

红外波在沙尘暴中的后向散射增强

杨瑞科, 朱传帅, 刘科祥

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 为了提高沙尘暴中红外系统的精度, 应用电磁波在离散随机介质中传播的多重散射理论, 分析红外波在沙尘暴中传播时的后向散射增强机理, 给出了沙尘暴单位体积的粒子数随能见度变化的关系式, 对于可见到远红外波, 研究其在不同能见度的沙尘暴中传播时的多重散射效应引起的后向散射增强。结果表明对于不同波长的波, 其后向散射增强不同。沙尘暴的能见度越低, 后向散射增强越显著。不同类型的沙尘暴, 粒子尺度分布不同; 在一定能见度时, 单位体积中粒子数越多的沙尘暴, 后向散射增强越大; 在一定的粒子数密度时, 含大粒子数越多的沙尘暴, 后向散射增强越显著, 尤其是波长较长波的后向散射增强更明显。即, 沙尘暴的能见度越低, 单位体积中的粒子数越多, 包含较大粒子数目较多时, 后向散射和增强就越显著, 则对红外系统的影响就越严重。

关键词: 红外波段; 沙尘暴; 多重散射; 后向散射增强

中图分类号: O436.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0104006

Backscattering enhancement for infrared wave in sand and dust storm

Yang Ruike, Zhu Chuanshuai, Liu Kexiang

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to improve the precision of infrared systems in sand and dust storms, by using the multiple scattering theory of electromagnetic wave propagation in discrete random medium, the backscattering enhancement mechanism was analyzed for infrared wave propagating in sand and dust storms. The formula about the relation of the particle number per unit volume and atmosphere visibility was presented in sand and dust storms. From visible light to far infrared wave, the backscattering enhancement caused by multiple scattering in sand and dust storms was researched for different visibilities. The results show that the backscattering enhancement for different wavelength waves is different. The lower visibility in sand and dust storms, the stronger backscattering enhancement is. For different types of sand and dust storms, the particle size distribution is different. At a given visibility, the particle number per unit volume is larger, the backscattering enhancement are stronger. At a given particle number density, the number of the larger size particles is larger, the backscattering enhancement is stronger. Especially, the enhancement for the longer wavelength wave is more obvious. That is, the

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-20

基金项目: 电磁环境特性及模化技术国家重点实验室资金(901130314); 陕西省自然科学基金项目(2016JM1026)

作者简介: 杨瑞科(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事随机介质中电磁(光)波散射和传播及大气信道特性方面的研究工作。

Email: yrk1868@163.com

lower visibility, the larger number per unit volume, and the more the larger size particles, the backscattering and enhancement is stronger in sand and dust storms, and the effect on infrared systems is severer.

Key words: infrared wave; sand and dust storm; multiple scattering; backscattering enhancement

0 引言

为了使干旱沙漠地区的红外光学系统能够全天候的工作,应对恶劣的沙尘大气环境,就必须开展沙尘暴环境下的红外信号的散射、衰减和多重散射特性,为系统性能的分析 and 评估提供依据。关于微波和毫米波在干旱和半干旱的沙漠化地区的沙尘大气中传播的散射和衰减研究已经开展了好些工作^[1-4],而对于红外波在沙尘暴大气环境中传播和散射的研究,相对开展的较少,近些年来,主要研究工作集中在包含较大沙漠化地区的中国、美国和非洲等一些国家和地区^[5-8],随着光通信和激光雷达技术的发展和运用,使得该方面的研究愈来愈热。然而,有关红外光在沙尘暴大气中传播的多重散射及其影响的研究开展的还是相对要少^[9-10],文中就对红外光波在沙尘暴中传播的多重散射效应引起信号的后向散射增强特性进行研究,可为提高沙尘暴大气环境下红外雷达、成像等系统的性能提供一些依据。

当沙尘暴发生时,能见度一般较低,红外信号在其中传播时,仅考虑简单的单次散射预测其传播特性会产生较大的误差,因此,必须考虑沙尘暴的多重散射效应。离散随机分布粒子的多重散射不仅会使光传输的衰减有所改变,而且,会使后向散射有增强效应。稠密离散随机介质对光波的后向散射增强从理论和实验上都已经开展了一些研究工作^[11-12],大气中离散随机分布粒子的多重散射效应引起的后向散射增强研究还不多^[13]。然而对于工作于占世界上陆地近三分之一的干旱沙漠化地区的红外激光雷达、红外成像及红外遥感系统等,沙尘暴对红外波传输的影响是最关键的因素之一,沙尘暴的后向散射增强会降低系统的信杂比,分辨率等,因此,红外信号在较低能见度的自然沙尘天气和沙尘暴中传输的多重散射和后向散射增强效应研究对激光雷达等系统在干旱沙漠化地区全天候的工作具

有重要的实际意义。

1 后向散射增强机理

雷达发射天线发射一束波束,入射到空间弥散的离散随机介质并经其散射和透射,其中一部分被雷达接收机接收天线所接收。由于随机介质的单次散射和多重散射,到达接收机的散射场是经过介质各阶散射场之和,多重散射对接收信号有贡献的是相互共轭的散射场共轭对,包括散射场和其自身共轭场及经过相干路径的散射场^[11-12],其简化机理分别如图 1(a)和图 1(b)所示。图 1(a)中,从 T 发射的入射场 E_A 分别经过粒子 a 和 b 的散射到达接收机 T ,接收信号中有 $\langle E_A E_A^* \rangle$ 贡献的成分,即介质的二阶散射项,用 $L2$ 表示,其中 2 表示 E_A 经过两次散射的二重散射。图 1(b)中 E_A 分别经过粒子 b 和 a 的散射到达接收机, E_B 分别经过 a 和 b 散射到达接收机,忽略介质粒子随机运动产生的附加相位变化,由于 E_A 和 E_B 经过介质中相同路径上同样粒子的散射,故后向方向上散射场互为共轭场,散射波会产生相长干涉,其值 $\langle E_A E_B^* \rangle$ 作为接收信号一部分,使得接收信号增强,该项为干涉项,用 $C2$ 的表示,同样的, 2 表示 E_A 、 E_B 各经过两次散射。若偏离后向的角度越大, $C2$ 越小,直至趋于零。

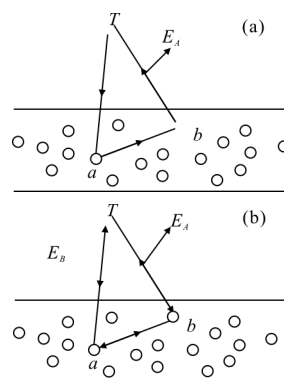


图 1 二阶散射项和干涉项示意图
Fig.1 Second order scattering term (a) and interference term (b) diagrams

当平面波入射到厚度为 d 的离散随机分布介质

层中时,如图 2 所示,区域 0 中接收到的介质散射回

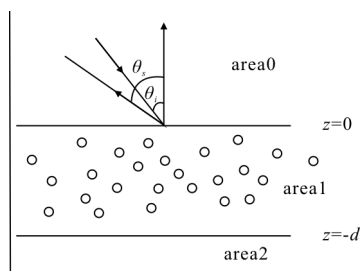


图 2 离散随机介质对电磁波的散射

Fig.2 Scattering of electromagnetic wave in discrete random medium

波包括离散介质多重散射中的散射项和干涉项,分别用下标 L 和 C 表示,则,雷达散射系数为两项的和,可表示为^[11-12]:

$$\gamma(\mu_s, \mu_i) = \gamma_L(\mu_s, \mu_i) + \gamma_C(\mu_s, \mu_i) \quad (1)$$

式中: $\mu_i = \cos \theta_i$, $\mu_s = \cos \theta_s$, θ_i 为波束入射角; μ_s 为散射角。

散射项 $\gamma_L(\mu_s, \mu_i)$ 表示为:

$$\begin{aligned} \gamma_L(\mu_s, \mu_i) = & \frac{\tilde{\omega}}{\mu_i} \frac{1}{\frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_s}} \{1 - \exp[-\tau_d (\frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_s})]\} + \\ & \frac{\tilde{\omega}}{\mu_i} \int_{-\tau_d}^0 d\tau' \exp(\frac{\tau'}{\mu_s}) J_s(\tau') \end{aligned} \quad (2)$$

式中: τ_d 为介质的光学厚度; $\tilde{\omega}$ 为平均反照率; 函数 $J_s(\tau)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} J_s(\tau) = & \frac{\tilde{\omega}}{2} \int_{-\tau_d}^0 d\tau' E_1(|\tau - \tau'|) J_s(\tau') + \\ & \frac{\tilde{\omega}}{2} \int_{-\tau_d}^0 d\tau' E_1(|\tau - \tau'|) \exp(\frac{\tau'}{\mu_i}) \end{aligned} \quad (3)$$

干涉项 $\gamma_C(\mu_s, \mu_i)$ 表示为:

$$\begin{aligned} \gamma_C(\mu_s, \mu_i) = & \frac{1}{\mu_i} \int_{-\tau_d}^0 d\tau_1 \int_{-\tau_d}^0 d\tau_2 [\frac{\tilde{\omega}}{2} W(|\tau_1 - \tau_2|); \alpha] + \\ & \Gamma(\tau_1, \tau_2; \alpha) \cos[\frac{k}{k_e} (\mu_s - \mu_i) (\tau_1 - \tau_2)] \times \\ & \exp[\frac{1}{2} (\frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_i}) (\tau_1 + \tau_2)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中函数 $\Gamma(\tau_1, \tau_2; \alpha)$ 表示为:

$$\begin{aligned} \Gamma(\tau_1, \tau_2; \alpha) = & \frac{\tilde{\omega}^3}{4} \int_{-\tau_d}^0 d\tau W(|\tau_1 - \tau|; \alpha) W(|\tau - \tau_2|; \alpha) + \\ & \frac{\tilde{\omega}^4}{8} \int_{-\tau_d}^0 d\tau \int_{-\tau_d}^0 d\tau' W(|\tau_1 - \tau|; \alpha) \times W(|\tau' - \tau_2|; \alpha) \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W(|\tau - \tau'|; \alpha) + & \frac{\tilde{\omega}^2}{4} \int_{-\tau_d}^0 d\tau \int_{-\tau_d}^0 d\tau' W(|\tau_1 - \tau|; \alpha) \times \\ & W(|\tau' - \tau_2|; \alpha) \Gamma(\tau, \tau'; \alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

函数 $W(\tau; \alpha)$ 的表达式为:

$$W(\tau; \alpha) = \int_1^\infty dt \frac{\exp(-\tau(\alpha^2 + t^2)^{1/2})}{(\alpha^2 + t^2)^{1/2}} \quad (6)$$

当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, $W(\tau; \alpha)$ 就简化为 $E_1(\tau)$, 即

$$E_1(\tau) = \int_1^\infty dt \frac{\exp(-\tau t^2)^{1/2}}{t} \quad (7)$$

由于 $\gamma_L(\mu_s, \mu_i)$ 和 $\gamma_C(\mu_s, \mu_i)$ 都取决于 $W(\tau; \alpha)$ 函数, 则称 $W(\tau; \alpha)$ 为核函数, 其中 α 表示散射方向与后向散射方向的偏差角度, 表示为:

$$\begin{aligned} \alpha = & \frac{k}{k_e} \{(\sin \theta_s \cos \phi_s + \sin \theta_i \cos \phi_s)^2 + \\ & (\sin \theta_s \sin \phi_s + \sin \theta_i \sin \phi_s)\}^{1/2} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: k 为介质中的波数; k_e 为单位体积中粒子的消光截。

在多重散射(假设 n 阶)情况下, 对于 n 阶雷达散射系数是各阶散射系数之和, 而对于单次的一阶散射, 没有干涉 γ_C^1 项, 即有:

$$\gamma^n(\mu_s, \mu_i) = \sum_{i=1}^n \gamma_L^i(\mu_s, \mu_i) + \sum_{i=2}^n \gamma_C^i(\mu_s, \mu_i) \quad (9)$$

在文中的数值计算分析中考虑二重散射情况, 取 $n=2$, 有:

$$\gamma^2 = \gamma_L^1 + \gamma_L^2 + \gamma_C^2 \quad (10)$$

即仅考虑入射波在随机介质中经过粒子的单次散射和二阶多重散射情况的雷达散射系数, 研究红外激光雷达信号在沙尘暴中传播的后向散射增强效应。

2 沙尘的物理特性

沙尘暴中沙尘粒子尺度半径一般在 0.001~0.2 mm 的范围内, 各个粒子半径间隔内的粒子数可用基于测量数据拟合的粒子尺度分布函数来表示。常用描述沙尘暴的粒子尺度分布函数为对数正态粒子尺度分布函数^[14-15], 其表示式为:

$$n(D) = \frac{N_0}{\sigma D \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln D - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (11)$$

式中: N_0 为单位体积中平均粒子数 ($1/m^3$), μ 和 σ 为 $\ln D$ 的均值和标准方差。不同类型的沙尘和沙尘暴,

其对数正态参量 μ 和 σ 就不同, 给出两种典型类型沙尘暴的对数正态粒子尺度分布的参量, 风扬沙尘暴^[14]的 $m=\ln(0.0273)$, $\sigma=\ln 2$; 腾格里沙尘暴^[15] $m=-2.31$, $\sigma=0.296$ 。自然风扬沙尘暴是刮风引起的沙尘暴经过风的输运离开了起源的沙漠地区后的沙尘暴, 文中称为风扬沙尘暴; 在腾格里沙漠地区起源形成的沙尘暴称腾格里沙尘暴。

研究红外波在沙尘暴中传播和散射特性时, 必须要已知粒子的介电常数或折射率。为了计算和比较方便起见, 认为两种沙尘暴中沙尘粒子的折射率是一致的, 在表 1 中给出了几个红外波段干沙尘粒子的折射率^[16-17]。

表 1 红外波段干沙尘粒子的折射率

Tab. 1 Refractive index of dry sand and dust particles in infrared waveband

Wavelength/ μm		30	11	3.8	1.064	0.532
Refractive index	Real part	1.8	1.62	1.25	1.53	1.53
	Imaginary part	0.42	0.105	0.016	0.008	0.008

沙尘暴粒子尺度分布中的单位体积中粒子数为 N_0 ($1/\text{m}^3$), 在文献中一般给出的是一个估计或测量的平均值^[15]。由于沙尘暴的强弱程度不一样, 其 N_0 也应该不一样。通常沙尘暴大气的强弱可用光学能见度 V_b 来描述, 当考虑介质中的波传播、散射和消光时, 也可用光学厚度来描述。因此, N_0 应该与光学能见度有关, 经过推导给出了不同强度沙尘暴中 N_0 与能见度有关的表示式:

$$N_0 = \frac{15}{4.343V_b} \int p(r)\sigma_t(r)dr \cdot 10^3 \quad (12)$$

式中: V_b 为大气能见度(km); $p(r)=n(r)/N_0$ 为沙尘暴中粒子取半径 r 的归一化概率; $\sigma_t(r)$ 为半径为 r 的粒子的消光界面, 可用平均值 $\bar{\sigma}_t$ 表示为:

$$N_0 = \frac{15}{4.343V_b \bar{\sigma}_t} \cdot 10^3 \quad (13)$$

也可应用沙尘暴的特征衰减 A_s (单位 dB/km) 表示为:

$$N_0 = \frac{A_s}{4.343 \bar{\sigma}_t} \cdot 10^3 \quad (14)$$

该式应用于衰减实验测量中反演不同能见度大气中单位体积粒子数时很方便。如果在计算粒子消光界面时

应用大粒子几何截面的近似时, 即有 $\lambda \ll r$ 条件成立时, 就会有如下近似的表示形式:

$$N_0 = \frac{550}{V_b r^2} \cdot 10^3 \quad (15)$$

因此, 在计算分析中, 需考虑 N_0 随沙尘暴能见度及沙尘暴的光学厚度的变化。

3 沙尘暴后向散射增强

为了研究红外波段雷达信号在沙尘暴大气中的后向散射增强效应, 先对不同类型沙尘暴, 即不同粒子尺度分布的风扬沙尘暴和腾格里地区的沙尘暴的雷达散射系数进行分析。图 3 和 4 中给出了波长为 1.064 和 30 μm 的沙尘暴的一、二阶分量和二重散射的雷达散射系数随后向散射角的变化情况, 为了便于分析, 两者沙尘暴的单位体积中粒子数取 1.88×10^{16} 。图中 $L1$ 、 $L2$ 分别代表一、二阶散射项, 而 $C2$ 代表二阶干涉项, C 是三项之和, 即二阶雷达散射系数 γ^2 。

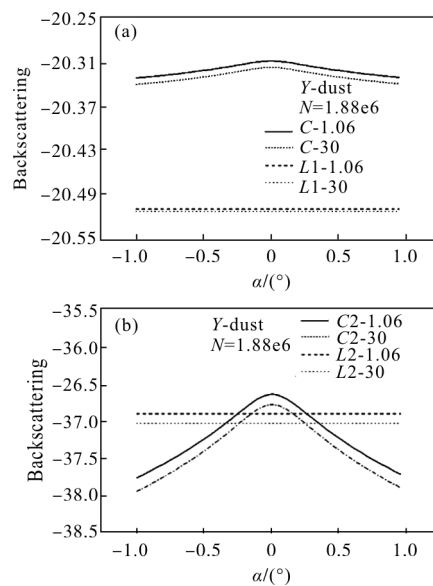
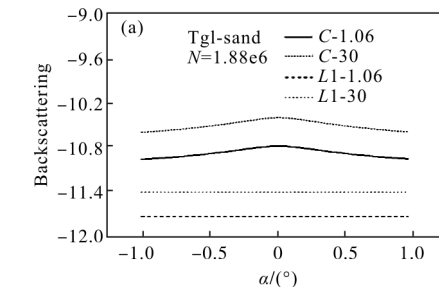


图 3 风扬沙尘暴二重散射的各阶雷达系数

Fig.3 Radar coefficients of dual scattering in wind blowing sand and dust storms



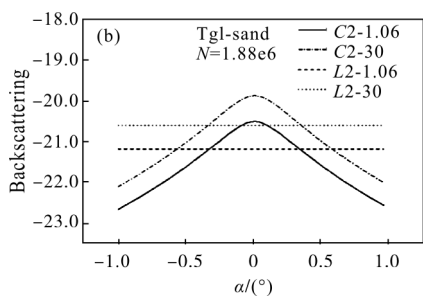


图 4 腾格里沙尘暴二重散射的各阶雷达系数

Fig.4 Radar coefficients of dual scattering in Tengger sand and dust storms

由图 3 和 4 可以看出, 单次散射 $L1$ 和二阶散射 $L2$ 不随散射角变化, 而二阶干涉散射项 $C2$ 随散射角变化显著, 在后向具有明显的增强现象, 故雷达散射系数在后向具有明显的增强, 而用辐射传输理论计算时并没有考虑这种情况的影响。从图 3 和图 4 的不同沙尘暴类型的比较可看出, 在单位体积粒子数 N 相同的情况下, 由于不同类型沙尘暴中粒子尺度分布不同, 使得沙尘暴的光学厚度不同, 因此, 对红外信号的散射强度有较大的差别, 后向散射增强也有显著的差别。腾格里沙尘暴中较大尺度的沙尘粒子含量较多, 散射和后向散射增强明显强于自然风扬沙尘暴大气的情况。

在图 5 和 6 中, 给出了风扬沙尘暴和腾格里沙尘暴在不同能见度条件下对 0.532、1.064、3.8、11 及 30 μm 几种波长信号的二阶总散射系数随后向散射角变化的结果。

从图 5 和 6 中的结果可清楚看出: 沙尘暴能见

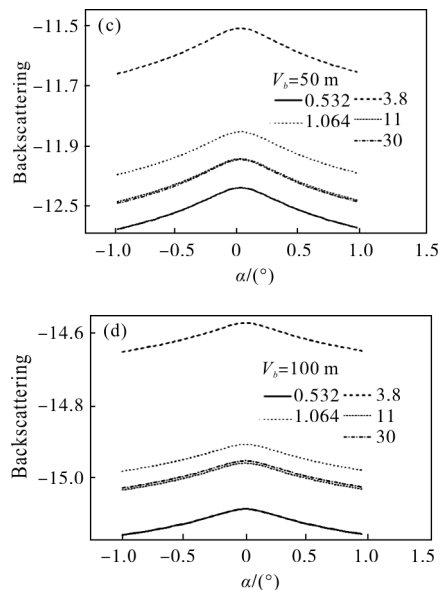
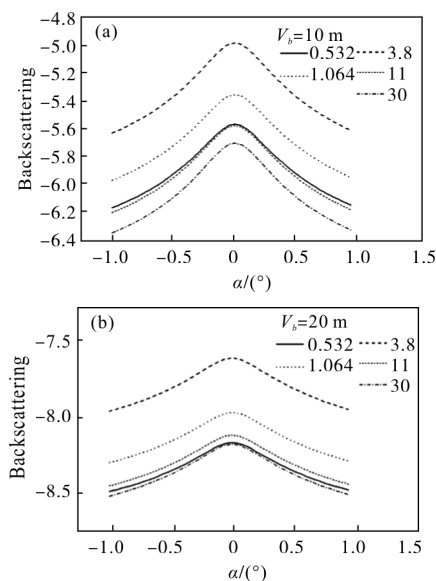


图 5 风扬沙尘暴的总散射系数随后向散射角的变化

Fig.5 Change of total scattering coefficients with backscattering angles in wind blowing sand and dust storms

度对散射及后向散射影响很大, 能见度小时, 介质的光学厚度大, 因此介质对光损耗和散射增强, 后向散射增强也显著, 如 $V_b=10\text{ m}$ 的结果比 $V_b=100\text{ m}$ 的结果约大 10 dB 左右。

再就是沙尘暴的类型、即沙尘暴中粒子尺度的分布对散射影响也很大, 从图 5 风扬沙尘暴与图 6 腾格里沙尘暴的结果比较可看出: 在相同能见度的情况下, 含小尺寸粒子数目多的风扬沙尘暴较含大粒子数目多的腾格里沙尘暴的单位体积中的总粒子数要多, 因而, 在相同能见度的情况下, 使得小粒子

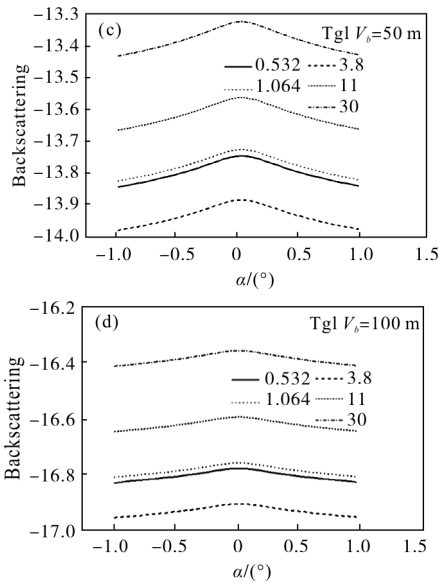


图 6 腾格里沙尘暴的总散射系数随后向散射角的变化
Fig.6 Change of total scattering coefficients with backscattering angles in Tengger sand and dust storms

数目占优、而单位体积中总粒子数多的沙尘暴的后向散射和增强要大,比较图 5 与图 6,图 5 的散射强。对于不同类型的沙尘暴,如果单位体积中粒子数目相同时,含大粒子数目较多的沙尘暴的后向散射要强的多,图 3 和图 4 的比较可看出:腾格里沙尘暴的后向散射要远大于风扬沙尘暴的散射。

对不同波长红外信号的散射分析可看出:图 5 中 3.8 μm 的最强,1.064 μm 的次之;而图 6 中则成为 30 μm 的最强,11 μm 的次之,这是由于随着沙尘暴中大尺寸粒子数目的增加,对波长较长的散射逐渐增强所致。

4 结论

研究表明:沙尘暴对红外雷达信号后向散射影响最主要的因素是沙尘暴能见度、沙尘暴中粒子尺度分布函数(即不同地区和不同类型的沙尘暴),对于沙漠地区的腾格里沙尘暴相对包含大粒子数目较多,则对波长较长的红外信号后向散射及增强大,而相对含小粒子数目较多的风扬沙尘暴,对近和中红外波长的散射较强。总之,红外波段信号在沙尘暴中传输时具有显著的后向散射增强,尤其在较低能见度的情况下,沙尘暴的后向散射增强对红外系统性能的影响必须考虑,这对于红外系统在干旱和半干旱的沙漠化地区的全天候应用具有重要的实际意义。

参考文献:

- [1] Alhuwaimel S, Mishra A, Inggs M. Review of radar signal attenuation due to sand and dust storms [C]//Proceeding of the 2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Application (ICEAA), 2012: 1096–1099.
- [2] Dong X Y, Chen Hsingyi, Guo D H. Microwave and millimeter wave attenuation in sand and dust storms [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 469–471.
- [3] Islam M R. Development of an empirical dust storm attenuation prediction model for microwave links in arid area –a proposed framework [C]//5th International Conference on Computer & Communication Engineering, IEEE, 2014, 224–227.
- [4] Abuhdima E M, Saleh I M. Effect of sand and dust storms on microwave propagation signals in southern Libya [C]// IEEE, 2010: 695–698.
- [5] Ke Su, Lothar Moeller, Barat Robert B, et al. Experimental comparison of terahertz and infrared data signal attenuation in dust clouds[J]. *Opt Soc Am A*, 2012, 29(11): 2360–2366.
- [6] Xu Wenzhong, Zhong Kai, Mei Jialin, et al. THz wave attenuation characteristics in sand and dust [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 523–527. (in Chinese)
许文忠, 钟凯, 梅嘉林, 等. 太赫兹波在沙尘中衰减特性 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 523–527.
- [7] Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. The absorption and extinction of infrared radiation in lower atmosphere by sand storm [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2003, 18(1): 43–47. (in Chinese)
李曙光, 刘晓东, 侯蓝田. 沙尘暴对低层大气红外辐射的吸收和衰减[J]. *电波科学学报*, 2003, 18(1): 43–47.
- [8] Wang Huiqin, Wang Yangang, Cao Minghua, et al. Influence of atmospheric visibility on laser pulse delay and broadening in sand and dust weather[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 9–16. (in Chinese)
王惠琴, 王彦刚, 曹明华, 等. 沙尘天气下能见度对光脉冲时延和展宽的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 9–16.
- [9] Yang Ruike, Ma Chunlin, Li Liangchao. Influence of multiple scattering on laser pulse propagation through sand and dust storm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(10): 1393–1397. (in Chinese)
杨瑞科, 马春林, 李良超. 沙尘暴多重散射对激光脉冲传输的影响[J]. *中国激光*, 2007, 34(10): 1393–1397.

- [10] Sun Xianming, Wang Haihua, Liu Wanqiang, et al. Nonspherical model for sand dust storm and its application to the research of light multiple scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1056–1059. (in Chinese)
孙贤明, 王海华, 刘万强, 等. 沙尘暴粒子的非球形模型及其对激光的多次散射特性研究 [J]. 光学学报 2010, 30(5): 1056–1059.
- [11] Kuga Y, Ishimaru A. Retroreflectance from a dense distribution of spherical particles[J]. *Opt Soc Am A1*, 1984, 1(8): 831–835.
- [12] Tsang L, Ishimaru A. Theory of backscattering enhancement of random discrete isotropic scatters based on the summation of all ladder and cyclical terms [J]. *Opt Soc Am*, 1985: 1331–1338.
- [13] Yang Ruike, Li Li, Ma Huihui. Effects of the backscattering enhancement considering multiple scattering in rain on MMW radar performance [J]. *Indian Journal of Radio & Space Physics (IJRSP)*, 2013, 42(6): 404–410.
- [14] Ahmed A S. Role of particle -size distributions on millimeter -wave propagation in sand and dust storms [J]. *IEEE Proceedings*, 1987, 134(1): 55–59.
- [15] Dong Qingsheng. Physical Characteristics of the sand and dust in different deserts of China [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1997, 12(1): 15–21. (in Chinese)
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.
- [16] Huang Peiqiang, Sheng Xia. A number of scattering characteristics of atmospheric aerosol particles in troposphere and stratosphere [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 1996, 16(3): 233–239. (in Chinese)
黄培强, 盛夏. 对流层与平流层大气气溶胶粒子的若干散射特性[J]. 气象科学, 1996, 16(3): 233–239.
- [17] Zhang Chengyi, Wei Banghai, Zheng Gaige, et al. Study on the characteristics of THz wave scattering in the troposphere [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(2): 204–208. (in Chinese)
张成义, 魏邦海, 郑改革, 等. 对流层太赫兹波散射特性研究 [J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 204–208.