

·光电探测·

单脉冲激光散射探测研究

陈晓斯, 樊祥, 程玉宝, 方义强

(电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要: 利用低空激光大气传输模型, 对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光在大气中传输时散射辐照度的分布进行了数值计算, 通过与相同条件下的激光器回波信号能量进行比较, 发现计算结果在理论分析上存在较大差异, 其原因是未考虑激光器的单脉冲特性。通过对在单脉冲工作方式下的激光散射能量公式进行改进, 提高了散射探测的计算精度。

关键词: 激光散射探测; 散射辐照度; 脉冲特性

中图分类号: TN241; O436.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-01-0012-04

Research on Detection of Single Pulse Laser Scattering

CHEN Xiao-si, FAN Xiang, CHENG Yu-bao, FANG Yi-qiang

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Based on low-altitude laser atmospheric transmission models, distributions of scattering irradiance of $1.06 \mu\text{m}$ laser in atmospheric transmission are calculated. By comparing with echo signal energy of lasers at the same conditions, calculation results are found to be different from the results of theoretical analysis. The reason is that single pulse characteristics of lasers are not considered. By improving the formulas of laser scattering energy at single pulse operation mode, the calculation accuracy of scattering detection is enhanced.

Key words: detection of laser scattering; scattering irradiance; pulse characteristic

激光发散角小, 脉宽较窄, 决定了其光斑直径通常很小, 在激光探测的典型情况下, 激光束一般不会直接入射到激光探测设备上, 需通过接收大气对激光的散射来探测激光^[1]。为了能够提高激光散射探测距离, 需计算到达探测器的散射激光照度。通过传统计算散射激光能量的方法所得的结果与理论计算激光指示器回波能量进行比较, 发现传统方法未考虑到激光的单脉冲特性, 因此, 对传统的计算方法进行了改进, 提高了散射探测精度。

1 传统激光大气气溶胶散射计算

激光在大气传输的过程中, 会受到气溶胶粒子

的散射, 为激光散射探测提供了必要的条件。光散射主要是瑞利散射和米氏散射。瑞利散射在紫外光谱和高空中起主要作用; 而米氏散射则在较低的高度上起主要作用, 是优先的散射源, 可产生相对较大的可用信号, 为激光散射探测提供必要的能量^[5-6]。因此主要考虑气溶胶粒子的 Mie 散射, 根据 Mie 散射理论, 设气溶胶的粒径分布范围为 $r_1 \sim r_2$ ^[7]。

1.1 低空激光大气传输模型

为了方便研究, 一般假设气溶胶粒子的大小分布不随高度变化, 但与地理环境和气象条件有关。假设在空气能见度为 23 km, 湿度为 75% 的都市郊区

收稿日期: 2012-12-25

作者简介: 陈晓斯(1988-), 男, 福建泉州人, 硕士, 主要从事光电工程方面的研究工作; 樊祥(1963-), 男, 安徽滁州人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电工程方面的研究工作。

低空,在陆地上空,气溶胶粒子大小的典型分布为^[7]

$$N(r) = \frac{0.3129}{r^4} \quad (1)$$

1.2 低空激光散射的能量分布计算

图1表示激光器和激光探测器的位置关系,其中激光器斜向下照射,激光探测器的视场朝上。其中 R 为激光器与探测器之间激光传输的轴向距离(以下简称激光传输距离), d 为探测器的离轴距离, θ 为探测器的视场角。

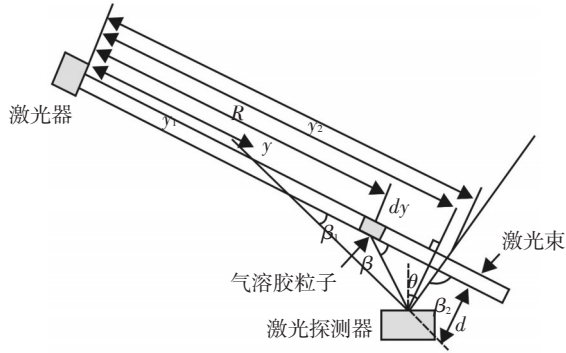


图1 激光器和探测器的位置关系图

假设激光器的波长为 λ ,出射功率为 P_t ,根据文献[8],在离轴距离为 d 时到达探测器的辐射照度可以表示为

$$E_s(d) = \frac{\lambda^2 P_t}{8\pi^2 d \cdot e^{aR}} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{(|S_1(\beta)|^2 + |S_2(\beta)|^2) \cdot \cos \beta}{e^{-a \cdot d(\csc \beta - \cot \beta)}} N(r) dr d\beta \quad (2)$$

其中, $S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n)$;

$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n)$;

$\pi_n = \frac{P_n^{(1)}(\cos \theta)}{\sin \theta} = \frac{dP_n(\cos \theta)}{d(\cos \theta)}$; $\tau_n = \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta)$ 。

$P_n^{(1)}(\cos \theta)$ 为一阶 n 次第一类缔合勒让德函数;

$P_n(\cos \theta)$ 为第一类勒让德函数。

a_n 、 b_n 为 Mie 散射系数,其计算式为

$$a_n = \frac{\Psi_n(\chi)\Psi'_n(m\chi) - m\Psi'_n(\chi)\Psi_n(m\chi)}{\zeta_n(\chi)\Psi'_n(m\chi) - m\zeta'_n(\chi)\Psi_n(m\chi)} \quad (3)$$

$$b_n = \frac{m\Psi_n(\chi)\Psi'_n(m\chi) - \Psi'_n(\chi)\Psi_n(m\chi)}{m\zeta_n(\chi)\Psi'_n(m\chi) - \zeta'_n(\chi)\Psi_n(m\chi)} \quad (4)$$

$$\Psi_n(z) = \left(\frac{z\pi}{2}\right)^{1/2} J_{n+\frac{1}{2}}(z) \quad (5)$$

$$\zeta_n(z) = \left(\frac{z\pi}{2}\right)^{1/2} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(z) \quad (6)$$

式中, z 可以是 χ 或 $m\chi$; $J_{n+\frac{1}{2}}(z)$ 和 $H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(z)$ 分别为半奇阶的第一贝塞尔函数和第二汉克尔函数; Ψ'_n 、 ζ'_n 为对各自变量的微商; $m=m_1-m_2i$ 为散射粒子的复折射率,对于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光,在工程上,大气衰减与能见度的关系^[9-10]可表示成 $a=2.7/V$, V 是 km 为单位的能见度。其复折射率为 $m=1.56-0.089i$ 。典型激光器的输出能量为 10 mJ ,脉冲宽度为 10 ns 。探测器的视场角 $\theta=30^\circ$,设 $\beta_1=40^\circ$, $\beta_2=100^\circ$ 。

对于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光,粒子半径为 $0.1 \sim 20 \mu\text{m}$ 的大气气溶胶前向散射较强,在此只需考虑前向散射,因此实际取 $\beta_2=90^\circ$ 。在不考虑大气湍流影响下,用式(2)计算在传输距离为 10 km 时,不同离轴距离的探测器所接收到的大气散射激光的最大辐射照度,见表1。

表1 不同离轴距离上的辐射照度

离轴距离/(m)	10	20	30	40	50
辐射照度/ ($\times 10^{-2} \text{ W/m}^2$)	6.67	3.33	2.22	1.67	1.33
离轴距离/(m)	60	70	80	90	100
辐射照度/ ($\times 10^{-2} \text{ W/m}^2$)	1.11	0.95	0.83	0.74	0.66

图2为根据表1做的不同离轴距离的辐射照度的曲线。

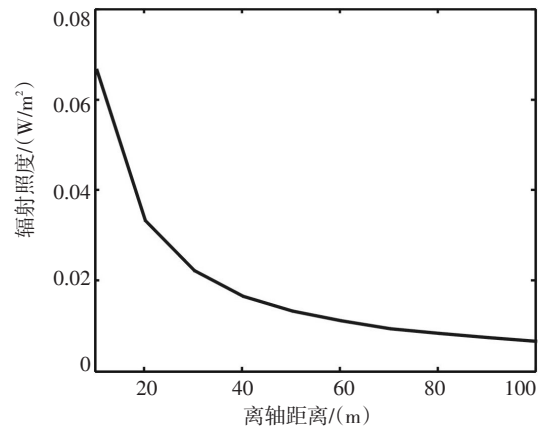


图2 不同离轴距离的辐射照度

同样根据式(2),文中计算了激光传输不同距离时在离轴 100 m 处的激光散射辐射照度,计算结果分别如表2和图3所示:

表2 不同激光传输距离的辐射照度

传输距离/(km)	1	2	3	4	5
辐射照度/ ($\times 10^{-3} \text{W/m}^2$)	1.91	1.70	1.51	1.34	1.19
传输距离/(km)	6	7	8	9	10
辐射照度/ ($\times 10^{-3} \text{W/m}^2$)	1.06	0.94	0.84	0.75	0.66

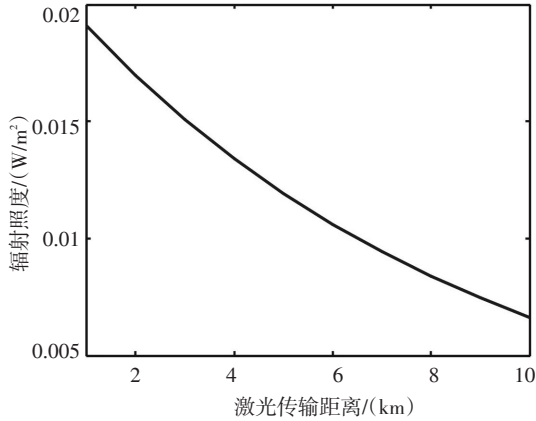


图3 不同传输距离的辐射照度

1.3 数值计算结果分析

由于上述值比较小,实际中很难进行精确的测量,为了讨论上面计算得到的结果,文中对激光器的回波辐射照度进行了计算,可表示为

$$E_r = \frac{P_t \rho}{\Omega R^2} T_a^2 \quad (7)$$

其中, P_t 为发射功率, ρ 为目标反射系数,对于漫反射发散角 Ω 可取为 2π , R 为作用距离, T_a 为单程大气透过率, $T_a = \exp(-aR)$ 。那么对于 1 mW 的激光器,当作用距离为 10 km 时,其接收到的功率为

$$E_r = \frac{P_t \rho}{\Omega R^2} T_a^2 = 3.04 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2 \quad (8)$$

而在 1.2 节中计算得到的激光传输 10 km 时在离轴 100 m 处的散射辐射照度为 $6.635 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$,表明在距离为 10 km 情况下,其探测距离将远大于 100 m,不能满足精度要求。原因在于传统计算激光散射能量的计算方法,是基于连续工作方式,而对于脉冲工作方式的激光器而言,需要进行必要的改进。

2 脉冲工作方式辐射能量计算的修正

考虑激光的单脉冲特性,那么在式(2)中就不能

对探测器整个视场内的激光束进行积分运算。假设

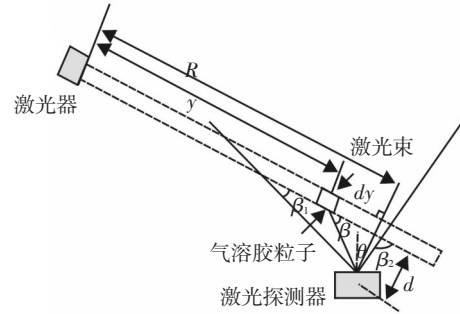


图4 单脉冲激光束和探测器的位置关系图

探测器视场内只有一个激光脉冲,如图4所示。

2.1 公式推导

因为考虑到激光脉冲的长度较短,如在 1.1 节的例子中,脉冲长度为 3 m(不考虑相对论影响),那么在计算的时候可以近似认为激光为一个点源来计算,设其长度为 dy ,在不考虑衍射等能量损失的理想情况下,位于 y 处激光的辐照度(光强)为

$$E_y = \frac{4P_t}{\pi(D + \varphi y)^2} e^{-a \cdot y} \quad (9)$$

其中, φ 为激光发散角, D 为出射激光直径。

先考虑单个大气分子的散射,其激光器的轴向距离为 R 、离轴切向距离为 d 的探测器,所散射的辐照度(光强)为

$$E_{sd}(d, r) = E_y \cdot \frac{\left(|s_1(\beta)|^2 + |s_2(\beta)|^2 \right) \cdot \lambda^2 \cdot \cos \beta}{8\pi^2 \left[(R-y)^2 + d^2 \right]} \cdot e^{-a \cdot \sqrt{(R-y)^2 + d^2}} \quad (10)$$

激光在 y 处占的气溶胶体积为 $\frac{\pi(D + \varphi y)^2}{4} \cdot dy$,那么该部分气溶胶产生的散射可表示为

$$E_{sd}(d, y) = \int_{r_1}^{r_2} E_{sd}(d, r) \cdot \frac{\pi(D + \varphi y)^2}{4} \cdot dy \cdot N(r) \cdot dr \quad (11)$$

整理后就可以得到要求的辐射照度公式为

$$E_{sd}(d, y) = \frac{P_t \cdot \lambda^2 \cdot \cos \beta \cdot dy}{8\pi^2 d^2 \csc^2 \beta \cdot e^{a \cdot (R + d \csc \beta - \cot \beta)}} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \left(|s_1(\beta)|^2 + |s_2(\beta)|^2 \right) N(r) \cdot dr \quad (12)$$

2.2 数值计算与分析

在与1.2节中计算条件一致的情况下,根据式(12)计算得到的离轴100 m,不同 β 角度的辐射照度

表3 不同 β 角度的辐射照度

$\beta(^{\circ})$	10	15	20	25
辐射照度 ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	9.30	17.10	24.27	29.61
$\beta(^{\circ})$	30	35	40	45
辐射照度 ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	32.58	33.20	31.81	28.92
$\beta(^{\circ})$	50	55	60	65
辐射照度 ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	25.10	20.87	16.62	12.63
$\beta(^{\circ})$	70	75	80	85
辐射照度 ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	9.08	6.06	3.56	1.56

如表3所示。

由表3可以看出,激光在离轴100 m左右散射的辐射照度和激光器的回波照度大小是相当的,可以实现100 m左右的散射探测。

另外,从结果还可以看到,散射的辐射照度随散射角度 β 的增大先增大后减小,通过更小角度间隔,计算得到了散射辐射最大的角度约为 $\beta_0 = 33.69^{\circ}$ 。

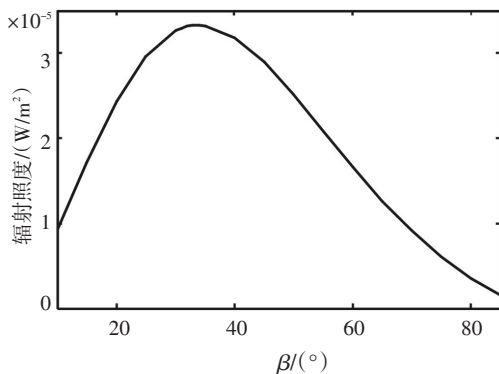


图5 不同散射角度的辐射照度

图5为辐射照度随散射角度 β 的变化曲线。

在 $\beta = 33.69^{\circ}$ 的条件下,图6和图7分别给出了当激光传输距离为10 km时,不同离轴距离的辐射照度曲线和当离轴距离为100 m时,不同激光传输距离的辐射照度曲线。

3 结束语

利用低空激光大气传输模型,分析计算了现有

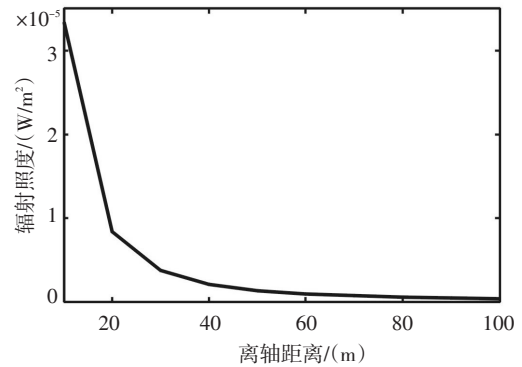


图6 不同离轴距离的辐射照度

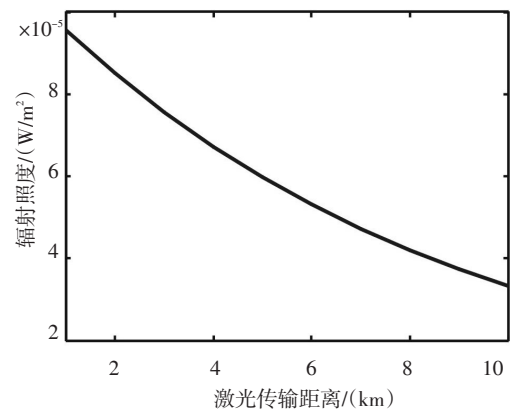


图7 不同传输距离的辐射照度

文献关于激光在大气中传输时同距离条件下的激光散射能量,定量计算了不同离轴距离和不同激光传输距离时激光的辐射照度。通过与激光器的回波信号比较分析得出,传统的计算方法未考虑激光器脉冲工作方式的影响。文中对脉冲工作方式下激光散射的公式重新进行了改进,提高了激光散射探测精度,并计算了不同散射角度、不同离轴距离和不同激光传输距离情况下的激光辐射照度。

参考文献

- [1] 杨坤涛. 激光测试原理与技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000: 143-144.
- [2] 安毓英. 激光传输技术[J]. 激光与红外, 2002, 32 (6) : 435 - 438.
- [3] 陈玉丹,何永强,王海涛,等.基于散射探测的鱼眼激光告警方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(2): 55-59.
- [4] 孙毅义,董浩. 大气辐射传输模型比较研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16 (2) : 149-153.
- [5] 许祖兵. 激光大气传输特性分析研究[D]. 南京:南京理工大学, 2006.

(下转第65页)

shi, et al. Time-to-digital converter with vernier delay mismatch compensation for high resolution on-die clock jitter measurement. 2008 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers, VLSIC, June 18, 2008 – June 20, 2008. Honolulu, HI, United states: Institute of Electrical and

Electronics Engineers Inc., 2008: 156–157.

- [13] 贾方秀, 丁振良, 袁峰, 等. 激光测距温度控制系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 6.
- [14] 李密, 宋影松, 虞静, 等. 高精度激光脉冲测距技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8):1469–1473.

(上接第11页)

6 结束语

美军各种作战直升机对红外定向对抗系统的需求由来已久,但受到成本、质量多种因素的限制,一直未能取得技术突破而大量装备。由于大型飞机红外对抗系统已经垄断了大型和固定翼飞机的红外定向对抗市场,通用红外对抗计划就成为机载电子战项目中下一块巨大的“蛋糕”。为了能在未来的市场竞争中占据主动,多家具有技术优势的公司(团队)通过自投资金及与陆、海、空军的合作开展了螺旋式技术升级和产品研发。技术与产品的竞争,推动着直升机载红外定向对抗装备向经济、轻型、先进有效的方向发展。前面提及的五家公司(团队)的竞标产品都通过了飞行测试并取得了较好的对抗效果。而BAE系统公司和诺斯罗普·格鲁曼公司团队的竞标成功,说明了其产品在技术创新及战场应用中的领先地位。

参考文献

- [1] Daniel Wasserbly. US Army Awards CIRC Development Phase Contracts [J]. Jane's Defense Weekly, 2012, 49(6): 11
- [2] Jen Judson. Acquisition Chief Directs Full Funding for CIR-

CM's Next Phase [J]. Inside the Pentagon, 2012, 28(2): 7

- [3] J. Knowles. US Army Issues CIRC REP [J]. The Journal of Electronic Defense, 2011, 34(3): 15
- [4] Skyler Frink. Northrop Grumman Chose for U.S. Army's Common Infrared Countermeasure Technical Demonstration Program [J]. Military & Aerospace Electronics, 2012, 23(4): 28
- [5] Jen Judson. GAO Denies ITT's Protest Over Army's Award of CIRC Contracts [J]. Inside the Pentagon, 2012, 28(21): 6
- [6] White Plains. ITT Adds Advanced Laser to CIRC [J]. Rotor & Wing, 2011, 45(11): 24
- [7] CIRC Not Just for Helos Anymore, Raytheon Says [J]. Unmanned Systems, 2011, 29(11): 12
- [8] Marina Malenic. US Army to Start CIRC Programme [J]. Jane's Defense Weekly, 2012, 49(3):11
- [9] Jen Judson. Northrop Grumman, BAE System Receive CIRC Development Contracts [J]. Inside the Pentagon, 2012, 28(5): 10
- [10] Daniel Wasserbly. US Army Takes Stock of Common Infrared Countermeasures Bids [J]. Jane's Defense Weekly, 2011, 48(20): 9
- [11] Tong Skinner. CIRC Program moves ahead [J]. Defense Helicopter, 2010, 29(1): 5
- [12] US Army Poised to Launch Infrared Protection Battle [J]. Flight International, 2010, 178(10): 16

(上接第15页)

- [6] 杨洋, 赵远. 1.06 μm 激光的大气传输特性[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 15–19.
- [7] 程玉宝, 孙晓泉, 赵明辉, 等. 激光信号大气散射探测分析[J]. 激光技术, 2006, 30(3): 277–279.
- [8] 巨养锋, 梁冬明, 薛建国等. 威胁源参数对激光散射截获半径的影响[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 426–429.

- [9] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 141–185.
- [10] ACCETTA J S, SHUMKER D L. The infrared and electro-optical systems handbook [M]. 7th ed, Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993: 70–90.