文章编号:1001-5078(2012)04-0422-04

·光电技术与系统 ·

实用型激光拦截系统中大气影响的应用分析

李松山,王 岳,钟声远 (华北光电技术研究所,北京100015)

摘 要:探讨了低慢小激光拦截系统中大气因素的影响情况,有针对性地分析了大气湍流和大 气衰减对激光拦截系统远场光斑的影响,论证了低慢小激光拦截系统在特定大气条件下的作 战效能,推导远场光斑功率密度的计算过程,结合实际使用经验,提出了激光拦截系统的使用 条件限制。

关键词:大气影响;激光拦截;作战效能

中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2012.04.015

Applied analysis of atmosphere impacts in practical laser interception system

LI Song-shan, WANG Yue, ZHONG Sheng-yuan

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Atmosphere impacts in practical laser interception system were discussed. Targeted to analyse the effect of the atmospheric turbulence and atmospheric turbulence to the laser interception system's spot in far field. Demonstrated the combat effectiveness under specific atmosphere condition. Deduced calculating process of the power density in far field. Combined with the actual use of experience the condition of use of laser interception system was propsed. **Key words**: atmosphere impacts; laser interception system; combat effectiveness

1 引 言

随着高能固体激光技术的发展,输出功率不断 提升,光束质量不断提高,为小型实用化激光拦截系 统的诞生和发展提供了有力的技术支撑。近年来国 内外先后出现了几种实用化的激光拦截系统,其战 术效能主要由系统自身的技术参数决定,但是外部 环境的影响也不可忽略,其中大气能见度和大气湍 流是主要影响因素。本文将针对大气湍流和大气衰 减对系统作战效能的影响进行系统性的理论分析和 计算推导,并通过实际试验检测予以验证。

2 大气传输在实用系统中主要影响因素分析

2.1 大气衰减的影响

由于大气衰减的存在,导致激光束在传输过程中, 远场功率逐渐衰减,大气对激光束的衰减率主要由大 气能见度和传输距离两个因素决定,在不考虑斜程大 气修正的情况下远场光斑的功率*P*。可以表示为:

$$P_s = P_t e^{-\beta R} \tag{1}$$

其中,P_i为激光发射系统的发射出口功率;β为大气衰 减系数;R为传输距离,则可以通过式(1)计算不同大 气能见度条件下的激光衰减率,计算结果如表1所示。

表1 不同大气能见度情况下的衰减率

大气能见度 /km	500 m 大气 衰减/%	800 m 大气 衰减/%	1000 m 大气 衰减/%
20	6.53	10.24	12.65
10	12.63	19.43	23.66
5	26.66	35.08	41.73
3	36.24	51.32	59.34
1	74.07	88.47	93.28

作者简介:李松山(1974-),男,硕士研究生,高级工程师,主要研 究方向为激光在光电系统中的应用。E-mail:li_song_shan@sina.com 收稿日期;2012-01-23;修订日期;2012-03-27 分析表1中的数据可知,大气能见度对激光拦 截系统的战术效能影响十分明显,浑浊的大气将严 重影响系统的实际作战效能。

2.2 大气湍流影响

大气湍流造成激光光束在大气传输过程中出现 光束扩展和光束漂移现象,效果示意图如图1所示。 大气湍流的情况复杂,标定和测量存在较大的难度, 而且一天当中大气湍流的数值是一个不断变化的过 程,一般正常晴朗无风的天气,可以大致分为四个 变化时段:第一时间段为午夜前后到日出前,此段 的大气非常平稳,平均大气湍流系数 C_n一般小于 1×10⁻⁷ m^{-1/3},对远场光斑的影响很小;第二时段 为日出前后到下午1点左右,此时间段内大气温 度不断提高,温度的升高导致大气扰动逐渐强烈, 一般情况下大气湍流在下午1点前后达到极值, 此时段内平均大气湍流系数超过 $3 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$. 对光斑有较为明显的扩展和漂移作用,严重影响 了光斑的功率密度;第三时段为下午1时到日落 前后,此时段大气湍流呈逐渐减弱趋势,并于日落 前后趋于平静,平均大气湍流系数恢复到1.5× $10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$ 以下;第四时段为日落后到午夜前后,回 落后的大气湍流会有一个跳变过程,略微升高,随 后逐渐平稳,最终大气平均大气湍流系数将基本 稳定在1×10⁻⁷ m^{-1/3}以下。



2.2.1 光束漂移

激光束在大气传输过程中因大气的影响产生漂移,漂移角起伏方差表示为:

$$\sigma_{\alpha}^{2} = \frac{1}{3}\sigma_{\theta}^{2} \tag{2}$$

其中, σ_{θ}^2 表示远场光斑达角的起伏方差,可以表示为:

$$\sigma_{\theta}^{2} = 2.92 C_{p}^{2} R \rho^{-1/3}$$
(3)

其中,ρ表示激光发射系统的有效直径;C_n表示大气 湍流因子;R表示光束传输距离。

根据光束的起伏方差可以计算光斑漂移距离, 中心漂移距离 σ_{ρ} 表示为:

$$\sigma_{\rho} = R\sigma_{\alpha} = R\sigma_{\theta} / \sqrt{3} \tag{4}$$

将激光发射系统的有效输出口径带入式(4)计 算出远场光斑的中心漂移距离,计算结果如表 2 所示。

表2 光斑中心漂移量计算结果

$C / m^{-1/3}$	$\sigma_{ ho}/\mathrm{cm}$			
C _n / m	R = 500 m	R = 700 m	R = 900 m	R = 1000 m
5×10^{-8}	0.07	0.12	0.17	0.20
1×10^{-7}	0.14	0.24	0.35	0.41
3 × 10 ⁻⁷	0.43	0.72	1.04	1.22
5 × 10 ⁻⁷	0.72	1.19	1.74	2.04

2.2.2 光束扩展

对于聚焦的高斯光束来说,远场光斑的扩展半径由光孔衍射半径和湍流扩展半径两部分共同决定。采用冯·卡曼(Von Karman)模型,计算聚焦光束在焦点处的光斑等效半径,可以表示为:

$$\begin{cases} \alpha_{e}^{2} = \alpha_{0}^{2} & R \leq L_{e} \\ \alpha_{e}^{2} = \alpha_{0}^{2} + 1.90C_{n}^{12/5}k^{2/5}R^{16/5} & L_{e} \leq R \leq L_{i} \\ \alpha_{e}^{2} = \alpha_{0}^{2} + 2.29C_{n}^{2}l_{0}^{-1/3}R^{3} & R \geq L_{i} \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_{e} \approx 2.54(C_{n}^{2}k^{2}K_{0}^{-5/3})^{-1} \\ L_{i} \approx 2.54(C_{n}^{2}k^{2}K_{m}^{-5/3})^{-1} \end{cases}$$
(6)

式中, α_0 表示激光光斑的衍射半径;R表示激光的 传输距离; $k = 2\pi/\lambda$, l_0 表示湍流内尺度; L_e 表示波 的平均振幅为初始值为 e^{-1} 时的距离; L_i 表示波的 相干长度相当于内尺度时的距离, K_m 和 K_0 表示与 湍流内外尺度有关的波数,对于一般激光拦截系统 而言,作用距离R处在 $L_e \leq R \leq L_i$ 的范围内,将激光 拦截系统的有效输出口径和激光波长代入式(5)可 以计算不同距离、不同湍流情况下的光斑扩展情况。 2.2.3 远场光斑尺寸

对于一套激光拦截系统来说,远场光斑的理论 半径由光束的扩展半径、随机漂移误差和系统伺服 跟瞄单元的瞄准精度误差三个因素共同决定,即在 距离为 R 处远场光斑的理论半径 d 可以表示为:

$$d = \sqrt{(\sigma_r R)^2 + \alpha_e^2 + \sigma_s^2} \tag{7}$$

其中,σ,为伺服跟瞄单元的瞄准精度;σ_s为光斑的随机漂移误差;α_e为光斑扩展半径,设定激光拦截 系统的跟瞄精度和光束质量,将式(4)和式(5)的计 算结果代入式(7)能够得到不同距离处远场光斑的 理论半径。

进一步梳理式(5)和式(7)的计算结果,可以得 到如表3所示的关系。

$C_n/{\rm m}^{-1/3}$	距离/m	衍射光斑占理论 半径比/%	扩展光斑占理论 半径比/%
1×10^{-7}		85.0	91.9
3×10^{-7}	500	49.8	92.0
5 × 10 ⁻⁷		30.68	92.6
1×10^{-7}		77.63	91.9
3 × 10 ⁻⁷	1000	36.27	92.2
5×10^{-7}		21.1	93.6

表 3 大气湍流对远场光斑的影响分析

由表3的数据分析可知,对于跟瞄精度极高激 光拦截系统,远场光斑的理论半径中扩展光斑半径 是主要部分,光束的随机漂移误差和伺服跟瞄误差 所带来的影响较小,进一步分析发现,当大气比较平 稳时,激光束的衍射光斑数据很大程度上决定着系 统的作战能力,随着大气湍流的变化,远场光斑中衍 射光斑所占比例逐渐下降,大气对远场光斑半径的 影响逐渐成为主导因素,衍射光斑的尺寸由激光器 的光束质量决定,由式(5)可知大气对于远场光斑 的扩展量是个固定值,可以推断出在大气较为平静 时,输出功率相同的激光器,光束质量越好作战效能 越高,但当大气湍流较为严重时激光器光束质量不 再是系统战术效能的最主要的决定因素,在系统设 计过程中需要平衡光束质量和输出功率这两个关键 参数,激光器技术体制的选择是激光拦截系统战术 效能最主要的决定因素。

2.3 激光拦截系统作战效能评估

激光拦截系统的作战效能主要体现在远场光斑 的功率密度上,提高激光远场光斑的功率密度,有利 于提高目标的有效拦截概率,同时降低系统对于目 标材质的限制。远场光斑功率密度的物理含义为远 场光斑的功率除以光斑面积,功率密度 ∇_p 可以表 示为:

$$\nabla_P = \frac{P_s}{\pi d^2} \tag{8}$$

带入式(1)~式(7)展开可以发现,激光拦截系 统的作战效能主要由系统的发射口径、光束质量、跟 瞄精度、激光输出波长和激光输出功率决定,大气因 素是客观影响因素。

3 大气影响的实测和分析

为了验证大气对远场光斑的实际影响,专门组 织了一系列的外场试验,实际测定不同大气湍流情 况下远场激光光斑的光斑半径数据,由于没有理想 的大气湍流标校手段,仅能选用相关资料中的经验 数据作为参考依据。经实际对比发现,相对同一个 测试点,一天当中不同时段远场光斑的实际尺寸的变化规律基本与理论计算数据相符。

另外,在实际试验过程中发现,相同时段内(测试时间间隔小于2min)不同测试点的实测数据差异非常明显,经整理分析发现,远场数据的差异主要与激光束传输路径的传输高度和地表环境有关,距离地表越近大气湍流越严重,对于地表环境的影响经比较发现,水面附近的大气最为稳定,其次是有植被覆盖的土地,水泥、沥青地表环境下大气湍流最为严重。

特别是夏季太阳暴晒的情况下,机场水泥跑道 上空的大气湍流系数接近1×10⁻⁶,剧烈的大气湍 流严重影响激光拦截系统的作战效能。水面条件与 机场水泥跑道条件下的远场光斑实际对比图像如图 2 所示。



图 2 水泥跑道与水面条件下的实际光斑情况对比

图 2(a)为正午时段水泥跑道条件下 1 km 处远 场光斑的情况,远场激光光斑的半径极度扩展,通过 记录设备观察,光斑扩散为一团,没有中心强点,实 际打击效果极差。图 2(b)为水面附近地面 1 km 处 远场光斑的情况,能量集中在一点,灰砖在强激光的 辐照下因温度急速升高而发出刺眼的亮光,灰砖中 的硅因为受热而玻璃化,如图 2(c)所示。从图 2 对 比发现,同样一套系统,在近似时间段因地表环境的 不同,在作战能力上表现出巨大差异。

4 结 论

大气湍流造成激光光斑的扩展,致使功率密度 急剧下降,自适应光学技术的发展能够在一定程度 上改善大气湍流对远场激光光斑的影响,目前国内 多家单位开展了相关技术的研究,能够在有限条件 下改善系统的整体作战效能,不需要大幅提升激光 器输出功率就能够适应更为广泛的天气条件,但目 前自适应光学组件在经济成本和体积、质量等方面 的实际限制,不太适合在中、小型激光拦截系统中 集成。

大气衰减主要体现在激光在大气传输过程中的 功率衰减,大气能见度越低激光衰减的越明显,当遇 到大气能见度不佳时,激光拦截系统的作战效能将 严重受限,对于大气能见度的影响目前没有有效的 解决手段,规定系统的使用条件是激光拦截系统的 唯一选择。

大气湍流和大气衰减对激光拦截系统战术效能 的影响是目前激光拦截系统面临的世界性难题,是 客观存在的,因而在系统设计过程中必须考虑恶劣 天气对系统作战效能的实际影响,并设定严格的使 用和检测条件。

参考文献:

- [1] Liu Shida, Liang Fuming, Liu Shishi, et al. Atmospheric turbulance[M]. Beijing: Peking University Press, 2008. (in Chinese) 刘式达,梁福明,刘式适,等. 大气湍流[M]. 北京:北京大学出版社,2008.
- [2] Wu Lin, Ying Jiaju, Geng Biao. Effect on laser propagation in the atmospheric turbulence [J]. Laser & Infrared, 2008,38(10):974-977. (in Chinese) 武琳,应家驹,耿彪. 大气湍流对激光传输的影响[J]. 激光与红外,2008,38(10):974-977.
- [3] Xu Jiawen, Sun Huayan, Wu Weiwei, et al. Research of laser propagation simulation in turbulent atmosphere[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009, (4): 43-44,53. (in Chinese) 许嘉纹,孙华燕,吴伟伟,等. 湍流大气中的激光传输 仿真研究[J]. 装备制造技术,2009,(4):43-44,53.
- [4] Zhang Wentao, Zhu Baohua. Reseach on the laser beam

through turbulence atmosphere channel [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007,36(4):784-787. (in Chinese)

张文涛,朱保华.大气湍流对激光信号传输影响的研究[J].电子科技大学学报,2007,36(4):784-787.

[5] Yang Yang, Zhao Yuan, Qiao Lijie, et al. Atmospheric transmission property of 1.06 μm laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28 (1):17 – 21, 37. (in Chinese)

> 杨洋,赵远,乔立杰,等.1.06 μm 激光的大气传输特性 [J]. 红外与激光工程,1999,28(1):17-21,37.

- [6] Dong Haiyan, Li Wei, Dai Ming, et al. Research of high power fiber laser atmosphere propagation [J]. Optical Technique, 2007, 33(6):830-832. (in Chinese) 董海燕,李伟,戴明,等.大功率光纤激光大气传输特性的研究[J].光学技术,2007,33(6):830-832.
- [7] Jia Jianzhou, Song Dean, Jia Renyao, et al. Attenuation estimation of laser atmospheric transmission [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2010, 25(4):73-76, 81. (in Chinese)
 贾建周,宋德安,贾仁耀,等. 激光大气传输衰减的估算方法[J]. 电子信息对抗技术, 2010, 25(4):73-76,81.
- [8] Li Tianze. Research on energy attenuation of one-way ateospheric transmisson [J]. Journal of Applied Optics, 1996,17(2):28-29. (in Chinese)
 李田泽. 单程大气传输的能量衰减研究[J]. 应用光 学,1996,17(2):28-29.