

文章编号: 1001-3806(2009)03-0243-03

雾粒子散射对激光制导的影响研究

刘建斌

(华南农业大学 理学院, 广州 510642)

摘要: 为了研究雾粒子散射对激光制导的影响,提高制导武器的制导精度。基于 Mie 理论,考虑粒子尺度分布函数,得到了群体粒子散射模型,在该基础上,建立了目标方位偏差角与散射光强的关系式,从粒子散射的角度分析了粒子散射光强对回波信号的影响。计算表明,大气粒子在一定的尺度分布状况下的后向散射光强对回波信号的影响比较明显。该研究结果为大气微粒后向散射对制导的影响研究提供了参考。

关键词: 大气与海洋光学;Mie 理论;散射模型;方位偏差角

中图分类号: TJ765.3 **文献标识码:** A

Study on effect of scattering of fog particles on laser-guidance

LIU Jian-bin

(College of Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to study the effect of the fog particles scattering on laser guidance and improve the guidance precision of guided weapons, based on Mie theory, considering the particle size distribution function, the scattering model of the group particles was obtained. With the help of the model, the relationship between the target position deviation angle and the scattering intensity was obtained and the effect of scattered light on the signal was analyzed from the view of scattering. The calculation showed that the echo signal was influenced obviously by the backscattered light from the atmospheric particles at a certain scale distribution. The results are valuable for the study on the effect of back scattering of atmospheric particles on the laser-guided precision.

Key words: atmosphere and ocean optics; Mie's theory; model for scattering; warp azimuth of target

引言

制导武器大多数都必须在地球的大气层内飞行,即使射程很远的洲际弹道式导弹,虽然它的弹道大部分都处于地球大气外层,但它必须穿越整个大气层,弹头命中目标前还必须再入大气层,因此,制导武器的飞行,同地球大气密切相关。掌握大气对制导的影响是整个制导武器系统中十分重要的一个环节。对于工作在红外或近红外波段的制导武器,大气粒子的散射和吸收是影响制导精度的主要原因。由于光在大气中传输时,当传输距离较短时,大气粒子对光的作用主要是粒子的散射^[1]。大气对光的吸收可以忽略不计,大气对光能的衰减就可以看作是只由散射引起的。因此,研究大气粒子在不同能见度,不同分布状况下对光的散射情况是一项有意义的事情。作者研究了大气粒子

在不同分布状况下的后向散射光强对激光制导的影响。主要讨论散射光强与方位偏差角之间的关系。

1 理论基础

1.1 Mie 理论

1908年, MIE 通过电磁波的麦克斯韦方程,解出了一个关于光散射的严格解,得到任意直径、任意成分的均匀粒子的散射规律,即著名的米氏理论^[2]。

Mie 理论假设所有的大气粒子为均匀球形粒子,由于就粒子的随机取向平均而言,众多粒子的行为接近等效球形粒子^[3],所以,为了简化问题,不妨设大气是由不同尺度、相同折射率的球形粒子组成的。

如图 1 所示,坐标原点处有一折射率为 m 的颗粒

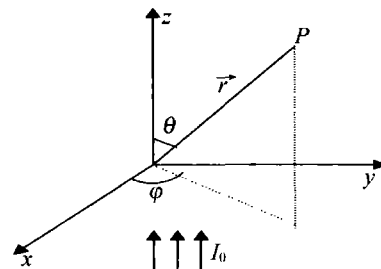


Fig. 1 The scattering of spherical particles

基金项目:华南农业大学校长基金资助项目(4900-K06168)

作者简介:刘建斌(1974-),男,博士,讲师,主要从事激光大气传输特性的研究。

E-mail: liujianbin@scau.edu.cn

收稿日期:2008-03-04;收到修改稿日期:2008-05-26

被波长为 λ 的非偏振单色光 I 照射,使它向空间任意方向发出散射光。图中 P 为观察点, \vec{r} 为散射点与观察点 P 的矢径, \vec{r} 与 z 轴组成的平面为散射面, θ 为散射角, φ 为入射光振动面与散射面间夹角。

P 点的散射光强为^[4,5]:

$$I_{si} = \frac{\lambda^2 I_0}{8\pi^2 r^2} [i_1(\theta) + i_2(\theta)] \quad (1)$$

散射函数为: $i_1(\theta) = |s_1(\theta)|^2, i_2(\theta) = |s_2(\theta)|^2$ 。

散射振幅函数:

$$s_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (\pi_n a_n + \tau_n b_n) \quad (2)$$

$$s_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (\tau_n a_n + \pi_n b_n) \quad (3)$$

式中, π_n, τ_n 为缔合勒让德函数的微分式, a_n, b_n 称为米氏系数:

$$a_n = \frac{\psi_n(x)\psi_n'(mx) - m\psi_n'(x)\psi_n(mx)}{\zeta(x)\psi_n'(mx) - m\zeta_n'(x)\zeta_n(mx)} \quad (4)$$

$$b_n = \frac{m\psi_n(x)\psi_n'(mx) - \psi_n'(x)\psi_n(mx)}{m\zeta_n(x)\zeta_n'(mx) - \zeta_n'(x)\psi_n(mx)} \quad (5)$$

式中, ψ_n 和 ζ_n 是黎卡地-贝塞耳函数。 $k = \frac{2\pi}{\lambda}, x = \frac{\pi d}{\lambda}$,

其中, λ 是入射光波长, d 为颗粒直径。

1.2 粒子尺度分布

大气对光的散射包括大气分子、小粒子、大粒子和液粒等同时进行的散射。当能见度较低时,主要考虑烟、尘、霾、雾、雨等大粒子散射。为了便于讨论,把大气分子、小粒子、大粒子和液滴统称为大气气溶胶粒子。通常用粒子尺度分布函数来描述气溶胶粒子在大气中分布情况。作者选取雾粒子作为研究对象。目前公开发表的雾粒子尺度分布模式很多,而大家公认的雾滴谱分布是朱氏和霍格在 1968 年提出的用修正 Γ 函数来描述稳定状态的雾滴谱分布^[6]:

$$n(r) = A(r/r_m)^\alpha \exp[-B(r/r_m)^\beta] \quad (6)$$

式中, $A = (\alpha/\beta)^{(\alpha+1)/\beta} \cdot \{\beta/\Gamma[(\alpha+1)/\beta]\} \cdot (N_0/r_m)$, $B = \alpha/\beta, N_0$ 为单位体积内的粒子数, r_m 为液滴谱众数半径, α, β 为两个可调整的经验参量。 r_m 的数值可以从度量或计数粒子的有关实验资料中得到,通过调整参量 α, β 来描述实际被观察的粒子的谱分布。

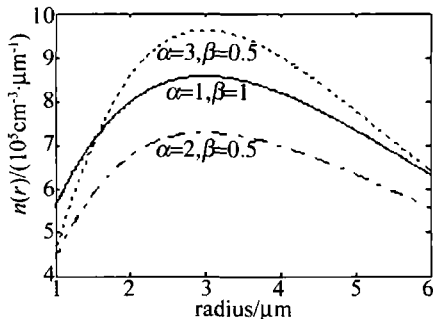


Fig. 2 The relation between α, β and different size particles $n(r)$

图 2 所示为不同 α, β 值时,利用修正 Γ 函数来描述粒子的分布情况。

2 散射模型

作者讨论的是激光束通过有雾分布的大气时,在不考虑雾粒子吸收且粒子折射率为一实常数的情况下,在接收器视场角 Ω 内传播路径上的雾粒子的散射情况,如图 3 所示。激光器发出的激光束在传播路径

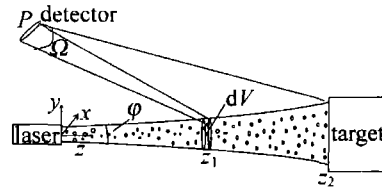


Fig. 3 The scattering diagram of the laser beam scattered by the atmospheric particles

中被束内的群体粒子散射,在激光器的出光端面上建立如图直角坐标系,以 z 轴方向为激光的传播方向。在入射波长、发散角、粒子折射率一定的情况下,散射光强是粒子尺度和传播路径的函数。

为方便,激光束可看作高斯光束,设高斯光束的束腰位于 $z=0$ 的平面,且原点处光场的振幅为 1 则空间光场 $\phi(r)$ 可表示为^[7]:

$$\phi(r) = \frac{w_0}{w} \exp(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}) \exp(i\varphi) \quad (7)$$

式中, $w = w_0 \sqrt{1 + (2z/kw_0^2)^2}, w_0 = 2\lambda/(\pi\varphi), w_0$ 为高斯光束的光腰半径, φ 为发散角。

在传播路径中取一微元 dV ,当发散角很小时,体积元 dV 可看作一很小的圆柱体。则有:

$$dV = \pi w^2 dz \quad (8)$$

则对于体积 dV 内的粒子数可写为^[8]:

$$N = \int_0^\infty n(r) dr \quad (9)$$

接收器视场角 Ω 内激光器照射的体积为:

$$V = \int_{z_1}^{z_2} \left(\frac{4\lambda^2}{\pi\varphi^2} + \frac{z^2\pi\varphi^2}{4} \right) dz \quad (10)$$

视场角与散射角之间的关系为^[9]:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{pz_2}{z_1 z_2} \sin\Delta\Omega\right), (0 \leq \Delta\Omega \leq \Omega) \quad (11)$$

由以上各式可得,在接收器视场角 Ω 内粒子对接收器的散射光强 I_s 为:

$$I_s = \int_{z_1}^{z_2} \int_0^\infty \left(\frac{4\lambda^2}{\pi\varphi^2} + \frac{z^2\pi\varphi^2}{4} \right) \cdot I_{si}(\theta) \cdot n(r) dr dz \quad (12)$$

式中, $I_{si}(\theta)$ 为单个雾粒子的散射光强,由 (11) 式和 (12) 式知, I_s 为视场和散射角的函数。

此散射模型的条件是:在假设粒子散射是独立散射的条件下,不考虑各个粒子散射光之间的相互影响。

于是在此散射模型基础上,可以得到群体粒子散射光强在探测器光敏面上的分布情况。

3 四象限探测器光敏面上的光强分布

激光导引头、激光经纬仪等光电跟踪仪器中常用四象限探测器件作为光电传感器,探测目标的方位。跟踪过程中,来自目标的光信号经光学系统汇集投射在四象限探测器的光敏面上,形成目标像斑。四象限探测系统就是通过目标像斑在4个象限上的分布状况来解算目标相对跟踪系统光轴的方位偏差角。理想的探测系统希望系统解算出的偏差数据与目标相对四象限中心的实际偏差呈线性关系。然而由于各种因素的限制,理想条件很难得到。作者仅就大气粒子散射对激光制导的影响进行分析,讨论了散射光强与方位偏差角之间的关系,没有考虑其它因素对方位偏差角的影响。

图4中A,B,C,D表示4个性能完全一致、紧密靠在一起的光电探测器,小圆圈表示目标光斑。当目标

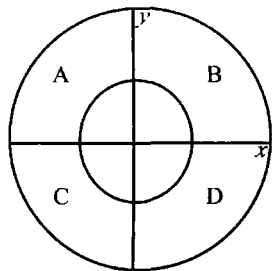


Fig. 4 Four-quadrant-photo-detector (FQPD)

被瞄准时,目标光斑正好处于四象限探测器光敏面的中心,由于大气及各种因素的影响,目标光斑在4个象限的分布面积会发生变化。如图5所示。

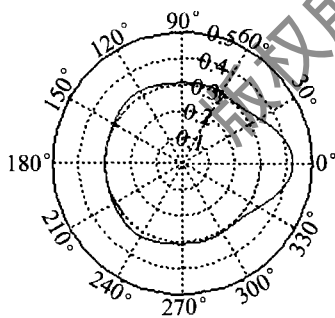


Fig. 5 The distribution of target spot on the probe surface of the four-quadrant-photo-detector

考虑群体粒子散射光强对目标光斑的影响后,为了得到目标光斑在探测器光敏面上的分布情况。在散射模型的基础上,利用 MATLAB 输入下列参量进行了计算机模拟如图5所示。入射光强 $I_0 = 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 入射波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 雾粒子折射率 $m = 1.33$, 激光束发散角 $\varphi = 4 \text{ mrad}$, 接收器视场角 $\Omega = 30^\circ$, 接收器到群体雾粒子体积元 dV 的距离 $r = 100 \text{ m}$, 群体雾粒子的直径 $d = 2 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$, 两个可调整参量 $\alpha = \beta = 1$; 单位

体积粒子数 $N_0 = 7 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$; 滴谱众数半径 $r_m = 3 \text{ mm}$; 激光器到群体雾粒子体积元 dV 的距离 $L = 150 \text{ m}$ 。不妨设目标回波光强 $I_t = 0.2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

图5中虚线表示不考虑各种影响因素时,目标光斑在探测器光敏面上的分布;实线表示考虑大气粒子的散射影响时,目标光斑在探测器光敏面上的分布。目标光斑在探测器光敏面上分布变化的原因是多方面的,粒子的散射光强的影响是原因之一。

4 方位偏差角与散射光强的关系

根据四象限加减法,可以得到偏差数据在 x 方向和 y 方向的分量。其表达式为:

$$E_x = \frac{I_A + I_D - I_B - I_C}{I_A + I_B + I_C + I_D}, E_y = \frac{I_A + I_B - I_C - I_D}{I_A + I_B + I_C + I_D} \quad (13)$$

式中, I_A, I_B, I_C, I_D 分别表示考虑粒子散射影响后在4个象限上光强值(图中没标出)。如果只考虑雾粒子的散射的影响,则很明显有:

$$I_A + I_B + I_C + I_D = I_s + I_t \quad (14)$$

式中, I_s 为群体雾粒子的散射光强, I_t 为目标回波光强。

由于考虑的是均匀分布的球形粒子,根据粒子散射的对称性,显然有 $E_y = 0$, 因此只要考虑 x 方向的偏差数据与方位偏差角之间的关系。方位偏差角与偏差数据之间的关系为^[10]:

$$\sigma = \kappa E_x \quad (15)$$

式中, σ 表示方位偏差角, $\kappa = \frac{I_A + I_D}{I_B + I_C}$ 是比例因子。

不妨设偏差数据只是由大气粒子散射引起的,很明显,粒子散射越强,偏差数据就越大。因此,可以建立它们之间的关系式:

$$E_x = \mu \frac{I_s}{I_t + I_s} \quad (16)$$

于是方位偏差角与散射光强之间的关系为:

$$\sigma = \xi \frac{I_s}{I_t + I_s} \quad (17)$$

式中, $\xi = \kappa \mu$ 为散射因子,它可以在各种大气条件下通过多次实验来确定。例如,通过多次实验可以建立不同能见度,不同粒子分布情况下的散射光强所对应的 ξ 值查询表。

5 结论

目标方位角是制导系统中一个很重要的参量,对于四象限探测器来说,影响目标方位角的因素有许多,如目标对比度、激光参量、观测视场、观测距离等都对目标方位偏差角有影响,当然,大气散射光强的影响是

(下转第255页)

积直接镀 Fe-C 合金和化学镀金属两个方法存在的缺陷和物理气相沉积离子溅射金的相对优点;(3)在腐蚀实验的数据记录上,提出以 Fe-C 合金膜被腐蚀掉的厚度为横坐标对输出光功率进行记录,并设计了计算腐蚀掉的厚度的方法,最后提出了一个对腐蚀实现定量监测的方案。

参 考 文 献

- [1] WOODRUFF M W, SIRKIS J S. Corrosion sensing of aluminum using optical fiber [J]. SPIE, 1994, 2191: 511-515.
- [2] RUTHERFORD P, IKEGAMI R, SHRADER J. Aluminum alloy clad fiber optic corrosion sensor [J]. SPIE, 1997, 3042: 248-259.
- [3] FUHR P L, HUSTON D R, MCPADDEN A J, *et al.* Embedded chloride detectors for roadways and bridges [J]. SPIE, 1996, 2719: 229-237.
- [4] BENOUNIS M, JAFFREZIC-RENAULT N. Elaboration of an optical fibre corrosion sensor for aircraft applications [J]. Sensors and Actuators, 2004, B100(1/2): 1-8.
- [5] BAO J L, ZHANG J M, CHEN K Sh, *et al.* Processes and application of fiber grating sensor [J]. Laser Technology, 2000, 24(3): 174-179 (in Chinese).
- [6] LI X M, CHEN W M, HUANG Z Q, *et al.* Fiber optic corrosion sensor fabricated by electrochemical method [J]. SPIE, 1998, 3330: 18-20.

- [7] DONG S Y, LIAO Y B, ZHANG M. Effects of chemical modification on fusion splicing of optical fiber and preparation of fiber corrosion sensor [J]. SPIE, 2004, 5579: 213-220.
- [8] LI X M, ZHANG Sh T, HUANG Z Q, *et al.* Fiber optics sensing technique for monitoring corrosion of steel in reinforced concrete [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1999, 11(3): 169-173 (in Chinese).
- [9] LI X F, YU H H, JIANG D Sh, *et al.* Electroless Ni-plating on quartz optical fiber [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2003, 1(2): 33-35 (in Chinese).
- [10] RUTHERFORD P, IKEGAMI R, SHRADER J. Novel NDE fiber optic corrosion sensor [J]. SPIE, 1996, 2718: 158-169.
- [11] LI X M, CHEN W M, HUANG Z Q, *et al.* A new type of fiber optic corrosion sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 1999, 12(3): 176-180 (in Chinese).
- [12] LI X J, LIN W Sh, FAN P, *et al.* Research on an optical fibre sensor for reinforcement corrosion [J]. Measurement & Control Technology, 2001, 20(8): 10-13 (in Chinese).
- [13] BENOUNIS M, JAFFREZIC-RENAULT N, STREMSDOERFER G. Elaboration and standardization of an optical fibre corrosion sensor based on an electroless deposit of copper [J]. Sensors and Actuators, 2003, B90(1/3): 90-97.
- [14] DONG S Y, LIAO Y B, TIAN Q. Study on different preparing methods of the metallized fiber core for optical fiber corrosion sensor [J]. SPIE, 2005, 5634: 627-633.

(上接第 245 页)

因素之一,作者抛开其它因素的影响,仅讨论了大气散射光强对目标方位偏差角的影响,初步分析了散射光强使目标光斑偏离中心产生一个方位偏差角,得到了一定条件下方位偏差角与散射光强的关系式,从而影响制导精度。为大气散射对制导的影响提供了参考。

参 考 文 献

- [1] PARK S O, LEE S S. Forward far-field pattern of a laser beam scattered by a water suspended homogeneous sphere trapped by a laser beam [J]. J O S A, 1987, A4(3): 417-422.
- [2] WU J, LE S X. The theory of light propagating in the random medium [M]. Chengdu: Chengdu College of Electronic and Communicative Engineering Press, 1988: 18-20 (in Chinese).
- [3] XU X Z. The basis theory of the atmosphere physics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 36-40 (in Chinese).
- [4] PROBER-JONES J R. Resonance component of backscattering by

large dielectric spheres [J]. J O S A, 1984, A1(8): 822-830.

- [5] LIU J B, WU J. Scattering and polarization properties of a complex refractive index spherical particles [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 66-67 (in Chinese).
- [6] van de HULST H C. Light scattering by small particles [M]. New York: Wiley, 1957: 32-40.
- [7] ZHOU B K, GAO Y Z, CHEN T R, *et al.* The principle of laser [M]. 4th ed. Beijing: National Defence Press, 2000: 121-125 (in Chinese).
- [8] IVASIV I B. Regularization of size spectrum reconstruction problem for intensive absorbing particles by the errors of light scattering models [C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference. Brussels: IEEE, 1996: 1174-1177.
- [9] LIU J B, WU J. Light scattering model and angular spectrum of scattering intensity in fogs [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(3): 355-358 (in Chinese).
- [10] AN K, WANG H M, REN G, *et al.* A new angle-measurement algorithm of the detector with four quadrants [J]. Laser & Infrared, 2001, 31(6): 328-329 (in Chinese).