

文章编号 1005-0388(2008)03-0530-04

## 沙尘暴多重散射对毫米波衰减影响研究

杨瑞科<sup>☆</sup> 苏振玲 刘科祥 吴振森

(西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 根据随机介质中电波传播理论,应用等效介电常数法和 Mie 理论,研究毫米波在沙尘暴中传播的衰减;并应用 Monte Carlo 方法,研究沙尘暴大气中毫米波多重散射对衰减的影响。分别得到了单次散射和多重散射时沙尘暴引起的毫米波段几个大气窗口频率的特征衰减,及随沙尘大气能见度和沙尘粒子水含量的变化关系。结果表明,当能见度小于 1 km 时,随着能见度的减小,特征衰减增大很快,多重散射的影响也愈来愈大。衰减随含水量的增加而增加,尤其当沙尘粒子水含量大于 1% 时增加较为显著。因此,对于预测自然沙尘暴大气对毫米波的衰减,当能见度小于 1 km 时,必须考虑粒子的多重散射效应。当沙尘粒子的水含量超过 1% 时,需要考虑水含量的影响。这些研究对民用和军用通信、遥感等系统的开发和应用均具有重要的实际意义。

**关键词** 毫米波;沙尘暴;多重散射;衰减

**中图分类号** TN011

**文献标志码** A

### Influence of multiple scattering on attenuation of millimeter wave propagation in sand and dust storm

YANG Rui-ke SU Zhen-ling LIU Ke-xiang WU Zhen-sen

(Science of School, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

**Abstract** Based on electromagnetic wave propagation theory in discrete random media, the millimeter wave attenuation induced by sand and dust storm is calculated by application of effective permittivity method and Mie theory. The influence of the multiple scattering on the attenuation for millimeter wave propagation in sand and dust storm is studied by Monte-Carlo method. The relations of the specify attenuation with visibility and with water content are obtained for several atmosphere window frequencies at millimeter wave band, under single and multiple scattering conditions, respectively. The results show that under visibility less than 1 km the specify attenuation and the effect of multiple scattering on attenuation quickly increase with visibility decrease, and as water content more than 1%, attenuation increases obviously with water content increase. Hence, under visibility less than 1 km, the influence of multiple scattering on attenuation must be considered for the prediction attenuation of millimeter wave propagation in sand and dust storm. Under the water content in sand particle more than 1%, the influence of the water content on attenuation must also be considered. This research is important for developing the millimeter communication, remote-sensing and so on system in civil

and military applied to desert region.

**Key words** millimeter wave; sand and dust storm; multiple scattering; attenuation

## 1 引言

世界上近三分之一的陆地是干旱和沙漠地区,而我国是世界上沙漠及沙漠化土地最多的国家之一。在沙漠地区中,风沙天气形成空中悬浮的沙尘粒子对毫米波的吸收和散射会引起毫米波严重的衰减和衰落。因此,自然风沙,沙尘暴,或因战车行进、爆炸等引起的扬尘或沙尘暴都能显著地影响毫米波通信、制导、遥感等系统的性能。因此,对于毫米波在风沙和沙尘暴天气中传播衰减特性的研究无论对民用还是军用均具有重要的实际意义。

毫米波在沙尘暴中传播衰减的研究方法主要有直接测量研究法和间接预测研究法。由于直接法一般存在较难实现、成本高、结果离散性大等问题,因此,工程上常常采用间接预测法。间接预测分析研究对于开发新频段、新系统具有更快、更经济、更重要的指导意义。国内外学者在这方面已经做了好些工作<sup>[1~6]</sup>。但无论是直接还是间接研究都主要集中于 100 GHz 以下的微波和毫米波段,对衰减的分析预测研究大多只考虑粒子的单次散射而未考虑其多重散射效应带来的影响。而在实际沙尘天气情况下,当能见度较低时,大气中沙尘粒子浓度较大,粒子对毫米波的多重散射效应可能会对衰减预测有较大的影响。因此,本文主要研究沙尘天气的多重散射效应对毫米波衰减的影响,为开发应用于沙尘大气中更高频段的毫米波系统提供更可靠的理论和工程依据。

## 2 沙尘天气的物理性质

沙尘天气通常分为浮尘、扬尘和沙尘暴天气三种天气状态。一般悬浮在空中的粒子尺度细小,使得大气水平能见度有所下降的天气为浮尘天气。当风力较大,大气中会有较多的且有较大的沙尘粒子悬浮在空中时形成扬尘天气,使得能见度有较大的降低。沙尘暴天气是指当风力更大时大气中的悬浮粒子浓度较大,悬浮在空中的沙尘粒子不但有细小的细沙和粉尘粒子,而且还有尺度大于 0.1 mm 的沙尘粒子,会使大气能见度可降低到 1 km 以下,甚至会出现能见度为几十米的沙尘天气。通常气象学上应用大气能见度度量大气的质量,而研究沙尘天气对电波的影响,必须考虑沙尘粒子的物理特性,主要有粒子尺度大小、尺度分布、含水量及介电常数

等。

### 2.1 沙尘大气粒子尺度

沙尘大气中的悬浮粒子尺度半径一般在 0.001~0.1 mm 范围内,且在各个粒子半径间隔内的粒子数可通过拟合用某连续尺度分布函数表示。常用于描述沙尘粒子尺寸分布的函数主要有:指数、幂指数、正态或对数正态分布等。董庆生等<sup>[4]</sup>通过对中国一些主要沙漠地区的沙尘进行了研究,发现对数正态分布与实际沙尘粒子尺度分布有较好的吻合。对数正态粒子尺度分布函数为

$$n(D) = \frac{N_0}{\sigma D \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln D - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中  $N_0$  是单位体积中平均粒子总数,  $\mu$  和  $\sigma$  是  $\ln(D)$  的均值和标准方差。对于自然沙尘暴大气中的粒子尺度参数  $\mu = -9.72$  和  $\sigma = 0.405$ <sup>[5]</sup>。

### 2.2 复合沙尘粒子的等效介电常数

沙尘粒子是由干沙和所含水分组成的复合介质,其复介电常数由沙和水的介电常数决定,且随频率变化。因此沙粒子的介电常数是含水量和频率的函数,可用 Maxwell-Garnett<sup>[6]</sup> 公式来计算其等效介电常数

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_s \left[ 1 + \frac{3p(\epsilon_w - \epsilon_s)/(\epsilon_w + 2\epsilon_s)}{1 - p(\epsilon_w - \epsilon_s)/(\epsilon_w + 2\epsilon_s)} \right] \quad (2)$$

式中  $\epsilon_s$  和  $\epsilon_w$  分别为干沙和水的复介电常数,  $p$  为含水量的体积百分比数。

## 3 毫米波在沙尘暴中散射和衰减

### 3.1 毫米波在沙尘大气中传播的单次散射和衰减

大气中悬浮和漂移的沙尘粒子能引起毫米波信号能量的吸收和散射。沙尘粒子形状是接近于球状的无规则体,虽然不是严格的球形,但由于粒子形状的随机性和在空间方位分布的随机性,多个粒子在各个方向散射的统计可等价于球形粒子的散射。因此,可用 Mie 理论分析粒子散射特性。根据 Mie 理论可得到单个粒子的散射和消光截面,其形式为

$$\sigma_s = (\lambda^2/2\pi) \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (3)$$

$$\sigma_t = (\lambda^2/2\pi) \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{ \text{Re}(a_n + b_n) \} \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $a_n$  和  $b_n$  为 Mie 散射系数。

对于有一定尺度分布的大气粒子,在单位距离

上所引起的载频衰减,即特征衰减  $A(\text{dB/km})$  为<sup>[7]</sup>

$$A = 4.343 \times 10^3 \int_0^{\infty} N_0 \sigma_t(r) p(r) dr (\text{dB/km}) \quad (5)$$

式中  $p(r)$  为粒子尺度分布概率密度函数,  $N_0$  为粒子数密度。通常  $N_0$  是一个很难测定的物理量,一般在研究电磁波在沙尘暴中传播时,通常借助于能见度  $V_0$  来描述沙尘的浓度,有<sup>[7]</sup>

$$V_0 = 15/\alpha_0 \quad (6)$$

$$\alpha_0 = 8.686 \times 10^3 \pi N_0 \int_{r_1}^{r_2} r^2 p(r) dr \quad (7)$$

其中  $r_1$  和  $r_2$  分别是最小和最大沙尘粒子半径,  $\alpha_0$  为衰减系数,由(6)和(7)式可以得到单位体积中沙尘粒子个数为

$$N_0 = 15/(8.686 \times 10^3 \pi V_0) \int_{r_1}^{r_2} r^2 p(r) dr \quad (8)$$

代入(5)式,可得毫米波在沙尘大气中单次散射的特征衰减

$$A = 15 \int_0^{\infty} \sigma_t(r) p(r) dr / (2\pi V_0 \int_0^{\infty} r^2 p(r) dr) \quad (9)$$

单位为  $\text{dB/km}$ 。

### 3.2 毫米波在沙尘大气中的多重散射

基于(5)式单次散射计算的衰减只适用沙尘所占大气空间体积较小的情况。随着沙尘大气能见度的减小,粒子数密度的增大,毫米波在沙尘粒子间的多重散射就需要考虑。Monte Carlo 方法是通过光子被介质中随机分布粒子的多次散射和吸收过程来模拟讨论电磁波的传播特性。因此, Monte Carlo 方法可用于研究毫米波在沙尘暴中传播的多重散射效应对衰减的影响。

蒙特卡罗方法认为光子与随机分布粒子相互作用为弹性散射,光子在随机分布的沙尘粒子中或被散射或被粒子吸收或从介质中逃逸出,每个光子遭受多重散射时,每一次散射只与前一次散射有关,即可把光子历史的状态序列用马尔可夫过程描述。用光子经过  $m$  次空间传播和散射后的状态序列  $\{s_l\}$  ( $l=1, \dots, m$ ) 构成样本空间。光子在沙尘介质层中经传播和散射后到达相空间点  $s$  是由  $m$  ( $m=0, 1, \dots, M$ ) 个相互排斥的事件构成的。利用全概率公式,这一事件的概率可以写成<sup>[8]</sup>

$$P(s) = \sum_{m=0}^{\infty} P_m(s) \quad (10)$$

上式中  $P_m(s)$  为光粒子在沙尘暴中经过  $m$  次空间传播或散射后到达向空间点  $s$  的概率。由于光子在沙尘介质中的随机游动是一种马尔可夫过程,则有

$$P(s) = P(s_0) P(s_1/s_0) \cdots P(s_m/s_{m-1}) \quad (11)$$

式中条件概率  $P(s_l/s_{l-1})$  ( $l=1, \dots, m$ ) 表示光子相空间点  $s_{l-1}$  经过传播或散射后到达的相空间点  $s_l$  的概率,则估计函数可以写为

$$P_i = \sum_{m=0}^{\infty} P_m = \sum_{m=0}^{\infty} W_m \exp \left[ -C_i \frac{h - z_m}{\cos \alpha_m} \right] \cdot \eta(\cos \alpha_m) \cdot \prod_{l=1}^m \eta(h - z_l) \eta(z_l) \quad (12)$$

式中  $C_i = N \langle \sigma_t \rangle$ 。这里引入  $\eta(x) = 1 (x > 0)$ ;  $\eta(x) = 0 (x \leq 0)$ 。权函数  $W_m$  可以表示为:

$$W_{m+1} = W_m \exp \left[ -C_s \left| \frac{z_{m+1} - z_m}{\cos \alpha_m} \right| \right] \quad (13)$$

式中  $\alpha_m$  为光子第  $m$  次散射方向与  $z$  轴的夹角,  $C_s = N \langle \sigma_a \rangle$ ,  $W_0 = 1$  为光子的初始权重。

跟踪  $N$  个光子,通过对光子散射路径抽样以及对光子散射方向和位置跟踪,最后检验从介质中逃逸和被吸收的光子。可以获得平均透过率为:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (14)$$

## 4 衰减计算结果及分析

电磁波在离散随机介质中传播时信号的衰减,可由不同尺度的单个粒子的消光截面、介质中粒子的尺度和介电常数等决定。基于前面的分析讨论,在不同能见度情况下根据 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法分别计算几个毫米波大气窗口频率(37、93、140 和 220 GHz)的毫米波在沙尘暴中沿视距传播的考虑单次和多重散射时衰减。为了便于比较,两种情况的结果在图 1、图 2 中同时给出。

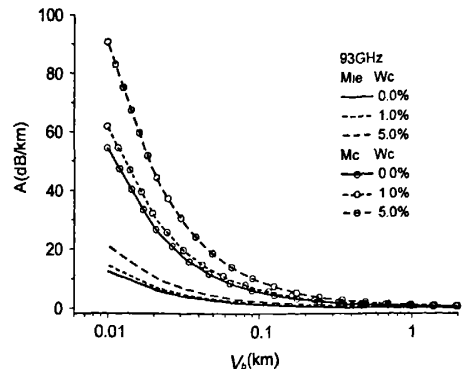


图1 93 GHz 毫米波在沙尘暴中衰减随能见度关系

从图 1 和图 2 的结果可看出,特征衰减  $A(\text{dB/km})$  随沙尘暴大气能见度的减小很快的增大,沙尘大气的多重散射效应对衰减的影响也随能见度的减小很快的增大。当能见度大于 2 km 时,自然沙尘

大气对毫米波多重散射的影响可以忽略,衰减预测可应用 Mie 单次散射理论进行预测,但当能见度小于 2 km 时,多重散射效应应能见度的减小逐渐变大,当能见度小于 1 km 时已很显著,尤其在较大的水含量情况下更为明显。因此,对于自然形成的沙尘暴大气,当能见度小于 1 km 时,必须要考虑沙尘粒子对毫米波多重散射效应引起的损耗。

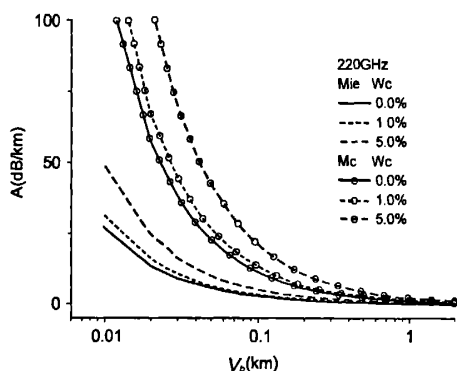


图2 220 GHz 毫米波在沙尘暴中衰减随能见度关系

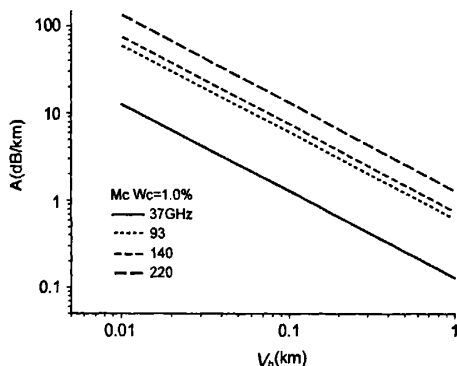


图3 水含量 1%时毫米波沙尘暴衰减与能见度关系

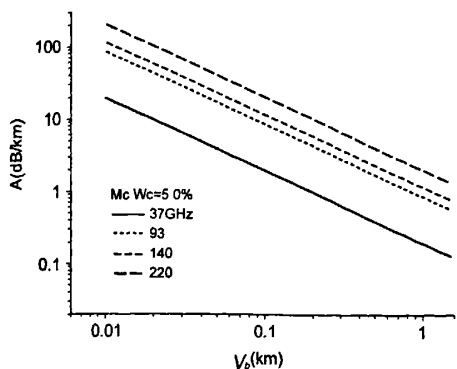


图4 水含量 5%时毫米波沙尘暴衰减随能见度关系

从图 1~4 结果的比较可看出,特征衰减随含水量的增加而增加,尤其当沙尘粒子水含量大于 1% 时增加较显著。另外,从图 3 和图 4 的计算可看出,沙尘大气对 37 GHz 以下的毫米波产生的损耗,除了较小的能见度和较大水含量外一般较小;当频率高于 37 GHz 时,沙尘暴大气引起的衰减一般较大,必须要考虑;但当沙尘暴天气降为扬沙或浮尘天气时,大气能见度较好,大气中悬浮的粒子浓度和尺度均大大的减小,因此对毫米波引起的衰减有很大的减小。

## 5 结论

对于沙尘暴大气,当能见度较大时,多重散射效应可以不考虑,沙尘暴对毫米波引起的衰减可根据 Mie 单次散射理论进行计算,但当能见度较小,尤其小于 1 km 时,多重散射效应必须要考虑,衰减预测需应用辐射传输的四通量或 Monte Carlo 模拟等方法进行计算。因此,对于自然沙尘暴,当能见度小于 1 km 时,必须要考虑沙尘粒子对毫米波多重散射效应引起的衰减。且当沙尘粒子水含量大于 1% 时,水含量对毫米波衰减的影响也必须要考虑。

## 参考文献

- [1] S O Bashir and N J Mxewan. Microwave propagation in dust storms: a review[J]. IEE Proceedings H, 1986, 133(3): 241-247.
- [2] 陈祥占. 从海湾战争看沙尘暴对无线电通信的影响[J]. 电波与天线, 1991, 6(1): 1-4.
- [3] 徐英霞, 杜延, 黄际英. 沙尘暴对地空路径上 Ka 频段电波传播的影响[J]. 电波科学学报, 2003, 18(3): 328-331.
- [4] Xu Y X, Du Y, Huang J Y. Effect of sand and dust storms on Ka band electromagnetic wave propagation along earth-space paths[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(3): 328-331.
- [5] 董庆生. 我国典型沙区中沙尘的物理特性[J]. 电波科学学报, 1997, 12(1): 15-25.
- [6] Dong Q S. Physical characteristics of the sand and dust in different deserts of China[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1997, 12(1): 15-25.
- [7] 周旺等. 微波传输中沙尘衰减的计算与仿真[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1259-1262.
- [8] F Elisa. A new permittivity model for the microwave moisture measurement of wet sand[C]. 33rd European microwave conference-munich, 2003, 539-542.
- [9] 尹文言, 肖景明. 沙尘暴对微波通信线路的影响[J]. 通信学报, 1991, 12(5): 91-96.

(下转第 579 页)

- Comparison and Improvement of the Diffracted Current Basis Functions for the MM-PO Technique [C]. IEEE AP-S Int. Symp., 2005, Vol. 1A: 159-162.
- [4] H J Bilow. Scattering by an infinite wedge with tensor impedance boundary conditions-A moment method/physical optics solution for the currents [J]. IEEE Trans on, 1991, 39(6): 767-773
- [5] W D Burnside, C L Y U, and R J Marhefka. A technique to combine the geometrical Theory of diffraction and the moment method [J]. IEEE Trans on AP, 1975, 23(1): 551-558.
- [6] John N Sahalos and Gary A Thiele. On the application of the GTD-MM technique and its limitation [J]. IEEE Trans on AP, 1981, 29(5): 7801-786.
- [7] G. Civi, P H Pathak, H -T Chou, and P Nepa. A hybrid uniform geometrical theory of diffraction-moment method for efficient analysis of electromagnetic radiation/scattering from large finite planar arrays [J]. Radio Science, 2000, 35(2): 607-620.
- [8] U Jakobus, and F M Landstorefer. Improvement of the PO-MoM hybrid Method by accounting for effects of perfectly conducting wedges [J]. IEEE Trans on AP, 1995, 43: 1123-1129.
- [9] D P Bouche, F A Molinet and R Mittra. Asymptotic and hybrid techniques for electromagnetic scattering [C]. Proc. IEEE, 1993, 81(12): 1658-1684.
- [10] 翟会清. 利用 UTD 修正的 MoM-PO 混合法研究 [J]. 电波科学学报, 2003, 18(5): 529-533.  
Zhai H Q. A hybrid method of MoM and PO Modified by UTD [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5): 529-533.
- [11] 岳 慧. 快速分析电大腔体电磁散射的混合法 [J]. 电波科学学报, 2006, 21(2): 161-165.
- Yue H. A fast hybrid algorithm for analyzing EM scattering by electrically Large cavity [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(2): 161-165.
- [12] R G Kouyoumjian and P H Pathak. A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface [C]. Proc. IEEE, 1974, 62: 1448-1461.
- [13] G Manara and P Nepa. Electromagnetic diffraction of an obliquely incident plane wave by a right-angled anisotropic impedance wedge with a perfectly conduction face [J]. IEEE Trans on AP, 2000, 48(4): 547-555.



龚主前 (1971—), 男, 湖北人, 博士, 中山大学讲师, 主要从事电波传播、目标电磁散射及电磁算法研究。



朱国强 (1959—), 男, 湖北人, 博士, 武汉大学教授、博导, 中国电子学会高级会员。主要从事军用目标电磁散射特性、天线理论与技术等研究。

秦家银 (1961—), 男, 湖北人, 博士, 中山大学教授、博导, 广东省通信学会副理事长, 广东省电子学会常务理事。主要从事无线 CDMA 与新一代宽带无线移动通信技术、光电子技术与通信等方面的研究。

(上接第 533 页)

- [8] Wu Zhen-sen, et al.. Monte Carlo simulation for millimeter wave propagation and scattering in rain medium [J]. International journal of infrared and millimeter waves, 1992, 13(7): 981-994.



杨瑞科 (1963—), 男, 陕西人, 博士, 教授, 主要从事电磁波、光波大气传输和散射特性等研究。

苏振玲 (1981—), 女, 山西人, 硕士, 主要从事电磁波大气传输和散射特性的研究。

E-mail: szhl2008@yahoo.cn