

成像型激光探测系统作用距离研究

武琳, 周中亮, 周冰, 何永强

(军械工程学院光学与电子工程系, 河北石家庄 050003)

摘要:作用距离是激光探测系统设计首要考虑的内容。以成像型激光探测系统为技术背景, 分析了激光在大气中的传输效应, 得出了光束传输与大气参量如大气能见度和折射率结构常数的关系式。进而考虑大气闪烁对激光瞬时分布的影响, 综合孔径平均效应推导出了系统在一定探测概率时, 用最小探测功率或最小照度表示的作用距离模型。并结合典型实例, 数值模拟了接收功率与探测距离的定量关系。计算结果表明, 灵敏度为毫瓦每平方厘米级的激光能够探测到一般战术情况下经过接收器平台附近的激光信号, 从而为系统设计和研制提供了理论依据。

关键词:大气光学; 激光探测; 作用距离; 衰减效应; 湍流效应

中图分类号: TN012; TN977

文献标识码: A

Research on the Operating Range of Imaging Type Laser Detecting System

WU Lin, ZHOU Zhong-liang, ZHOU Bing, HE Yong-qiang

(Department of Optics & Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Operating range is the chief content calculated in the design of laser detection system. Based on the technology of imaging laser detecting system, the relationship between the laser propagation and atmospheric parameters like visibility and refractive index structure constant was discussed while analyzing laser propagation effects in atmosphere. Taking optical scintillation and aperture averaging into account, the operating range model shown by minimum detection power or illumination was discussed while specific detection possibility. The quantitative relation between received power and detection distance was studied with numerical simulation algorithm with typical instance. The calculation results show that the vehicular laser warning device of several mille watts per square centimeter insensitivity can detect laser signal of target reflection and atmospheric dispersion in common tactics circumstance, which can provide a guideline for the development and design of the system.

Key words: atmospheric optics; laser detection; operating range; attenuation effects; turbulence effects

1 引言

激光技术在过去几十年得到了迅猛的发展, 大量激光设备和武器应用于军事。为了对抗现代化战争中和未来战场上日趋严重的激光威胁, 各国加速发展激光对抗技术, 激光探测告警技术是其内容之一。根据探测器探测原理的不同, 当前的激光告警

器可以分为3种类型: 光谱识别型、相干识别型和散射探测型。其中光谱识别型又可分为非成像(二极管阵列)型和成像型(如 CCD/CMOS), 相干识别型

作者简介: 武琳(1983-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为光电对抗与信息处理。E-mail: yinsudong@sohu.com
收稿日期: 2008-06-11

又可分为法布里-珀罗(F-P)型、迈克尔逊型和光纤干涉识别型等^[1]。

限于目前的激光技术发展水平,战场激光设备多工作在为数不多的几个频点或频段,如北约装备的绝大部分激光测距机和目标指示器的工作波长均为1.06μm,部分是Raman频移激光器(1.54μm)。其中,Nd:YAG激光器(1.06μm)在军事上应用最为广泛^[2]。成像型激光探测系统以其针对特定波长探测,视场大、精度高等特点具有明显优势。在激光探测系统设计中,作用距离是首要考虑的技术指标之一。本文研究了大气对系统作用距离影响,推导出了系统作用距离模型。并针对特定激光装备,定量分析了作用距离与系统设计参数的关系。

2 探测器接收激光辐照模型

初始功率为 P_0 基膜高斯光束,极坐标形式下空间激光辐照强度的分布模型可以表示为^[3-4]:

$$I(r, z) = \frac{2P_0}{\pi\omega^2(z)} e^{-2\frac{r^2}{\omega^2(z)}} \quad (1)$$

式中, $\omega(z)$ 表示 z 处高斯光束光斑半径; z 轴取激光的发射光轴方向,原点在光束的腰斑中心; ω_0 为高斯光束的腰斑半径。且有:

$$\omega(z) = \omega_0 [1 + (\lambda z / \pi \omega_0^2)^2]^{1/2} \quad (2)$$

当激光在大气中传输时会产生大气衰减效应及湍流效应。大气衰减效应直接导致传输激光光强的下降;大气湍流会改变光束的传输特性和降低光束的质量。

2.1 大气衰减效应

对于激光功率在大气介质中传输的衰减,通常用Beer定律^[5]来描述:

$$P_\lambda(L) = P_{\lambda_0} \exp[-\sigma(\lambda)L] \quad (3)$$

式中, $P_\lambda(L)$ 是波长为 λ 的激光在大气中传输 L 距离后的功率; P_{λ_0} 是激光的发射功率; $\sigma(\lambda)$ 是大气衰减系数(km^{-1})。大气衰减系数 $\sigma(\lambda)$ 是大气中各种分子微粒的吸收和散射系数的总和,即: $\sigma = k + \gamma$ 。式中, k 是每千米的吸收系数; γ 是每千米的散射系数。

对1.06μm激光而言,它处在大气传输的微窗口区,根据标准大气模型计算得到的大气分子吸收系数小于 $10^{-6}/\text{km}$,分子的吸收对1.06μm激光的衰减相对于散射作用可以忽略不计^[6-7]。

一般情况下,通常使用下面的依据能见度的经

验公式来计算衰减系数:

$$\sigma(\lambda) = \frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \quad (4)$$

式中, V 为能见度,其单位为km; λ 为波长。 q 是与波长有关的常数^[8],对于红外波段的取值为:

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 20\text{km} \\ 1.3 & 6\text{km} < V \leq 20\text{km} \\ 0.16V + 0.34 & 1\text{km} < V \leq 6\text{km} \\ V - 0.15 & 0.5\text{km} < V \leq 1\text{km} \\ 0 & V \leq 0.5\text{km} \end{cases}$$

2.2 大气湍流效应

根据广义惠更斯-菲涅尔原理可以推导出高斯光束通过湍流大气传输的平均光强分布为^[9]:

$$I(r, z) = \frac{B^2}{G^2} I(0, 0) \exp \left[-\frac{2B^2}{G^2} \left(\frac{r}{\omega_0} \right)^2 \right] \quad (5)$$

式中, $B = \frac{k}{2z}$, $G = \sqrt{\frac{1}{\omega_0^4} + \frac{2}{\omega_0^2 \rho_0^2} + \frac{k^2}{4z^2}}$

并且 $\rho_0 = (0.545 C_n^2 k^2 z)^{-3/5}$,其中 k 为波数; C_n^2 是折射率结构常数,它表征湍流的强弱,典型值从 $1 \times 10^{-12} \text{m}^{-2/3}$ (对于强湍流)到 $1 \times 10^{-18} \text{m}^{-2/3}$ (对于弱湍流)^[10]。

结合式(2)、式(3)、式(5)可以得出高斯光束的平均功率传输表达式:

$$I(r, z) = \frac{2B^2 P_0}{\pi G^2 \omega_0^2} e^{-\sigma(\lambda)z/1000} e^{-2\frac{B^2}{G^2} \left(\frac{r}{\omega_0} \right)^2} \quad (6)$$

取 $P_0 = 2 \times 10^6 \text{W}$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 0.001 \text{m}$,由式(6)分别令 $r = 0$, $z = 10 \text{km}$,可以得到轴上和传输距离为10km时的横向激光功率分布,如图1、图2所示,分别列出了能见度 $V = 2 \text{km}, 5 \text{km}, 10 \text{km}, 20 \text{km}$ 和湍流强度 $C_n^2 = 1 \times 10^{-17} \text{m}^{-2/3}, 1 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}, 1 \times 10^{-12} \text{m}^{-2/3}$ 条件下激光功率传输曲线。可以看出,随着能见度越低,湍流越强,轴上激光功率越小,并且传播距离越远,相互之间的差别也越大。但它们成因不尽相同,能见度低使得激光轴向衰减,而湍流不仅引起激光轴向衰减,还会使光束横向扩展。

设探测系统接收孔径 D ,透过率 τ' ,则为辐照到探测单元的功率 $P(r, z)$ 为:

$$P(r, z) = I(r, z) \tau' \pi D^2 / 4 \\ = \frac{B^2 P_0 \tau' D^2}{2 G^2 \omega_0^2} e^{-\sigma(\lambda)z/1000} e^{-2\frac{B^2}{G^2} \left(\frac{r}{\omega_0} \right)^2} \quad (7)$$

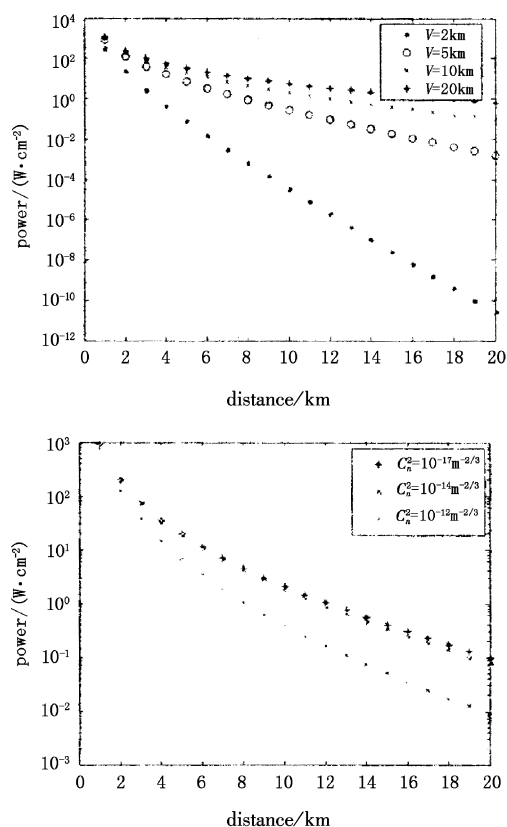


图1 不同大气环境下激光轴向激光功率分布

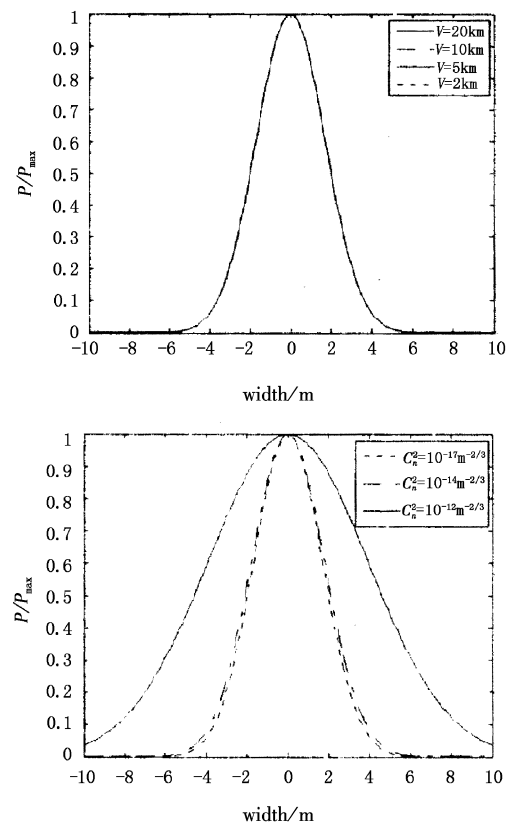


图2 不同大气环境下激光横向激光功率分布

3 瞬态下激光探测系统作用距离模型

上面是功率传输的时间平均效果,对于探测激

光源通常脉宽在纳秒量级,这时必须考虑激光的瞬态分布,主要考虑激光在湍流大气传播过程中的强度起伏即大气闪烁效应^[11]。实验研究表明,闪烁分布与接收孔径有关^[12]。定义闪烁孔径平滑因子 G 为:

$$G = \frac{\sigma_i^2}{\left(\frac{\pi D_0^2}{4}\right)^2 C_I(0)} \quad (8)$$

式中, σ_i^2 为总光通量的对数起伏方差; $G_I(0) = 0.497 k_0^{7/6} z^{11/6} C_n^2$ 。根据系统采用的鱼眼镜头通光孔径一般毫米量级,在小孔径 ($kD_0^2/4z < 1$) 探测情况下,有孔径平滑因子(误差 $< 4\% \sim 19\%$)^[13]:

$$G = 1 + 1.711 \left(\frac{kD_0^2}{4z}\right) - 0.135 \left(\frac{kD_0^2}{4z}\right)^2 - 2.093 \left(\frac{kD_0^2}{4z}\right)^{5/6} \quad (9)$$

图3所示为传输距离10km时 G 与孔径关系曲线,可以看出随着孔径增大 G 变小,可知接收总光通量伏方差变小。

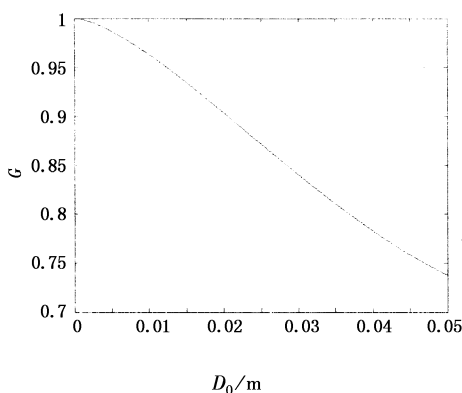


图3 孔径平滑作用曲线

实验结果研究表明^[14],当用有限孔径测量时,即使在湍流强度 $C_n^2 = 5.2 \times 10^{-13} \sim 1.9 \times 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$,闪烁仍满足对数正态分布,则:

$$P(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{(i - \langle i \rangle)^2}{2\sigma_i^2}\right\} \quad (10)$$

取接收总光通量为 ϕ ,有 $\phi = \phi_0 e^i$,则其的概率分布函数:

$$P(\phi) = P(i = \ln \frac{\phi}{\phi_0}) \left| \frac{di}{d\phi} \right| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i \phi} e^{-\frac{[\ln(\phi/\phi_0) - \langle i \rangle]^2}{2\sigma_i^2}} \quad (11)$$

又 $\langle \phi \rangle = \phi_0$ 时,有 $\langle i \rangle = -\sigma_i^2/2$ ^[11],式(11)

即:

$$P(\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\phi} e^{-\frac{[\ln(\phi/\phi_0) + \sigma_\phi^2/2]^2}{2\sigma_\phi^2}} \quad (12)$$

令系统最小可探测功率为 $P_{\min}$, 探测概率为 P_d ,

则:

$$P_d = P(P(r, z) > P_{\min}) = \int_{P_{\min}}^{+\infty} P(\phi) d\phi \quad (13)$$

并有式(7)即可得激光探测系统作用距离模型。

4 实例分析

计算对象为美军 AN/GVS25 型手持式激光测距机, 主要技术指标如下: 在 12km 能见度下作用距离 8km, 激光波长 $1.06\mu\text{m}$, 输出峰值功率 P_0 为 2MW, 束散角 $\theta < 1\text{mrad}$ (80% 输出能量), 脉冲宽度为 6ns, 重复频率 1Hz。通常要求探测距离是被探测装备作用距离的 1.2 倍, 即要求探测距离要达到 9.6km 以上。取系统接受孔径 2mm, 大气能见度 $V = 10\text{km}$, 探测概率设定为 95%, 不同湍流强度下的系统接收激光辐射功率如表 1 所示。

表 1 不同湍流强度下接收激光功率与距离的关系

$C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{m}^{-2/3}$		$C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$	
d/km	p/mW	d/km	p/mW
8	39.5	8	36.0
9	26.4	9	23.8
10	18.1	10	16.1
11	12.7	11	11.1
12	9.0	12	7.8

由表 1 结果可知, 10km 外的典型激光威胁源被系统接收激光峰值功率达到 16.1mW, 是系统最小可探测功率(0.031mW)的 512 倍, 并且可以算出 C_n^2 对应上面两种情况, 系统可探测的离轴量分别为 8m 和 9m。表 1 中, 随湍流增强, 接收激光功率降低, 这主要是因为湍流的对光束的扩展效果, 可探测离轴量的增大也验证了这一效果。

5 结论

激光探测系统的作用距离是衡量系统性能的重要指标, 在系统设计时必须率先考虑。本文在分析激光在大气中远距离传输的基础上, 建立了探测器接收激光辐照模型。据此, 一旦明确了系统的极限探测功率, 就可以推算出系统的作用距离等指标。进而, 选取美军 AN/GVS25 型手持式激光测距机为例, 通过典型计算参量, 数值模拟了激光探测系统接

收激光功率情况。结果表明, 灵敏度为毫瓦每平方厘米级的激光告警器能够探测到一般战术情况下经过接收器平台附近的激光信号, 为系统设计提供了依据。

模型建立中, 激光源以基膜高斯光束考虑, 对于复杂模式激光束光场分布的影响还有待今后进一步讨论。

参考文献:

- [1] 张记龙, 王志斌, 李晓, 等. 光谱识别与相干识别激光告警接收机评述[J]. 测试技术学报, 2006, 20(2): 95-101.
- [2] 葛强胜, 葛强林, 龚赤坤. 车载激光告警器灵敏度技术指标分析[J]. 兵工学报, 2005, 26(4): 473-476.
- [3] 牛燕雄, 张鹏, 姚建铨, 等. 强激光对星载光电探测系统的干扰与破坏研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 793-796.
- [4] 刘俭, 谭久彬, 赵晨光, 等. 准直光束高斯特征对直写光斑强度的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(12): 1627-1630.
- [5] Weber H. Focusing and imaging of laser beams[J]. Opt commun, 1987, 62(2): 124-127.
- [6] 宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 11-68.
- [7] 哈杰. AR. 红外技术应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 25-74.
- [8] M Al Naboulsi, H Sizun, F de Fornel. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves[J]. Opt. Eng., 2004, 43(2): 319-329.
- [9] 季小玲, 汤明玥. 一维线阵离轴高斯光束通过湍流大气的传输特性[J]. 物理学报, 2006, 55(9): 4968-4973.
- [10] 张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 15-17.
- [11] 邢建斌, 许国良, 张旭苹, 等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1850-1852.
- [12] 杨昌旗, 姜文汉, 饶长辉. 孔径平均对自由空间光通信误码率的影响[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 212-218.
- [13] Andrews L C. Aperture-averaging factor for optical scintillations of plane and spherical waves in the atmosphere[J]. Opt. Soc. Am, 1992, 9(4): 597-600.
- [14] Churnside J H, Hill R J. Probability density irradiance scintillations for strong path - integrated refractive turbulence[J]. Opt. Soc. Am, 1987, (4): 727-733.