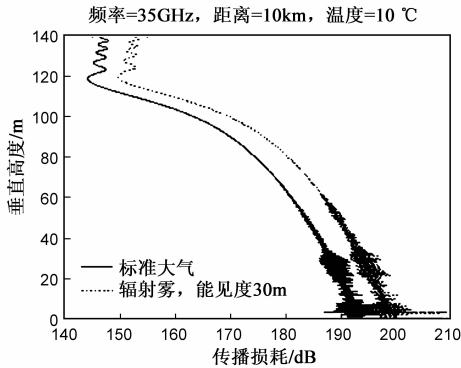


图8 35 GHz毫米波在复杂地理环境中的传播损耗随高度变化曲线

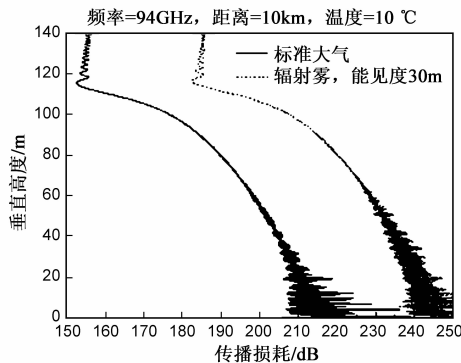


图9 94 GHz毫米波在复杂地理环境中的传播损耗随高度变化曲线

6 结论

雾环境是影响毫米波通信系统性能的重要因素之一.本文利用 Maxwell-Garnett 公式求解了雾媒质的等效介电常数,给出了预测复杂环境中雾衰减的抛物方程模型.采用该模型仿真分析了 35 GHz 和 94 GHz 毫米波在含有平流雾的粗糙海面和含有辐射雾的复杂陆地环境中的传播特性,仿真结果表明:(1)与标准大气环境中相比,平流雾和辐射雾对毫米波都产生较大的衰减作用,同时电波的相干波瓣变宽,波峰位置向上偏移.因此,为准确预测毫米波电波传播特性,雾是必须考虑的重要因素;(2)该方法能同时处理复杂地理环境和雾媒质对电波传播的影响,适用于求解大尺度复杂场景中的雾衰减问题.

本文给出的雾衰减抛物方程模型克服了经验模型不能处理地形绕射、地表反射等缺点,为快速准确地计算复杂地理环境及特殊气象条件中的电波传播特性提供了一种有效的预测模型.下一步的工作重点是在考虑粒子多重散射的基础上,对降雨、沙尘暴等恶劣气象条件的抛物方程模型展开研究.

参考文献

- [1] Nacer C, Maxim Z, Ronan S. Broadband tissue-equivalent phantom for BAN applications at millimeter waves[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(7): 2259 - 2266.
- [2] Sebastlan D, Serdal A, Steffen S, et al. A W-band MMIC radar system for remote detection of vital signs[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2012, 33(12): 1250 - 1267.
- [3] Ma J X, Zhou M, Zhan Y, et al. A novel ROF link scheme with frequency quadrupling optical millimeter-wave carrying dual-stream of 10Gbit/s 16-QAM signals[J]. Optics and Laser Technology, 2013, 46: 81 - 87.
- [4] 刘波,潘舟浩,李道京,等.基于毫米波 InSAR 成像的运动目标探测与定位[J].红外与毫米波学报,2012,31(3): 258 - 264.
Liu Bo, Pan Zhouhao, Li Daojing, et al. Moving target detection and location based on millimeter-wave InSAR imaging[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 31(3): 258 - 264. (in Chinese)
- [5] 沈广德,赵振维,林乐科,等.海雾对 3 毫米波传播特性的影响研究[J].红外与毫米波学报,2000,19(6): 478 - 480.
Shen Guangde, Zhao Zhenwei, Lin Leke, et al. Sea fog effects on radiowave propagation at 3mm wavelength[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2000, 19(6): 478 - 480. (in Chinese)
- [6] 赵振维,吴振森,沈广德,等.一种计算云雾毫米波衰减的经验模式[J].电波科学学报,2000,15(3): 300 - 303.
Zhao Zhenwei, Wu Zhensen, Shen Guangde, et al. An empirical expression for estimating attenuation due to clouds and fog at millimeter wavelengths[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(3): 300 - 303. (in Chinese)
- [7] Mao T P, Zhou, D F, Niu, Z X. The calculation model of the attenuation due to clouds or fog and the analysis of its characteristic[A]. Asia-Pacific Radio Science Conference: Proceedings[C]. Beijing: House of Electronics Industry, 2004. 332 - 334.
- [8] Mao X, Liu Y L, Chen L J, et al. A more precise empirical formula for estimating normalized fog attenuation in the millimeter-wave frequency range 30 ~ 100GHz[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2013, 34(3 - 4): 308 - 315.

- [9] Levy M F. Parabolic Equation Methods for Electro-Magnetic Wave Propagation[M]. London: IEE, 2000. 32 – 35.
- [10] Oraizi H, Hosseinzadeh S. Radio-wave-propagation modeling in the presence of multiple knife edges by the bidirectional parabolic-equation method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(3): 1033 – 1040.
- [11] Karimian A, Yardim C, Gerstoft P. Multiple grazing angle sea clutter modeling [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(9): 4408 – 4417.
- [12] 胡绘斌, 毛钧杰, 柴舜连. 宽角抛物方程的格林函数及其应用[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 517 – 520.
Hu Hui bin, Mao Junjie, Chai Shunlian. Green function of wide-angle parabolic equation and its application [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 517 – 520. (in Chinese)
- [13] 黄小毛, 张永刚, 王华, 等. 大气波导对雷达异常探测影响的评估与试验分析[J]. 电子学报, 2006, 34(4): 722 – 725.
Huang Xiaomao, Zhang Yonggang, Wang Hua, et al. Evaluation and experimental analysis of radar anomalous detection influenced by atmospheric ducts [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(4): 722 – 725. (in Chinese)
- [14] 沈玮, 吴先良. 一致性绕射理论的等效边缘电磁流法在抛物线方程中的应用[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 563 – 566.
Shen Wei, Wu Xianliang. Uniform theory of diffraction equivalent edge currents method and its application in parabolic equation [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 563 – 566. (in Chinese)
- [15] 王新, 黄志祥, 吴先良. 基于高阶抛物线方程求解目标雷达散射截面[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2118 – 2121.
Wang Xin, Huang Zhixiang, Wu Xianliang. Solving objects radar cross section based on high-order parabolic equation method [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2118 – 2121. (in Chinese)
- [16] 李广成, 郭立新, 吴振森, 等. 障碍物对蒸发波导中电波传播影响研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(4): 621 – 627.
Li Guangcheng, Guo Lixin, Wu Zhensen, et al. Influence of obstacle towards electromagnetic wave propagation in the evaporation duct [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(4): 621 – 627. (in Chinese)
- [17] Salski B, Celuch M. On the equivalence between the Maxwell-Garnett mixing rule and the Debye relaxation formula [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(8): 2352 – 2358.
- [18] Jonathan H J, Dong L W. Ice and water permittivities for millimeter and sub-millimeter remote sensing applications [J]. Atmospheric Science Letters, 2004, 5(7): 146 – 151.

作者简介



盛楠 男, 1986 年生于吉林公主岭. 西南交通大学电磁场与微波技术研究所博士研究生. 研究方向为电波传播理论与电磁场数值计算.

E-mail: Aaronsheng@my.swjtu.edu.cn



廖成 男, 1964 年生于重庆. 西南交通大学电磁场与微波技术研究所所长, 教授, 博士生导师. 主要研究方向为计算电磁学、电磁散射与逆散射和天线理论及应用研究.