

主动照明激光对高精跟踪的影响分析

杨雨川 关小伟 谭碧涛 龙 超

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要 采用激光主动照明技术, 是对远距离暗目标进行成像、定位和跟踪的重要手段。但由于激光在大气路径中传输, 受到大气湍流等因素的影响会造成辐照在目标上的激光光强分布不均匀, 同时激光波前会产生畸变, 从而降低目标的成像质量, 影响对目标的高精度跟踪能力。基于激光照明大气传输模型, 对中等湍流、弱湍流和不同光束数情况下的激光照明结果进行了数值模拟, 分析了照明激光光强和波前对远距离目标成像的影响。计算结果表明: 照明光强起伏方差优于 0.5, 波前畸变标准误差优于 0.2λ , 可满足约 $1\mu\text{rad}$ 量级的目标分辨能力。

关键词 激光技术; 激光主动照明; 大气湍流; 激光传输; 成像分辨率

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s101004

Effects on High-Precession Tracking on Active Illumination Laser

Yang Yuchuan Guan Xiaowei Tan Bitao Long Chao

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract Laser illumination is an effective technology for the imaging and tracking to the far dim targets in the air. Because of laser transmitting in the air, the spatial distribution of intensity on the target plane is non-uniform caused by atmospheric turbulence, and the laser wavefront generates aberration, which decreases image resolution and tracking accuracy in optical system. A model of illumination laser propagation in atmosphere has been built. Under the condition of moderate turbulence, weak turbulence and multi-beams, numeric simulation for laser illumination to air targets has been carried out, and the affects of illumination light intensity and wavefront on remote target imaging are analyzed. The results show that illumination light intensity fluctuation variance below 0.5 and wavefront aberration standard error below 0.2λ meet $1\mu\text{rad}$ magnitude resolution capability.

Key words laser technique; laser active illumination; atmosphere turbulence; laser propagation; imaging resolution

OCIS codes 010.1080; 010.1290; 110.1085; 110.2960

1 引 言

在对空远距离暗目标进行成像探测和高精度跟踪的实际应用中, 需要对远距离目标高分辨率成像(达到亚微弧度量级)。在自然条件下, 难以得到稳定可靠的高分辨率图像。用激光照明技术就可以在一定程度上解决该问题^[1-4]。但由于激光的相干性、单色性及大气湍流等因素, 激光照明条件下目标的光学特性与自然光照明条件下的光学特性存在较大差别, 该差异主要体现在, 具有很好相干性和单色性的激光经过大气湍流照射到目标上后, 光强分布常常很不均匀, 导致从目标图像中难以得到目标准

确的轮廓或亮度中心, 同时受到湍流影响激光的波前发生畸变, 导致目标成像模糊, 降低成像质量。

由此提高照明激光的均匀性和校正畸变波前, 则成为提升对远距离暗目标探测、跟踪和识别能力的主要途径。美国麻省理工实验室在马萨诸塞州西滩密尔斯通山开展了大量的激光主动照明实验, 对不同大气湍流条件下单束光、4束光和9束光照明下的光强均匀性及跟踪瞄准能力进行了比较, 实验结果表明多光束照明能有效提高照明光斑的均匀性, 降低成像目标闪烁, 提高对远距离目标的瞄准精度^[5]。此后, 该实验室还开展了不同相干性两束光

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-03-10

基金项目: 国家 863 计划

作者简介: 杨雨川(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要从事激光技术及应用等方面的研究。E-mail: yyc_online@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

合成照明的仿真分析,结合飞行目标分析了激光照明对目标的跟踪能力,分析结果表明光束非相干合成照明可提高系统对远距离飞行目标的识别跟踪能力^[6]。为了进一步补偿大气湍流对成像的影响,可通过自适应光学技术在一定程度上校正湍流效应所导致的图像畸变,采用自适应光学技术持续观测,可以有效消除观测图片失真问题,得到接近衍射极限的目标图像,实现对远距离目标的特征识别。为了分析不同大气湍流条件和不同路数照明激光对成像效果的影响,本文试图用数值模拟方法探讨上述问题。

2 评价照明效果的基本参数

2.1 光强起伏方差

文献中大多采用目标上光强分布起伏方差来评价照明光强分布的均匀性^[3]:

$$\sigma = \sqrt{\sum_i (I_i/\bar{I} - 1)^2/N}, \quad \bar{I} = \sum_i I_i/N, \quad (1)$$

式中 I_i 是光斑中采用点 i 处的光强, N 是采样点数。光强起伏方差反映了光强总的起伏强弱,但不能反映光强起伏空间尺度分布,而光强起伏空间尺度分布与照明条件下的成像分辨率密切联系。

2.2 功率谱密度分布

功率谱密度分布反映了物理信息的频率信息,通过对频率信息的判断,能直接反映物理信息起伏的尺度。对于光强而言,光强的功率谱密度分布反映了光强起伏的空间频率;对于波前相位而言,波前的功率谱密度分布反映了相位畸变的频率。

对目标平面处的照明光强分布(相位分布)进行二维傅里叶变换可得照明光强(相位分布)的空间功率谱密度分布:

$$P(f_x, f_y) = |\mathcal{F}[I(x_N, y_N)]|^2, \quad (2)$$

式中 x_N 和 y_N 为空间坐标,单位为 m, f_x 和 f_y 为空间频率,单位为 $\text{Hz}(\text{m}^{-1})$ 。为了进一步描述空间功率谱密度分布,利用谱密度的环围集中度来定量分析照明光强(相位分布)的高低频信息所占的比重。均匀光照条件下,空间谱密度分布为 δ 函数,即只有零频,没有任何高频成分,因此在完全均匀的光照明条件下目标图像可以最好地反映目标表面反射率分布和轮廓情况。同样,均匀相位的空间谱密度分布也为 δ 函数,但需要注意的是,在畸变相位条件下,相位的活塞项对成像质量没有影响,一般将其剔除。

3 数值模拟方法

激光束在大气介质中传输时其相位和振幅均受

到大气湍流的调制,对于这方面的影响,目前普遍采用的研究方法是利用能体现大气湍流特性的随机相位屏来近似模拟大气的湍流效应。在 Rytov 方法中,观察面的光场分布 U 与初始光场分布 U_0 存在关系

$$U(r) = U_0(r) \exp[\phi(r)], \quad (3)$$

式中 ϕ 为大气引起的相位扰动项。当激光传输距离 L 较长,可将大气传输分为 N 层,各层厚度分别为 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$, 共 $n+1$ 个截面,则 $\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \dots + \phi_n$ 。

假定湍流的功率谱密度符合改进冯·卡曼谱,对改进冯·卡曼功率谱叠加复高斯噪声,然后再进行逆傅里叶变换得到模拟大气的相位屏^[7]:

$$\phi(x, y) = \sum_n \sum_m c_{n,m} \exp[i2\pi(f_{xn}x + f_{ym}y)], \quad (4)$$

式中 f_{xn} 和 f_{ym} 分别是 x 和 y 方向上的空间频率, $c_{n,m}$ 是傅里叶变换系数

$$c_{n,m} = \frac{1}{N \cdot \Delta D} \cdot g(f_{xn}, f_{ym}) \cdot \sqrt{P(f_{xn}, f_{ym})}, \quad (5)$$

式中 $g(f_x, f_y)$ 为正态分布随机高斯白噪声, N 为采样点数, ΔD 为空间采样间隔。 $P(f_x, f_y)$ 为改进冯·卡曼功率谱

$$P(f_x, f_y) = 0.033C_n^2 \frac{\exp[-(f_{xn} + f_{ym})^2/\kappa_m^2]}{[(f_{xn} + f_{ym})^2 + \kappa_0^2]^{11/6}}, \quad (6)$$

式中 $\kappa_m = 5.92/l_0, \kappa_0 = 2\pi/L_0, l_0$ 和 L_0 分别为大气湍流的内外尺度(单位:m)。

上述办法存在一个问题,即受模拟相位屏尺寸大小和采样频率的限制造成低频成分的丢失,不能很好地体现湍流的低频特性,得到的随机相位屏的相位结构函数与理论比较在低频部分存在较大偏差。为了校正模型,引入低频子谐波信息的方法来解决傅里叶变换法不能体现大气湍流低频特性的问题^[8]。 N_p 个不同子谐波相位屏叠加产生低频相位屏,表达式为

$$\phi_{LF}(x, y) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 c_{n,m} \exp[i2\pi(f_{xn}x + f_{ym}y)]. \quad (7)$$

在上述运算过程中,每个 p 值对应的采样频率间隔为 $\Delta f_p = 1/(3^p L)$, 采用该方法为傅里叶变换的相位屏增加不同的子谐波。

根据观察面的光场分布 U , 则照射到目标处的

光强分布为

$$I(r) = |U(r)|^2. \quad (8)$$

将光强分布函数与目标反射率分布函数相乘可得到目标亮度分布,考虑目标面为理想的漫反射面,简化目标反射率分布函数。再考虑将传输激光的畸变相位作为光学传递函数,卷积得到目标成像结果。

4 数值模拟与结果分析

采用上述物理模型和计算方法,对激光照明进行了数值模拟。为了与均匀照明光的照明结果进行比较,取照明光源为模型点源^[9]

$$U_{\mu}(r_1) = A \exp\left(-i \frac{k}{2\Delta z} r_1^2\right) \exp\left(i \frac{k}{2\Delta z} r_c^2\right) \times \exp\left(-i \frac{k}{\Delta z} r_c r_1\right) \left(\frac{D}{\lambda \Delta z}\right)^2 \operatorname{sinc}\left[\frac{D(x_1 - x_c)}{\lambda \Delta z}\right] \times \operatorname{sinc}\left[\frac{D(y_1 - y_c)}{\lambda \Delta z}\right], \quad (9)$$

式中 A 为幅度因子, λ 为波长, Δz 为传输距离, $r_c = (x_c, y_c)$ 为 r_1 面上的点源位置, D 为矩形点源的长度。模拟时,选取参数 $D = 2.5 \text{ cm}$, $\lambda = 1 \text{ }\mu\text{m}$, $\Delta z = 50 \text{ km}$, 点源位于传输面的中心位置,大气湍流的内外尺度分别为 5 mm 和 50 m 。成像目标反射率如图 1 所示,目标反射率为 1,背景反射率为 0.5,对比

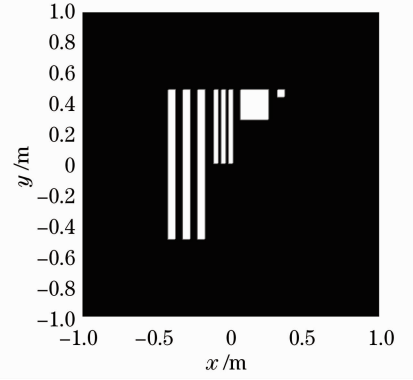


图 1 成像目标反射率

Fig. 1 Imaging target reflectivity

度为 $0.33[(I_{\text{target}} - I_{\text{back}}/I_{\text{target}} + I_{\text{back}})]$ 。

4.1 光强均匀性对目标成像的影响分析

图 2(a) 表示理想条件下均匀辐照光强分布,图 2(b)~(f) 为 Rytov 方差为 0.04、0.09、0.13、0.17、0.22 条件下一组目标处激光辐照光强分布(弱湍流到中等湍流,对应 $\lambda = 1 \text{ }\mu\text{m}$ 平面波的大气相干长度分别为 28、18.47、14.48、12.18、10.66 cm),根据 (1) 式计算得到光强起伏方差,分别为 0.58、0.75、0.9、1.02、1.13。光强起伏方差反映了光强总的起伏强弱,结果表明随着湍流强度的增加,光强起伏逐渐增强。光强起伏与目标反射率的乘积为目标亮度

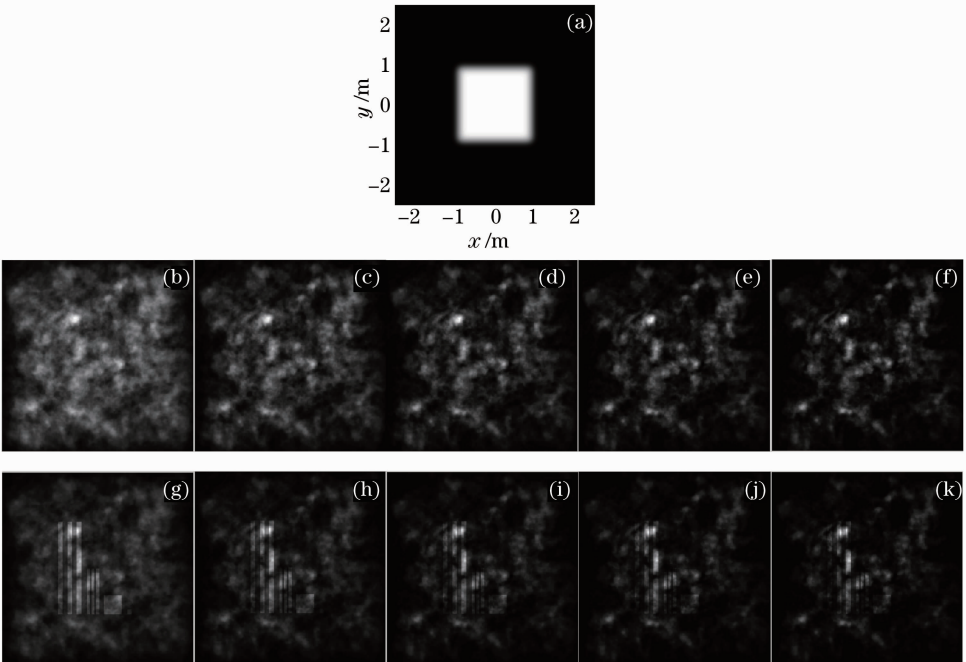


图 2 不同湍流条件下的光强分布及成像结果。(a)理想条件;(b)~(f) Rytov 方差分别为: 0.04, 0.09, 0.13, 0.17, 0.22; (g)~(k)为对应的成像结果

Fig. 2 Light intensity distribution and corresponding imaging results under different turbulence. (a) Ideal condition; (b)~(f) Rytov variance; 0.04, 0.09, 0.13, 0.17, 0.22; (g)~(k) are the corresponding imaging results

分布,由于存在光强起伏,导致目标亮度存在明暗起伏,如图 2(g)~(k)所示。结果表明随着光强起伏增加,辨识目标轮廓的难度增加,当光强起伏方差大于 0.6,目标轮廓分辨就已经受到了严重影响。

采用功率谱密度环围比率来描述光强起伏的空间尺度,结果如图 3 所示,横坐标为空间频率,纵坐标为环围比率。90%环围比率对应的频率依次为:接近零频(近似 δ 函数),10、18、22、25、28 Hz。该结果直观反映了光强起伏的空间尺度,随着湍流强度增加,光强起伏频率增大(空间尺度减小)。

4.2 畸变相位对目标成像的影响分析

图 4(a)~(e)为与图 2(b)~(f)相对应的畸变相位分布,图 4(f)~(j)为相应的成像结果。结果表明:湍流引起目标成像模糊,导致目标分辨率降低,且湍流越强,目标分辨率越差。最左侧竖线横向尺寸及间距分辨率均为 $1 \mu\text{rad}$,相邻竖线的间距分辨率为 $0.4 \mu\text{rad}$,相邻矩形目标尺寸分辨率为

$4 \mu\text{rad} \times 4 \mu\text{rad}$,最右侧矩形目标尺寸分辨率为 $1 \mu\text{rad} \times 1 \mu\text{rad}$ 。图 4(k)~(o)为基于 canny 法对成像结果(f)~(j)的边缘提取结果,提取结果表明:分辨率达 $1 \mu\text{rad}$ 的边缘可提取,当 Rytov 方差大于 0.1, $0.4 \mu\text{rad}$ 分辨率的边缘不可识别;尺度较大的物体更易分辨,反之小尺度物体不易分辨。

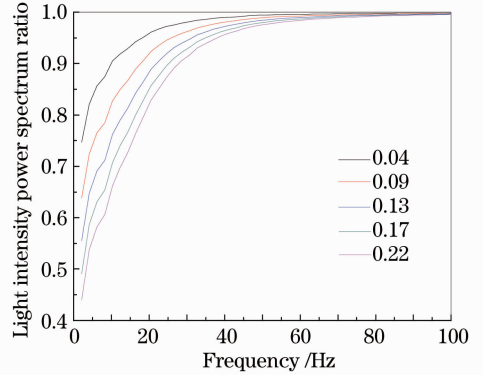


图 3 光强功率谱密度环围比率
Fig. 3 Encircled ratio of light intensity power spectrum density

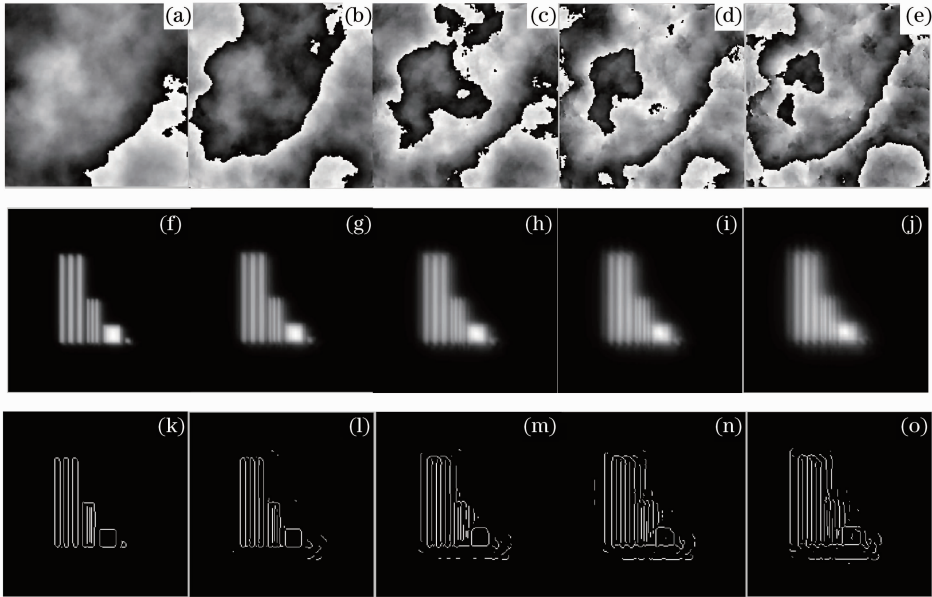


图 4 不同湍流条件下的相位分布。(a)~(e) Rytov 方差分别为:0.04, 0.09, 0.13, 0.17, 0.22;
(f)~(j) 成像结果; (k)~(o) 边缘提取结果

Fig. 4 Phase distribution under different turbulence. (a)~(e) Rytov variance: 0.04, 0.09, 0.13, 0.17, 0.22;
(f)~(j) corresponding imaging results; (k)~(o) edge extracting results

采用功率谱密度环围比率来描述相位的空间尺度,结果如图 5 所示。结果直观反映了相位起伏的空间尺度,随着湍流强度增加,相位功率谱高频分量增加,导致成像质量降低。相对于图 3,相位起伏的空间尺度[图 4 (a)中 90%环围比率对应的频率为 43 Hz]小于光强起伏的空间尺度。

4.3 采用多光束合成提高辐照光强均匀性

根据 4.1 节的分析结果,通过提高辐照激光的光强均匀性可提高对目标轮廓的辨识能力,而采用多光束进行光强叠加是提高辐照激光均匀性的主要手段^[10]。无大气湍流,中等湍流(MT; $r_0 = 7 \text{ cm}$, Rytov 方差 0.44)和弱湍流(WT; $r_0 = 10.7 \text{ cm}$, Rytov 方差 0.22)条件下,单束光(SB)、4束光(FBs)和 9束光

(NBs)的典型照明图样如图 6 所示,考虑光束之间的夹角大于等晕角,相干性较弱为光强叠加。分析单束,4束和9束光的照明效果,出于两方面考虑:1)组合光束的数目差别大,照明光强均匀性差别明显便于对比;2)可与文献[5]中林肯实验室主动照明实验的测量结果进行对比,结果具有一致性。

图 6 中每幅图对应的光强起伏方差依次为 1.36,0.8,0.55,1.08,0.63 和 0.53,对应的功率谱密度环围比率如图 7 所示,90%环围比率对应的频率依次为:8.51、5.31、2.92、6.31、3.43、1.57 Hz。结果表明:光束数目的增加,光强起伏减弱,光强起伏空间尺度增大,有效提高了辐照激光的光强均匀性;9束光照明能够满足光强均匀度优于 0.58。

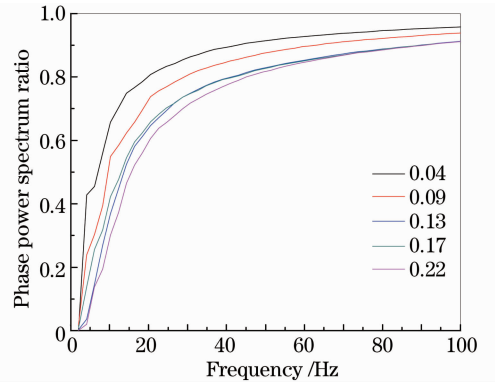


图 5 相位功率谱密度环围比率
Fig. 5 Encircled ratio of phase power spectrum density

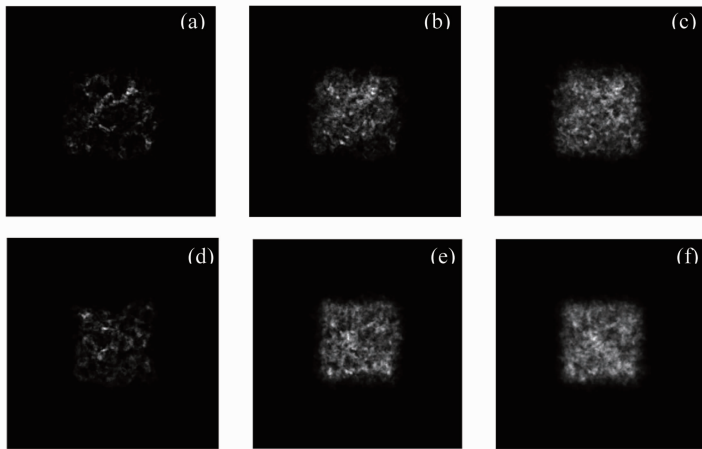


图 6 照明激光光强分布。(a)单束光,中等湍流;(b)4束光,中等湍流;(c)9束光,中等湍流;(d)单光束,弱湍流;(e)4束光,弱湍流;(f)9束光,弱湍流

Fig. 6 Intensity distribution of illuminating laser. (a) SB, MT; (b) FBs, MT; (c) NBs, MT; (d) SB, WT; (e) FBs, WT; (f) NBs, WT

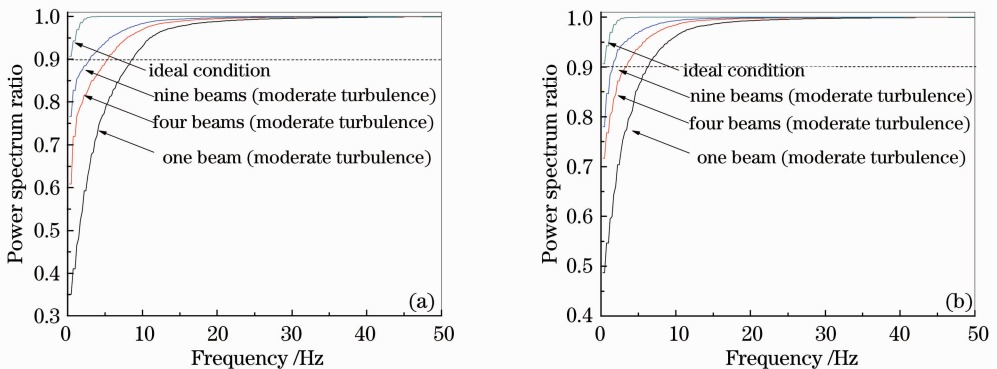


图 7 二维功率谱密度环围比率。(a)中等湍流;(b)弱湍流

Fig. 7 Encircled ratio of two dimensional power spectrum density. (a) MT; (b) WT

4.4 成像质量的改善

大气湍流造成主动照明激光光强分布不均匀,使得目标的亮度分布存在亮区和暗区,影响对目标的轮廓识别;同时,大气湍流引起照明激光的相位产

生畸变,使得目标成像模糊,降低对目标的分辨能力。多光束光强合成可提高光强分布的均匀性,自适应光学系统通过校正相位畸变降低相位功率谱的高频分量,从而提高对远距离目标的分辨能力。

图 8 为光强起伏方差 0.48, 畸变相位标准误差为 0.18λ 条件下的目标成像结果和边缘提取结果。图 8(a) 中虽然存在光强分布不均匀和像模糊, 但图 8(b) 中仍然能提取出分辨率 $1 \mu\text{rad}$ 的目标边缘, 可实现 $1 \mu\text{rad}$ 量级的远程面目标识别。

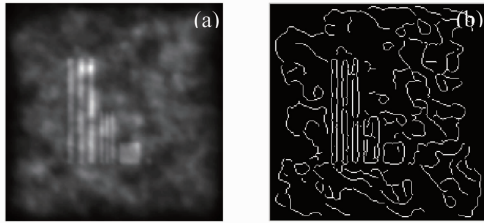


图 8 (a) 目标成像结果; (b) 边缘提取结果

Fig. 8 (a) Imaging result; (b) edge extracting result

5 结 论

远距离空中目标激光照明需要解决大气湍流引起的目标面处照明光强分布不均匀和激光波前畸变等问题。通过数值模拟的方法对不同大气湍流强度条件下的目标成像结果进行了模拟, 结果表明: 照明光强起伏方差优于 0.5, 波前畸变标准误差优于 0.2λ , 在大气湍流下可对远距离目标实现 $1 \mu\text{rad}$ 量级的分辨能力。目前, 自适应光学系统校正大气湍流波前畸变比较成熟, 残余误差均方根值可控制在 0.1λ 内, 满足清晰成像条件, 重点需研究多路激光合成照明提高光强均匀性。

参 考 文 献

- 1 Qiang Xiwen, Wang Tieliang, Wu Naiqing. Multi-beam laser atmospheric transmission [J]. Optoelectronics Technology, 1999, 19(3): 167-173.
强希文, 王铁良, 吴乃清. 多光束激光大气传输[J]. 光电子技术, 1999, 19(3): 167-173.
- 2 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 2004.
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- 3 Ye Yidong, Zhang Wei, Luo Zhongxiang, et al.. Numeric simulation of laser illumination for air objects [J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(s1): 293-296.
叶一东, 张卫, 锥仲祥, 等. 空中目标激光照明的数值模拟[J]. 中国激光, 2002, 29(s1): 293-296.
- 4 Wu Wuming, Ning Yu, Ren Yajie, et al.. Research progress of scintillations for laser array beams in atmospheric turbulence [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070008.
吴武明, 宁禹, 任亚杰, 等. 阵列光束在湍流大气中传输的光强闪烁研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070008.
- 5 H Charles, T B Herbert, V Daniel, et al.. Atmospheric compensation and tracking using active illumination [J]. Lincoln Laboratory Journal, 1998, 11(1): 5-26.
- 6 E J Scot, E K Jan. Atmospheric effects on active illumination [C]. SPIE, 2005, 5895: 58950D.
- 7 L C Andrews, R L Phillips. Laser Beam Propagation Through Random Media [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- 8 B M Welsh. A Fourier series based atmospheric phase screen generator for simulating anisoplanatic geometries and temporal evolution [C]. SPIE, 1997, 3125: 327-338.
- 9 G J Gbur. Simulating fields of arbitrary spatial and temporal coherence [J]. Opt Express, 2006, 14(17): 7567-7578.
- 10 S M Flatté, G Y Wang, J Martin. Irradiance variance of optical waves through atmospheric turbulence by numerical simulation and comparison with experiment [J]. Opt Soc Am A, 1993, 10(11): 2363-2370.

栏目编辑: 张浩佳