

文章编号: 0258-7025(2004)09-1075-06

激光在沙尘暴中的衰减特性研究

吴振森, 由金光, 杨瑞科

(西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 复杂环境中激光传输和散射特性是目标与环境光散射特性研究的基础。主要讨论了激光信号在沙尘中的传输衰减特性。根据 Mie 理论研究了具有一定粒径分布沙尘粒子对于激光信号的单次散射衰减特性, 给出了不同分层沙尘粒子的平均散射截面、粒子平均反照率、平均不对称因子和平均相函数。利用四通量法和蒙特卡罗法研究了激光在分层沙尘大气中的多重散射和斜程传输衰减特性, 并给出它们与能见度及高度的变化关系。最后, 在考虑多重散射时, 分别用以上两种方法数值计算了 $1.06 \mu\text{m}$ 激光在斜程沙尘大气中的衰减率, 并与单次散射结果进行了比较。结果表明, 能见度较低时, 不考虑多重散射效应会带来较大的误差; 在斜程沙尘大气激光传输时, 随分层数增加, 数值结果就越精确。

关键词 激光技术; 激光散射; 沙尘暴; 四通量法; 蒙特卡罗法

中图分类号 TN 24; TN 012 **文献标识码** A

Study on Laser Attenuation Character in Sand and Dust Storms

WU Zhen-sen, YOU Jin-guang, YANG Rui-ke

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

Abstract The study on laser transmission and scattering characteristics in complex environments is the basis research of light scattering from target and environment. The severe attenuation caused by laser propagation in sand and dust storms was mainly discussed in this paper. The attenuation characteristic of laser was studied with Mie theory for single scattering of sand and dust particles with special size distribution. Based on Mie theory, the average scattering cross section, albedo, asymmetry factor, and phase function were calculated. The laser multiple scattering and attenuation characteristics of slanting transmission in the layering sand dust atmosphere were studied by using four-flux model method and Monte-Carlo method, and the relationship between attenuation and visibility in difference heights was also given. Finally, after considering of multi-scattering, numerical calculations of specify attenuation were made for laser signal of $1.06 \mu\text{m}$ in sand and dust atmosphere by using the above two methods respectively, and the results were compared to the condition of single scattering. It is shown that biggish error can be brought in the low visibility take no account of multiple scattering, and that the more layers of the sand and dust atmosphere is divided into for slanting transmission, the more accurate the result is.

Key words laser technique; laser scattering; sand and dust storms; four-flux method; Monte-Carlo method

1 引 言

我国是世界上沙漠及沙漠化土地最多的国家之一, 风沙天气形成的空中悬浮的沙尘粒子的吸收和

散射效应将引起激光光束相当大的衰减^[1]。因此, 自然风沙、沙尘暴中不同高度的空气中沙尘物质的含量、分布结构以及运行速度, 或因战车行进、爆炸引起的扬沙都能显著地影响激光传输特性。激光在

收稿日期: 2003-06-02; **收到修改稿日期:** 2003-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60081002)资助项目。

作者简介: 吴振森(1946—), 男, 湖北人, 西安电子科技大学教授, 无线电物理学科与光学学科博士生导师, 理学院院长, 主要从事目标与环境光电特性、随机介质和复杂系统的电磁(光)波的传播与散射特性、粒度分析研究。E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

沙尘中散射与衰减的研究对沙尘大气环境下激光目标探测、跟踪、测距和定位,遥感,激光通信质量,导弹制导和引信等方面都有重要的理论和应用价值。

国内外学者在研究激光在沙尘中衰减时大多只考虑单次散射而忽略其多重散射带来的影响。实际上,在沙尘大气中,尤其能见度很低时,不考虑多重散射将会带来较大的误差。为了提高激光目标探测系统在沙尘大气中的精确度,研究激光在沙尘大气中的多重散射有重要的理论与实用价值。

激光按其波的种类可以分为两种:一种是以平面波的形式传播,例如激光雷达;另一种是以波束形式来探测、感知目标,例如激光引信^[2]。本文主要以平面波形式研究 1.06 μm 激光的远场传播与衰减特性。

2 沙尘暴的物理性质

沙尘暴包括沙暴和尘暴。沙尘的分布,以及其他许多因素,例如风向、风速、离地高度等,都能对激光信号传输与探测产生显著的影响。沙尘粒子的尺寸分布也有很多种,沙尘的粒子平均半径一般小于 0.1 mm。根据实验观测的结果表明,其对数正态分布能很好描述粒子的尺寸分布^[3]

$$p(r) = \exp[-(\ln r - m)^2 / 2s^2] / (\sqrt{2\pi}rs) \quad (1)$$

式中 r 为沙尘粒子的半径, s 和 m 分别为 $\ln r$ 的标准方差和均值。沙尘的复介电常数主要依赖其含水量的变化,干沙的复介电系数不随频率的变化而变化。本文采用干沙的折射系数^[4]: $m = 1.55 - i0.005$ 。

沙尘粒子的粒径以及单位体积的含沙量均随着高度发生变化。粒子的平均半径随着高度的增加而减少,这种变化可用幂律来表示,即^[5]

$$r = r_{0v}(h/h_0)^{-\nu} \quad r_{0v} = 0.15 \quad (2)$$

式中 h_0 为地球站高度, r_{0v} 为在高度 h_0 处的平均半径。另外能见度 V_b 随高度 h 服从一定的关系^[6]

$$V_b = V_{b0} \times \exp(bh) \quad b = 1.25 \quad (3)$$

V_{b0} 为地面附近的水平能见度。当高度达到 2 km 以上时沙尘粒子的尺寸和密度都很小,相应的衰减也很小。

3 激光在沙尘大气中的衰减

3.1 激光在沙尘大气传播时的单次散射

空中悬浮和漂移的沙尘粒子能引起激光信号能量的吸收和散射。当随机分布的沙尘粒子相当稀薄

时,从发射到接收的传播路径上只被相当少数粒子散射,散射场只是由于沙尘粒子单次散射产生,所有的双次和多次散射均可以忽略。设沙尘粒子的形状为球形(这是一个近似的描述,实测表明,球形粒子的数目在大多数情况下低于沙尘粒子总数的一半^[7]),其等效粒子半径为 r ,根据 Mie 理论,单个沙尘粒子对激光的衰减截面和散射截面分别为

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

$$\sigma_s = (\lambda^2/2\pi) \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (5)$$

式中 λ 为波长, a_n 和 b_n 为 Mie 散射系数。对于具有一定尺寸分布的沙尘粒子,在单位距离上所引起的信号衰减(即衰减率)为^[7]

$$A = 0.004343 \int_0^D N \sigma_t(r) p(r) dr \quad (\text{dB/km}) \quad (6)$$

式中 $p(r)$ 为粒子尺寸分布密度函数,(6) 式中沙尘的粒子数密度 N 是一个很难测的物理量,因为在一次沙尘暴中,沙尘的粒子数密度与风速、风向及沙尘的离地高度都有关系。国内外学者在研究光在沙尘中传播时,通常借助于光学能见度 V_b 来描述沙尘的浓度,因为^[8]

$$V_b = 15/\alpha_0 \quad (7)$$

$$\alpha_0 = 0.0043 \times \pi N \int_0^D r^2 p(r) dr \quad (8)$$

D 为最大沙尘粒子半径(文中取 0.1 mm), α_0 为可见光的衰减系数,联立式(7),(8) 可以得到单位体积中沙尘粒子个数为

$$N = 15/[0.0086\pi V_b \int_0^D r^2 p(r) dr] \quad (9)$$

代入(6)式,可得激光在沙尘大气中单次散射的衰减率公式

$$A = 15 \int_0^D \sigma_t(r) p(r) dr / [2\pi V_b \int_0^D r^2 p(r) dr] \quad (10)$$

3.2 激光在沙尘大气中的多重散射理论

单次散射计算衰减与散射只适用于沙尘所占空间体积小于 0.1% 的情况,随着沙尘粒子数密度的增大,需考虑多重散射与粒子间的相互作用。输运理论是通过介质中粒子对能量的输运过程来讨论激光的散射特性的。本文采用四通量法和蒙特卡罗法研究激光在非均匀沙尘暴中的衰减特性。

3.2.1 四通量法

四通量法是依赖于输运方程解的研究,可用于研究准直光束和扩散光束。在四通量理论中,分别用前向和反向流动的准直射束以及前向和反向流动的扩散通量共四个量来代表强度流。

在均匀随机介质中,假设第 i 层是具有厚度为

h_i 的平行平板介质中随机分布的球形沙尘粒子。在四通量理论中,令 $I_c(z)$ 和 $J_c(z)$ 分别代表前向和反向流动的准直强度; $I_d(z)$ 与 $J_d(z)$ 分别代表前向与后向流动的扩散强度。另外,令 K 表示准直射束的吸收系数, S 表示散射系数, ζ 为前向散射比率,等于前向散射的能量与整个散射能量的比值,且正比衰减系数,则后向散射比为 $(1 - \zeta)$, 且有

$$K = \rho\langle\sigma_a\rangle, S = \rho\langle\sigma_s\rangle, \langle W_0\rangle = S/(S + K)$$

可以将四通量的微分方程描述为^[9]

$$\begin{aligned} \frac{dI_c}{dz} &= (K + S)I_c \\ \frac{dI_d}{dz} &= \epsilon KI_d + \epsilon(1 - \zeta)SI_d - \epsilon(1 - \zeta)SJ_d - \epsilon SI_c \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dJ_c}{dz} &= -(K + S)J_c \\ \frac{dJ_d}{dz} &= -\epsilon KJ_d - \epsilon(1 - \zeta)SJ_d + \epsilon(1 - \zeta)SI_d + (1 - \zeta)SI_c + \epsilon SJ_c \end{aligned} \quad (12)$$

其边界条件为

$$\left. \begin{aligned} J_c(z) &= T_1 I_0 + R_1 I_c(z) \\ J_d(z) &= T_2 I_0 + R_2 I_c(z) + R_3 I_d(z) \\ I_c(z) &= R_4 J_c(z) \\ I_d(z) &= R_5 J_c(z) + R_6 J_d(z) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} z &= 0 \\ z &= h \end{aligned} \quad (13)$$

常数 $T_1, T_2, R_1, \dots, R_6$ 的物理意义见图 1。(11), (12) 式中, ϵ 为平均等效光程系数,等于经过厚度 dz 的扩散辐射的平均路程,可用下面的公式^[10]

$$\epsilon = c_1 g^2 \exp\left[\frac{1}{(g-1)(c_3 + c_4 \tau)}\right] + c_5 (1-g) \frac{3 \exp(-\tau) + 1}{2} + 1 \quad (14)$$

(14) 式中, τ 为光学厚度, $c_1 \sim c_5$ 为常数, $c_1 =$

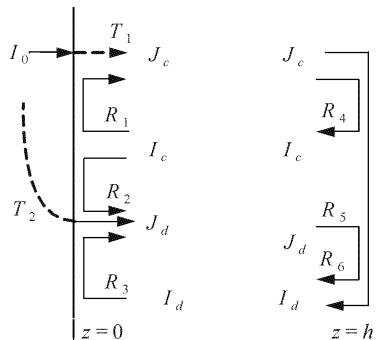


图 1 边界的反射与透射系数

Fig. 1 Coefficients of reflection and transmission at boundary

$1.5504, c_2 = 0.9642, c_3 = 4.0329, c_4 = 3.0635, c_5 = 0.8680$ 。 g 为不对称因子,表征粒子散射各向异性的程度^[11]。当粒子具有一定的尺寸分布时,可以获得平均不对称因子 $\langle g \rangle$

$$\langle g \rangle = \frac{1}{N\langle\sigma_t\rangle} \int_0^\infty N(r)g(r)\sigma_t(r)dr \quad (15)$$

解(11), (12) 式^[12], 用 T_α 表示准直光束不考虑粒子多重散射时的准直相干透过率, T_{cd} 和 R_{cd} 分别表示准直光束入射时因多重散射产生的扩散透射率和扩散反射率, T_{dd} 和 R_{dd} 分别为扩散光产生的透过率和反射率。则反射率和透过率可表示为

$$R = R_{cd} + R_{dd} \quad T = T_\alpha + T_{cd} + T_{dd} \quad (16)$$

对于多层沙尘大气的四通量法,首先必须考虑各子表面的反射和透射的贡献;其次应考虑不同层中由于半径的不同,粒子的不对称因子、平均散射截面、衰减截面以及单次反照率也相应地发生变化。设在子表面 z_i 和 z_{i+1} 间,准直光束的反射系数为 r_c , 扩散光束在平板内表面的反射系数为 r_d^i , 在平板外表面的反射系数为 r_d^e 。则

$$I_c(z_i) = (1 - r_c)I_c^i + r_c J_c(z_i) \quad (17)$$

$$I_d(z_i) = (1 - r_d^e)I_d^i + r_d^i J_d(z_i) \quad (18)$$

其中 I_c^i 与 I_d^i 分别表示 $z = z_i$ 处的准直入射强度与扩散入射强度。

3.2.2 蒙特卡罗法

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^[12]。用光波经过 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。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 $m (m = 0, 1, \dots, N)$ 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^[13]

$$P(s) = \sum_{m=0}^\infty P_m(s) \quad (19)$$

上式中 $P_m(s)$ 为光粒子在沙尘中经过 m 次空间运输和散射后到达相空间点 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

$$P(s) = P(s_0)P(s_1/s_0) \cdots P(s/s_{m-1}) \quad (20)$$

式(20)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

$$P_t = \sum_{m=0}^\infty P_m = \sum_{m=0}^\infty W_m \exp\left[-C_t \frac{h - z_m}{\cos a_m}\right] \times$$

$$\eta(\cos\alpha_m) \cdot \prod_{l=1}^m \eta(h - z_l) \eta(z_l) \quad (21)$$

式中 $C_l = N\langle\sigma_l\rangle$ 。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

$$W_{m+1} = W_m \exp\left[-C_a \left| \frac{z_{m+1} - z_m}{\cos\alpha_m} \right|\right] \quad (22)$$

式中 α_m 为光子第 m 次散射方向与 z 轴的夹角, $C_a = N\langle\sigma_a\rangle$, $W_0 = 1$ 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^[13]。可以获得平均透过率为

$$T = \frac{1}{N} \sum P_i \quad (23)$$

对于分层沙尘大气的蒙特卡罗方法处理过程,需要考虑内部各个子表面的反射。对于直接透射分量,则第一次移动的步长大于整个沙尘大气厚度的情况下才成立。对于多次散射的情况,处理起来就比较麻烦一些,主要是光子在多层内游动的情况。设光子现处于第 i 层,经过一次空间输运后,将会到达另一层。这时,需按下面的步骤处理:若光子将透射到另一层,先将光子沿散射方向移动到下一层的边界处,计算出透射概率和权函数以及透射方向,再沿新的散射方向移动剩下的距离;若光子留在该层内,则利用该层参数,继续跟踪下一次散射的位置、散射方向和传输路径;若光子又透射到另一层,则重复上述步骤,直到光子处于某一层内被吸收,或透射出沙尘大气层。值得注意的是,尽管在不同层内介质的参数一般是不相同的,我们仍然用(23)式计算

光子的透过率。

4 方法比较与结果讨论

首先比较在不同能见度下激光沿着水平路径传播时分别用 Mie 理论计算单重散射和用四通量法及蒙特卡罗法计算多重散射的衰减率。

图 2(a),(b)分别为 5 m 处和 100 m 处衰减率随能见度的变化。由图 2(a),(b)可以看出,激光经过沙尘考虑多重散射时,衰减率较大。能见度较低(即沙尘浓度较高),特别能见度小于 1 km 时,用单重散射计算可带来很大的误差。随着能见度的增大,两种方法计算的结果差别越来越小,当能见度大于 3 km 时,用单重散射计算的误差已很小。计算多重散射时用四通量法和蒙特卡罗法所得的结果也基本吻合,两者的偏差的原因主要来自于四通量法中平均等效光程系数 ϵ 与蒙特卡罗法中统计次数(即所用光子数)。四通量法和蒙特卡罗法对于多重散射的计算都有一定的优越性。四通量法计算方法简单迅速,可用于研究简单的输运过程,但因仅用于垂直入射的光束,其适用范围受到限制。蒙特卡罗方法相比之下更能揭示粒子的多重散射现象,而且对研究对象的物理模型和几何边界没有任何限制。但由于蒙特卡罗法得到的是统计结果,所以要得到有效的结果就要对大量光子进行跟踪计算统计,随着计算技术的发展,这一方法已在辐射传输、粒子碰撞、核物理等很多领域得到了大量的应用。

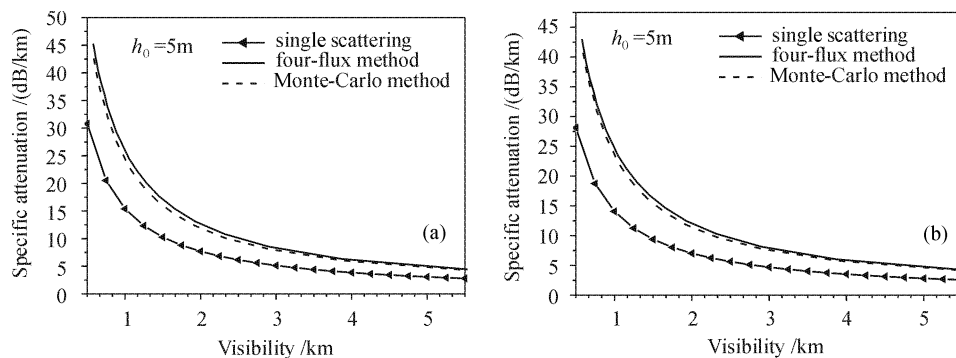


图 2 5 m 处(a)和 100 m 处(b)衰减率随能见度的变化

Fig. 2 Variation of specific attenuation with visibility at 5 m (a) and 100 m (b)

激光经过分层沙尘大气衰减时,在不同的高度上沙尘大气的各个参数是不同的,所以计算分层沙尘大气时,可以将沙尘大气处理分为水平分层介质来考虑。由式(2),(3),随着高度的增加,沙尘粒子半径的变化趋势是越来越小,对应的其他参量(衰减

截面、不对称因子、单次反照率)变化趋势也是越来越小,所以对于整个沙尘大气层来说,要提高计算的精确度,除了增加分层的数量外,不应当采用均匀分层,越靠近地面的分层厚度应当越小。

图 3(a),(b)表示地面附近能见度分别为 1 km

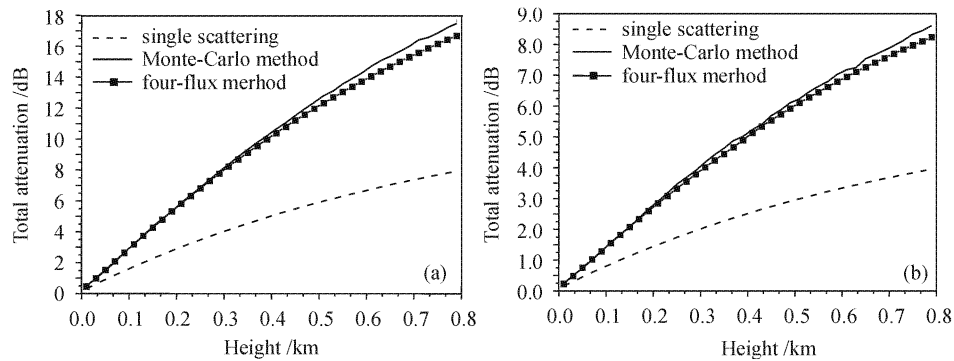


图 3 总衰减随高度的变化

能见度为(a) 1 km;(b) 2 km

Fig. 3 Variation of total attenuation with height

(a) visibility=1 km; (b) visibility=2 km

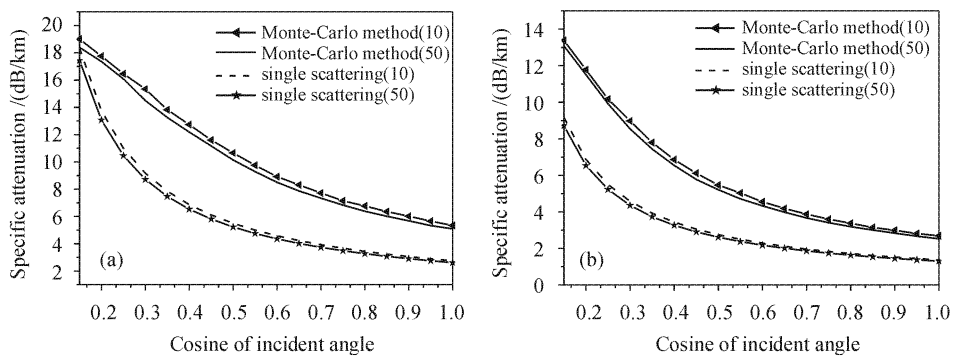


图 4 衰减率随入射角的变化

能见度为(a) 1 km;(b) 2 km

Fig. 4 Variation of specific attenuation with angle of incidence

(a) visibility=1 km; (b) visibility=2 km

和 2 km 时激光在分层沙尘大气中(共分 20 层)垂直于地面传播的总衰减,很显然,随着高度的增加,用单重散射和多重散射计算所得的总衰减的差距增大但又趋于稳定。这是因为随着高度的增加,粒子数密度减小,用单重散射计算时带来的误差减小的缘故。图 4(a),(b)表示激光沿着不同的角度经过 200 m 高度的分层沙尘大气(分别分 10 层与 50 层),地面附近的能见度分别为 1 km 与 2 km。随着入射角的减小,激光经过相同厚度的衰减率减小,用单重散射计算所得的误差大体上呈减小趋势。所以在计算激光的斜程沙尘大气的衰减时,多重散射效应不能忽略。

5 结 论

讨论了激光在沙尘暴中的传播与衰减,比较了单次散射与多重散射在计算激光衰减率时的差别以及蒙特卡罗法与四通量法在计算分层沙尘大气对激

光多重散射时的差别,重点讨论了激光在分层沙尘大气中的衰减并与单次散射进行比较。当能见度较小时,不管激光在水平路径上还是在分层沙尘大气中,不考虑多重散射计算衰减率会带来较大的误差。在实际情况中沙尘粒子的尺寸参数和密度分布均随高度变化,所以在研究激光在沙尘大气中斜程和垂直传播时,需要考虑非均匀沙尘介质对光的多重散射,而且分层越多,计算精度越高。上述研究结果可以用于战场烟尘中激光制导、传输、跟踪和光电对抗中。

参 考 文 献

- 1 Dong Qingsheng. Physical characteristics of the sand and dust in different deserts of China [J]. *Chinese J. Radio Science*, 1997, **12**(1):15~25
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
- 2 Wu Zhensen, Chen Hui. Characteristics of detonator laser beam scattering from an object in the near field [J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(5):294~297

- 吴振森,陈 辉. 激光引信目标近场散射特性研究[J]. 激光与红外, 2001, **31**(5):294~297
- 3 A. S. Ahmed. Role of particle-size distributions on millimeter-wave propagation in sand/duststorms [C]. *IEE Proceedings-H*, 1987, **134**(1):55~59
 - 4 A. Jimenez, H. Conzalez Jorge, M. C. Rabello-Soares. Diurnal atmospheric extinction over Teide Observatory (Tenerife, Canary Islands) [J]. *A&A Supplement Series*, 1998, **129**:413~423
 - 5 A. S. Ahmed, A. Ali, M. A. Alhaider. Airborne dust size analysis for tropospheric propagation of millimetre waves into dust storms [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1987, **GE-25**(5):599~693
 - 6 Yin Wenyan, Xiao Jingming. The effects of sand and dust storms on microwave links [J]. *J. China Institute of Communications*, 1991, **12**(5):91~96
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
 - 7 Dong Qingsheng, Zhao Zhenwei, Cong Hongjun. The mm-wave attenuation due to sand and dust [J]. *Chinese J. Radio Science*, 1996, **11**(2):29~32
董庆生,赵振维,丛洪军. 沙尘引起的毫米波衰减[J]. 电波科学学报, 1996, **11**(2):29~32
 - 8 A. J. Ansari, B. G. Evans. Microwave propagation in sand and dust storms [C]. *IEE Proceedings-F*, 1982, **129**(5):317~322
 - 9 B. Maheu, G. Gouesbet. Four-flux models to solve the scattering transfer equation; special cases [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(7):1122~1128
 - 10 M. Czerwinski, J. Mroczka, T. Girasole *et al.*. Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions, 1. Direct problem; hybrid-method approximation [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9):1514~1524
 - 11 Qiang Fu, Wenbo Sun. Mie theory for light scattering by a spherical particle in an absorbing medium [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9):1354~1361
 - 12 Wu Zhensen, Wang Yiping. Study of scattering of plane wave through discrete random medium by direct analogue and statistical estimation [J]. *Acta Physica Sinica*, 1988, **37**(4):698~704
吴振森,王一平. 直接模拟法和统计估计法研究平面波通过离散随机介质的散射[J]. 物理学报, 1988, **37**(4):698~704
 - 13 Wu Zhensen, Yan Yi, Chen Lihong. Monte Carlo simulation for millimeter wave propagation and scattering in rain medium [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 1992, **13**(7):981~994