

# 沙尘暴中毫米波传播衰减及双频互相关函数研究

杨瑞科， 鉴佃军， 姚荣辉

(西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要：**对毫米波在沙尘暴中的衰减和双频互相关函数( $\Gamma$ )进行了研究。根据沙尘粒子尺度的对数正态分布,应用Mie理论和粒子介电常数等效的方法,对不同水含量的沙尘暴引起毫米波的衰减进行了研究;在考虑粒子尺度分布和等效介电常数时,应用分析和傅里叶变化方法求解 $\Gamma$ 的微分方程,对其进行数值分析,研究不同水含量的沙尘暴对 $\Gamma$ 的影响。结果表明,当水含量大于1.00%时,衰减会显著增加;一般仅对10GHz以下电波的衰减才可忽略。对 $\Gamma$ 的影响,在100GHz以下较小,但水分含量变化的影响相对明显;在220GHz时,对 $\Gamma$ 影响显著,但随水含量的变化较小。因此,对于开发和应用较高频段的毫米波信道,沙尘暴对毫米波脉冲的衰减及 $\Gamma$ 特性的影响需要考虑。

**关键词：**毫米波; 沙尘暴; 等效介电常数; 衰减; 双频互相关函数

中图分类号: TN011 文献标识码:A 文章编号: 1001-2400(2007)06-0953-05

## Research on attenuation and the two-frequency mutual coherence function for millimeter wave propagation in the sand and dust storm

YANG Rui-ke, JIAN Dian-jun, YAO Rong-hui

(School of Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The attenuation and the two-frequency mutual coherence function ( $\Gamma$ ) for millimeter wave propagation in the sand and dust storm are studied. According to the log-normal size distribution of the sand particles, the millimeter wave attenuations induced by the sand and dust storm of different water contents are studied by the Mie theory and the effective permittivity method. On considering particles size distribution and effective permittivity, the  $\Gamma$  differential equation is solved using the analysis and Fourier transform technique. The  $\Gamma$  solution is numerically analyzed. The influence of the sand and dust storm for different water contents on  $\Gamma$  is studied. It is shown that the attenuation evidently increases with the water content in sand particles increasing, when the water content is over 1.00%. Generally, the attenuation can only be neglected for the electromagnetic wave frequency below 10GHz. The influence of the sand and dust storm on  $\Gamma$  is smaller below 100GHz, but the influence of the water content change on  $\Gamma$  is relatively obvious. At 220GHz, the influence on  $\Gamma$  is apparent, but the change of the influence is small with the change of the water content. Therefore, for the exploitation and application channel of higher millimeter wave band, the attenuation and the influence on  $\Gamma$  induced by the sand and dust storm need be considered.

**Key Words:** millimeter wave; sand and dust storm; effective permittivity; attenuation; two-frequency mutual coherence function

地球陆地面积的近三分之一是干旱和沙漠地区。研究沙漠地区电波传播特性,不仅对像海湾地区那样的军事要地,而且对我国西北地区的民用和军事通信的建设和发展均有重要意义。自然风沙和沙尘暴,或因战车、坦克等装甲车行进中,或因爆炸引起的扬沙等都能显著地影响毫米波通信和武器系统的性能。由于沙尘暴中沙尘物质和水分含量的不同会对系统有不同的影响,所以,研究沙尘物质和水分组成的复合粒子的散射

收稿日期: 2007-01-26

基金项目: 国家重点实验室基金资助

作者简介: 杨瑞科(1963-),男,教授,博士。

与吸收,沙尘暴对毫米波的衰减和毫米波脉冲双频互相关函数( $\Gamma$ )的影响,对民用和军用的毫米波通信、制导和侦察等都有重要价值.

沙尘暴对微波传播影响研究早在 1941 年就开始,Ryde 等分析了沙尘暴对雷达反照率的影响,指出当  $f \leq 30 \text{ GHz}$ ,浓度较低的沙尘暴对雷达信号不产生影响<sup>[1]</sup>.苏丹、伊拉克、沙特阿拉伯等国家在 20 世纪 90 年代对微波路径上沙尘暴引起的衰减分别进行测试研究<sup>[1,2]</sup>.美国军方也作了爆炸形成的沙尘对 35,94 和 140 GHz 的毫米波雷达信号传播的试验<sup>[2]</sup>.从 20 世纪 80 年代起,我国也作了不少的研究<sup>[3~6]</sup>.由于沙尘粒子物理特性的变化会对电波传播特性有较大影响,中国电波传播研究所对不同类型的沙尘粒子的介电常数进行实验测定,对不同地区的沙尘暴的沙尘粒子尺度分布进行了实验模型研究<sup>[3]</sup>.Christiand<sup>[7]</sup>和 Elisa<sup>[8]</sup>等分别对干、湿沙粒子的微波介电常数进行了研究,并对现有的一些模型进行了讨论.但是,无论是直接的实验测试研究,还是间接的计算模拟和分析研究,主要集中于 100 GHz 以下,研究较多的在 37 GHz 以下.因此,需要对毫米波较高频段的大气窗口信号受沙尘暴影响而产生的衰减及脉冲特性的变化进行研究,为开发应用于沙尘暴大气中的民用和军用的高频段毫米波系统奠定工程理论基础.

## 1 沙尘粒子的物理特性

### 1.1 沙尘粒子尺度分布

在干旱和沙漠地区,风沙大气通常分为浮尘、扬沙和沙尘暴天气 3 种天气状态.沙尘暴天气较浮尘和扬沙天气的能见度低得多,可造成水平能见度低于 1 km 以下,有时只有几十米.沙尘暴天气中不但有小的细沙和粉尘粒子,而且还有较大的沙尘粒子,粒子半径分布范围可从 0.001~0.150 mm.因此,对毫米波传播影响较大.

实测结果表明,悬浮在空中的沙粒子半径一般小于 0.150 mm,细小的微粒半径可小于 0.005 mm.可用于描述粒子尺度分布的函数常用的有:指数、幂指数、正态或对数正态分布函数等.董庆生等<sup>[3]</sup>对塔克拉马干、腾格里等沙漠沙的研究表明,对数正态分布与实际沙尘粒子分布吻合得较好.对数正态分布为

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

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.

### 1.2 复合沙尘粒子的介电常数

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>[9]</sup>公式来计算其等效介电常数

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

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.计算不同水含量沙粒子的等效介电常数与频率的关系如图 1 所示.

## 2 毫米波在沙尘暴中传播的衰减

### 2.1 粒子散射

空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可等价于球形粒子的散射.因此,粒子散射可用 Mie 理论计算,应用 Mie 可得到单个粒子的散射和消光截面为

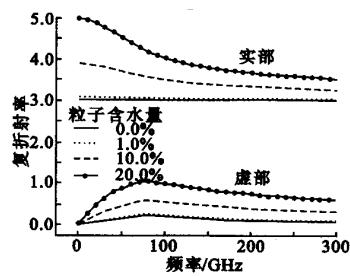


图 1 复折射率与频率的变化关系

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

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

式中  $\lambda$  为波长,  $a_n$  和  $b_n$  为 Mie 散射系数<sup>[4]</sup>.

## 2.2 衰减计算及结果

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和介质中粒子的尺度分布决定. 毫米波在沙尘暴中传播时的衰减可用下式计算

$$A = 4.343 \times 10^3 \times \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \sigma_t(D) dD , \quad (5)$$

式中  $N(D)$  是粒子尺度分布函数( $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ ),  $\sigma_t(D)$  为直径为  $D$  的单个粒子消光截面,  $D_{\min}$  和  $D_{\max}$  是粒子尺度最小和最大可能取的半径.

根据复合粒子等效介电常数模型式(2)和 Mie 理论式(4), 应用随机离散介质引起电波衰减的计算式(5), 对几种不同含水量的沙尘暴大气引起的毫米波信号的衰减进行了计算, 计算时粒径分布参数分别为:  $N_0 = 6.272 \times 10^6$ ,  $\mu = -8.489$  和  $\sigma = 0.663$ . 计算得到的典型结果如图 2 所示. 图中分别给出了沙粒子水含量为 0.25%, 1.00%, 5.00% 和 10.00% 时的衰减随频率的关系曲线.

从计算结果可看出, 当含水量小于 1.00% 时, 衰减变化很小; 而大于 1.00% 时, 衰减随水含量的增加而增大, 在高频段尤为显著. 当含水量低于 1.00% 时, 沙尘暴对 50 GHz 以下微波信号的影响较小, 且其引起的衰减和干沙情况下的衰减无显著的变化; 但当含水量增加到 5.00% 时, 不但衰减增大, 而且衰减随含水量的变化也很大, 一般仅对 10 GHz 以下电波的衰减才可忽略. 干沙沙尘暴和等价湿度大气单独对毫米波衰减的简单相加是没有这么大影响的; 这是由于大气中湿度的增大使沙尘粒子作为水汽分子凝聚核吸附了大气中的水分, 使粒子的介电常数发生较大的变化, 从而引起毫米波信号衰减和衰落的增大. 因此, 湿度较大的沙尘暴大气对毫米波信号有较强的衰减和衰落效应, 尤其对于较高频率的毫米波通信信号影响很大.

## 3 沙尘暴对毫米波脉冲传播的双频互相关函数的影响

脉冲波在随机介质中传播的特性可由双频互相关函数来定征, 在波束场中两点处的双频互相关函数可以表示为<sup>[10]</sup>

$$\Gamma = \Gamma(\omega_1, \omega_2, r_1, r_2, t_1, t_2) = \langle H(\omega_1, r_1, t_1) H^*(\omega_2, r_2, t_2) \rangle . \quad (6)$$

若设  $z$  轴为波传播方向, 有  $\mathbf{r} = \mathbf{p} + z\mathbf{z}$ ,  $\mathbf{p}$  为和传播方向垂直的径向向量. 在  $z_1 = z_2 = z$  时, 在离散随机介质中的  $\Gamma$  为

$$\Gamma = \Gamma(\omega_1, \omega_2, \rho_1, \rho_2, z, t_1, t_2) . \quad (7)$$

单色波在两点  $r_1$  和  $r_2$  之间场的相关函数  $\Gamma$  的微分方程如下

$$\left[ 2i \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{K_{1r}} \nabla_1^2 - \frac{1}{K_{2r}} \nabla_2^2 + 2(K_1 - K_2^*) - 2iP(\rho_d - Vt_d) \right] \Gamma = 0 , \quad (8)$$

其中  $P(\rho_d) = \int \rho f_1(s) f_2^*(s) \exp(-iK_\sigma s \cdot \rho_d) ds$ , 而  $\nabla_1^2$  和  $\nabla_2^2$  为在  $z$  平面上分别关于  $\rho_1$  和  $\rho_2$  的二维拉普拉斯算子.  $V$  是粒子的径向速度.

对于入射在半无限空间介质中的平面波 ( $z > 0$ ), 在  $z = 0$ , 有

$$\Gamma(\omega_1, \omega_2, z = 0) = 1 . \quad (9)$$

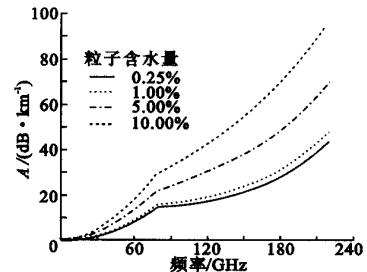


图 2 衰减与频率的关系

对于平面波应注意到  $\Gamma$  是与  $\rho_c$  无关的,因此,式(8)可写为

$$\left[ \partial/\partial z + (iK_{dr}/(2K_1 K_{2r})) \nabla_d^2 - i(K_1 - K_2^*) - P(\rho_d) \right] \Gamma = 0 , \quad (10)$$

其中  $\nabla_d^2$  是关于  $\rho_d$  的拉普拉斯算子.令  $\Gamma = \exp[i(K_1 - K_2^*)z] \exp \Psi$ ,由式(10)可得

$$\partial \Psi / \partial z + (iK_{dr}/2K_1 K_{2r}) \nabla_d^2 \Psi = P(\rho_d) , \quad (11)$$

应用傅里叶变换  $I(s) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \int \Psi \exp(-i(K_\sigma s \cdot \rho_d)) d(K_\sigma \rho_d)$  和  $\Psi = \int I \exp(i(K_\sigma s \cdot \rho_d)) ds$  对其进行变换,可得满足边界条件式(9)的解为

$$\Gamma(\omega_1, \omega_2, z, \rho_d) = \exp[\phi(\omega_1, \omega_2, z, \rho_d) + i(K_1 - K_2^*)z] , \quad (12)$$

$$\phi = \int ds \exp(iK_\sigma s \cdot \rho_d) \rho f_1(s) f_2^*(s) \int_0^z \exp[(iK_{dr} K_\sigma^2 / 2K_1 K_{2r}) s^2 z'] dz' . \quad (13)$$

对于大多数实际情况,入射带宽是远小于载频频率的,因此可有如下的近似

$$i(K_1 - K_2^*)z \approx -\rho \sigma_i z + i(\omega_d/v_p)z , \quad (14)$$

$$f_1(s) f_2^*(s) \approx |f(s)|^2 , \quad K_c^2 \approx K_{1r} K_{2r} , \quad (15)$$

其中  $\sigma_i$  和  $|f(s)|$  是在载波频率和  $K_{dr} = \omega_d/v_p$  时根据平均尺度的粒子计算的.然而,在实际中,粒子的尺度大小不一,因此,在式(14)的  $\rho \sigma_i$  计算中,用粒子尺度分布谱比用平均直径粒子和平均粒子密度更合理更实际.则根据粒子尺度分布谱将式(14)改写为

$$i(K_1 - K_2^*)z \approx -A_t z + i(\omega_d/v_p)z , \quad (16)$$

$$A_t = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \sigma_i N(D) dD . \quad (17)$$

对于散射幅度有如下的近似表示,即  $|f(s)|^2 \approx \sigma_s (\gamma/\pi) \exp(-\gamma \theta^2)$ ,其中  $\sigma_s$  是一个粒子的散射截面,  $s = \sin \theta \approx \theta$ ,  $\gamma$  是与  $(D/\lambda)^2$  成正比的.那么  $\Gamma$  可表示为

$$\Gamma = A(\omega_d) \exp[i\Phi(\omega_d) + i(\omega_d/v_p)z] , \quad (18)$$

$$A(\omega_d) = \exp\{-A_t z [1 - (W_0/x) \tan^{-1} x]\} , \quad (19)$$

$$\Phi(\omega_d) = (A_t z/2) [(W_0/x) \ln(1 + x^2)] , \quad (20)$$

在这里  $x = \omega_d/\omega_r$ ,  $\omega_r = 2\gamma v_p/z$ ,而  $W_0 = \sigma_s/\sigma_i$  是单个粒子的反照率.

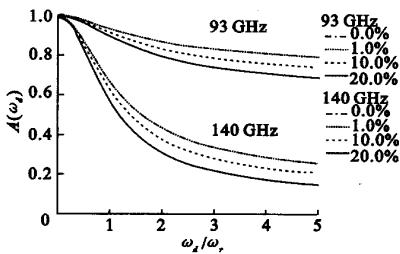


图3 双频互相关函数的幅度随差频的变化1

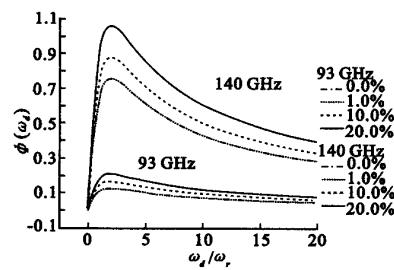


图4 双频互相关函数的相位随差频的变化1

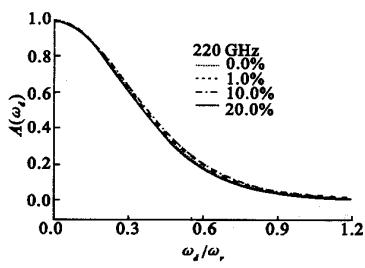


图5 双频互相关函数的幅度随差频的变化2

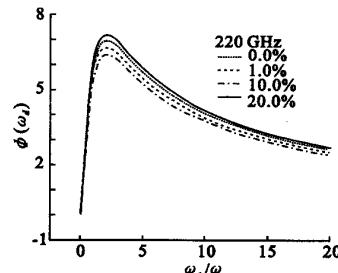


图6 双频互相关函数的相位随差频的变化2

根据粒子散射和衰减的计算结果,当 $z = 5 \text{ km}$ 时,在不同湿度含量的条件下,对几个毫米波大气窗口频率(93, 140 和 220 GHz)的 $\Gamma$ 归一化幅度 $A(\omega_d)$ 和相位 $\Phi(\omega_d)$ 随 $x = \omega_d/\omega_r$ 变化进行计算分析,结果如图3~6所示。结果表明,沙尘暴对100 GHz以下信号的 $\Gamma$ 影响很小,可以不考虑,如图3和4。随着频率的增加,影响逐渐增大,对于220 GHz的 $A(\omega_d)$ 随 $x$ 的下降很快, $\Phi(\omega_d)$ 也较大,表明脉冲特性变化较大,如图5和6所示。沙尘粒子的水含量变化对频率较低的 $\Gamma$ 影响相对较大,但对于较高频率影响变化不大。因此,对于100 GHz以上的毫米波在沙尘暴中传播时,其脉冲特性的改变就需要考虑,对于140 GHz的窗口,水含量对 $\Gamma$ 的相对影响还较大,既还需要考虑沙尘含水量的影响。

## 4 结束语

根据沙尘暴中沙尘粒子的尺度分布和沙尘粒子的等效介电常数,研究不同含水量的沙尘暴对毫米波的衰减,及对 $\Gamma$ 的影响。从计算结果可看出,当含水量低于1.00%时,沙尘暴引起毫米波的衰减和干涉沙尘暴时的衰减几乎一样。当含水量超过1.00%时,衰减随水含量的增加而有较大增加。若对干涉沙尘暴和等效湿度大气单独引起毫米波衰减的简单叠加是没有这么大影响的。这是由于大气中湿度的增大使沙尘粒子成为水汽分子凝聚核,吸附了大气中的水分使得粒子的介电常数发生较大变化,从而使毫米波衰减和衰落增大。因此,当水含量大于1.00%时,沙尘暴对毫米波的衰减及水含量变化对衰减的影响都需要考虑。

沙尘暴对 $\Gamma$ 影响的研究,结果表明,在100 GHz以下,对 $\Gamma$ 影响很小,可以不考虑;随着频率的增加,影响逐渐增大;220 GHz时, $A(\omega_d)$ 随 $x$ 的下降很快, $\Phi(\omega_d)$ 也较大。沙尘粒子中水含量变化对较低频率毫米波的 $\Gamma$ 影响较明显,但对较高频率的 $\Gamma$ 影响不大。因此,对于100 GHz以上的毫米波(140 和 220 GHz)在沙尘暴中传播时,其 $\Gamma$ 的改变需要考虑;对140 GHz时,还需要考虑沙尘含水量的相对影响。因此,对于开发较高频段的毫米波系统时,沙尘暴对毫米波脉冲的衰减及脉冲特性的影响均需要考虑,尤其是衰减的影响非常大。

## 参考文献:

- [1] Bashir S O, Mxewan N J. Microwave Propagation in Dust Storms: a Review[J]. IEE Proceedings H, 1986, 133(3): 241-247.
- [2] 陈祥占. 从海湾战争看沙暴对无线电通信的影响[J]. 电波与天线, 1991, 6(1), 1-4.
- [3] 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): 15-21.
- [4] 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.
- [5] 阎毅, 黄际英. 微波毫米波在战场烟尘中的传播[J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(4): 433-436.
- [6] 周旺. 微波传输中沙尘衰减的计算与防真[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1259-1262.
- [7] Christian M. Microwave Permittivity of Dry Sand[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(1): 317-319.
- [8] Elisa F, Marco D, Roberto S. A New Permittivity Model for the Microwave Moisture Measurement of Wet Sand[EB/OL]. [2006-12-20]. <http://ieeexplore.ieee.org/servLet/opac?punumber=4142936>.
- [9] Sihvola A H, Kong J A. Effective Permittivity of Dielectric Mixtures[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(4): 420-429.
- [10] Hong S T, Ishimaru A K. Two-frequency Mutual Coherence Function, Coherence Bandwidth, and Coherence Time of Millimeter and Optical Waves in Rain, Fog, and Turbulence[J]. Radio Science, 1976, 11(6): 551-559.

(编辑:齐淑娟)