

阵列光束在湍流大气中传输的光强闪烁研究进展

吴武明^{1,2,3} 宁禹³ 任亚杰³ 吴毅¹ 舒柏宏³

¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031
² 中国科学院研究生院, 北京 100049
³ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 相比单束光,阵列光束由于各光束之间互不相干,可以减小大气湍流引起的接收光强起伏。特别在激光照明和通信等应用场合中,非相干合成光束可以明显提高照明均匀性和减小通信误码率。简要介绍了相干合成阵列光束在湍流大气中传输的光强闪烁研究进展。针对非相干合成阵列光束在减小光强闪烁的优势,回顾了非相干合成阵列光束在激光主动照明、星地激光大气通信方面的实验研究结果;详细总结了子光束为不同类型的非相干合成阵列光束的理论研究方法和结果,包括不同波长光、基模高斯光、部分相干高斯光和艾里光。实际中子光束一般为部分相干光,它们互相之间存在相干性。提出了下一步应深入开展研究的问题为阵列光束大气的光强闪烁。

关键词 大气光学;光传播;湍流大气;光强闪烁;阵列光束;部分相干光

中图分类号 TN012; P427 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.070008

Research Progress of Scintillations for Laser Array Beams in Atmospheric Turbulence

Wu Wuming^{1,2,3} Ni Yu³ Ren Yajie³ Wu Yi¹ Shu Baihong³

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Compared with single beam, arrays beams which are composed of spatially separated beamlets are suggested to be used for scintillation reduction. Incoherent combined array laser can distinctly reduce intensity fluctuations and signal fades in active illumination and optical communications. Research progress of scintillations for kinds of laser array beams in atmospheric turbulence is depicted, including coherent and incoherent combined array laser. In view of the advantage of incoherent combined array laser, the experiments of laser illumination and satellite laser communication have been summarized simply. And the means and results of kinds of beam arrays are described, including different wavelengths beam, fundamental Gaussian beam, partially coherent Gaussian beam and Airy beam. Problems that should be further studied are presented.

Key words atmospheric optics; optical wave propagation; turbulent atmosphere; scintillation; laser array beams; partially coherent beam

OCIS codes 010.1300; 010.1330; 140.3290; 030.1670

1 引言

激光在湍流大气中传输时,其光强随时间变化而产生随机起伏的现象被称为大气闪烁。由于光强是一

收稿日期: 2012-01-05; 收到修改稿日期: 2012-02-01; 网络出版日期: 2012-05-31

基金项目: 中国科学院自适应光学重点实验室基金资助课题。

作者简介: 吴武明(1981—),男,博士研究生,主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: treewwm@gmail.com

导师简介: 吴毅(1960—),男,硕士,研究员,主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: wuyi@aiofm.ac.cn

(通信联系人)

个可直接观测的物理量,大气闪烁在整个湍流大气光学中研究最广泛、历史最悠久。Tatarskii 利用 Rytov 近似方法获得的弱起伏条件下的结果得到了广泛应用。在强起伏情况下,Markov 近似通过求解光场的统计矩方程,得到强起伏条件下的渐近解。对于弱、强临界条件下闪烁问题的分析方法,主要有 Andrews 等的光闪烁理论、修正 Rytov 方法、矩方程解析法以及数值模拟法等^[1]。

阵列光束由于在激光照明、激光通信、惯性约束聚变和定向能武器等方面的应用而日趋受到人们的关注^[2,3]。迄今为止,已有大量文献报道了弱起伏湍流大气中阵列光束的光强闪烁特性研究,特别是针对星地激光通信的实验研究较多。本文主要总结了阵列光束在湍流大气中传输的光强闪烁研究进展。回顾了非相干合成阵列光束的实验研究;详细分析了子光束为不同类型的非相干光阵列光理论方法和结果,提出了下一步应深入研究的问题。

2 合成方式的分类

通常阵列光束的合成方式有两种,即相干合成和非相干合成。相干合成通过主动控制阵列光束中各子光束相位,一般要求子光束保持窄线宽、线偏光输出。而非相干合成只需控制每一个阵元光束的出射方向,使其在接受靶面上会聚,对子光束的相位、波长、偏振态等没有任何要求^[4]。

阵列光束中的各子光束可分为完全相干光和部分相干光,一般对完全相干的基模高斯光束研究的较多。但鉴于实际中完全相干的基模高斯光束很难获得,大部分是部分相干光,而部分相干光可以减少湍流大气的影 响。所以相比完全相干光阵列,部分相干光阵列受大气湍流影响更小,在接收面上的光强闪烁也越小。部分相干光可用交叉谱密度函数描述为

$$W(r_1, r_2, z) = \langle E^*(r_1, z)E(r_2, z) \rangle, \quad (1)$$

式中 $E(r, z)$ 为位置矢量 (r, z) 的光场复振幅, $\langle \rangle$ 表示系综平均。交叉谱密度函数的对角元为光强,即 $I(r, z) = W(r, r, z)$, 复相干度可定义为

$$\mu(r_1, r_2, z) = W(r_1, r_2, z) / \sqrt{I(r_1, z)I(r_2, z)}. \quad (2)$$

当 $|\mu(r_1, r_2, z)| = 1$ 时为完全相干光; $|\mu(r_1, r_2, z)| = 0$ 时为完全非相干光; 对部分相干光复相干度值在 0 和 1 之间。

需要说明的是,对于子光束为完全相干光时,相干合成阵列光束在数学上表达式可表示为光场振幅叠加;当子光束为部分相干光时,可表示为交叉谱密度叠加;但是对于非相干合成阵列光束都可表示为各子光束的光强直接叠加。

3 阵列光束在湍流大气中的光强闪烁

3.1 相干合成阵列光束

相比单束光而言,相干合成阵列光束可以大大提高输出亮度,特别在能量传输应用方面:与传统单口径高能激光系统相比,相干合成光纤激光阵列构成的高能激光系统在系统成本、热管理、光束控制等方面都具有显著优势,所以近年来国际上掀起了相干合成阵列光束大气传输研究的热潮,主要集中在光束扩展、传输效率和光束质量等方面。

对于光强起伏,由于减少大气闪烁的效果不如非相干合成阵列光束等原因,相干合成阵列光束在湍流大气中传输的光强闪烁研究较少。2008 年, Eyyuboglu 等^[5]研究了准直发射的高斯光阵列闪烁特性,利用 Rytov 近似方法,获得了径向分布的相干合成高斯阵列光在弱湍流下的接受面处的闪烁指数表达式。当各束光大小 $a_s = 1$ cm, 各光束中心位置 $r_0 = 2$ cm, $\lambda = 1.55$ μm , 湍流功率谱为 von Karman 模型(内尺度 $l_0 = 1$ mm, 外尺度 L_0 无穷大), 湍流强度 $C_n^2 = 10^{-15}$ $\text{m}^{-2/3}$ 时, 接受面处的轴闪烁指数随传输距离 L 的变化如图 1 所示。可以看出,当 $L < 1.4$ km 时,单束高斯光束($r_0 = 0, N = 1$)具有最小的闪烁指数,而当 $L > 1.4$ km, 5、10 束阵列光的闪烁指数都小于单束高斯光束。但是单束高斯光束($r_0 = 2, N = 1$)的离轴闪烁指数最大。随着子光束数目的增加,闪烁指数的变化不大,且湍流内外尺度大小对阵列光束的闪烁指数几乎没有影响。

3.2 非相干合成阵列光束实验研究

在激光照明中,非相干合成阵列光束可以明显提高照明均匀性;而在激光通信过程中,随着发射光束数目的增加,接收光强分布曲线更接近于对数正态分布,可以大大减小激光通信系统的误码率。

3.2.1 激光主动照明

为验证机载激光武器照明系统的性能,美国从1996年开始在林肯实验室和星火光学靶场使用马萨诸塞州西滩的密尔斯通山的火塘望远镜装置对距离约5.4 km的模拟目标进行了主动跟踪和补偿实验。先后开展了1、4、9束激光照明成像测量等实验,照明激光波长约 $0.5\ \mu\text{m}$,单束光发射口径都为4 cm。多束光排成圆环状准直发射,光束间距约7 cm,通过调整各束光的发射方向,使到达靶目标处的光斑尽量重合^[6]。

如图2所示,跟踪开环成像实验结果显示,强度起伏的减少削弱了闪烁引起的图像抖动。分别用1、4、9束激光照明进行了主动跟踪实验。在所研究的Rytov方差(对数振幅起伏)范围内,当用9束照明代替单束照明时,观察到导弹轴瞄准抖动误差减少了近1/2。

3.2.2 星地激光大气通信

大气激光通信由于具有通信容量大、重量轻、功耗和体积小、保密性高、抗电磁干扰能力强等优点,激光通信掀起了世界性的研究热潮。针对大气湍流导致的大气闪烁、光束漂移、到达角起伏和波前畸变等效应的影响,研究人员提出了多光束(非相干合成阵列光)发射技术。比如在美日联合进行的地面和卫星间激光通信验证实验(GOLD)系统、美国的空技术实验模型-2系统、欧洲航天局的半导体激光通信星间链路实验系统和Lucent、Lightpointe、Cannon等公司的近地面短距离自由空间光通信(FSO)产品中均采用了多光束^[7]。下面简要总结在星地激光通信中采用非相干合成阵列光束减小光强闪烁的实验结果。

1995年10月到1996年5月,美日联合进行的多次实验,成功验证了多光束发射技术在星地激光通信中克服大气湍流效应方面的有效性,Kim等^[8]同时测量了接收光强起伏。结果表明,当接收天线口径一定时,随着发射光束数目的增加,大气湍流引起的接收光强起伏依次减小。采用单光束时强度起伏很大,远场的接收光强分布曲线更接近于指数衰减分布。

1998年开始,美国JPL实验室^[9]利用地面站和位于Strawberry Peak的光学终端进行46.8 km的地面远距离激光链路实验,该实验对多光束发射和大口径接收光强闪烁的补偿效应进行了验证,实验链路海拔高度在2 km以上。在2000年的实验中,8束波长为780 nm的信标光通过口径为0.6 m的望远镜发出,光学终端通过8.5 cm口径接收信标光进行精跟踪实验,同时向

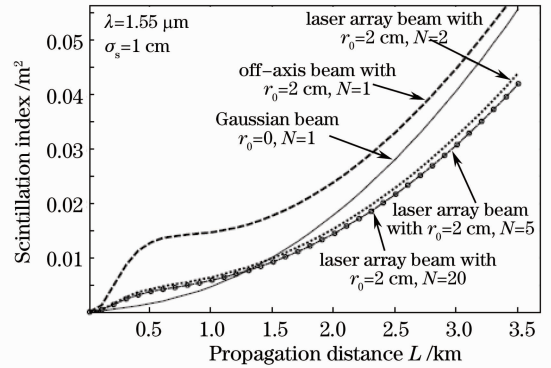


图1 不同数目阵列光到达接受面处闪烁指数随传输距离的变化

Fig. 1 Variation of the scintillation index versus propagation length for Gaussian, off-axis and three laser array beam types

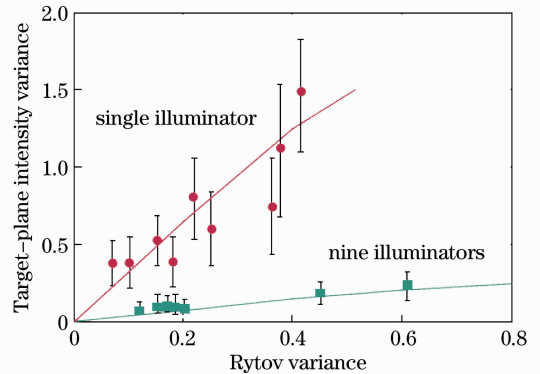


图2 单束、9束光照明目标后的平均强度方差

Fig. 2 Average target-plane intensity variance for single-beam and nine-beam illumination

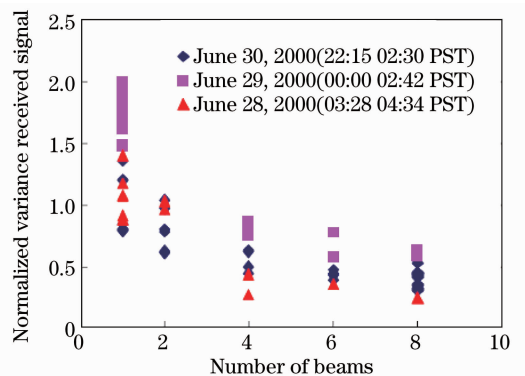


图3 多束光闪烁指数测量结果

Fig. 3 Measured reduction of scintillation index as a result of multi-beam averaging

地面站发射信号光。不同数目的信标光发射时,测量到的信标光闪烁指数(归一化光强起伏方差)如图3所示。结果表明,闪烁指数的减小倍数与 \sqrt{N} 成正比(N 为光束数目)。

3.3 非相干合成阵列光束理论研究

相比单束光,非相干合成阵列光束的各光束之间互不相干,可以显著减小大气湍流引起的接收光强起伏,而对于不同类型的子光束,其闪烁特性也不同。由于利用 Rytov 近似方法可获得弱起伏条件下的闪烁指数,所以对于非相干合成阵列光束,光强闪烁大部分工作集中在弱强度湍流大气的闪烁指数方面,下面总结分析各种不同子光束的阵列光束闪烁指数的理论研究方法和结果。

3.3.1 不同波长光束

2006年,Peleg等^[10]利用 Rytov 近似法,在假设接收面探测器响应时间较长的基础上,计算了两束不同波长的基模高斯光到达接收面处轴和离轴闪烁指数的减小量。他们把闪烁指数分解为自强度分布和交叉强度分布两部分:

$$\sigma_r^2(r,L) = \sigma_{i,s}^2(r,L) + \sigma_{i,c}^2(r,L) - 1, \quad (3)$$

式中 $\sigma_{i,s}^2(r,L) = [\langle I_1^2(r_1,L) \rangle + \langle I_1^2(r_2,L) \rangle] / \langle I(r,L) \rangle^2$ 表示自强度分布闪烁指数, $\sigma_{i,c}^2(r,L) = 2\langle I_1^2(r_1,L) \rangle \langle I_1^2(r_2,L) \rangle / \langle I(r,L) \rangle^2$ 表示交叉强度分布闪烁指数,其中的 $I(r,L)$ 表示在坐标处 (r,L) 的光强分布。如图4所示,当两束光间距优化后且口径与单光束相同时,相比与两束光总功率相同的单束光发射,接受面处的平均化闪烁指数 $\sigma_r^2(r,L)$ 减小了30%~40%。由于湍流对波长依赖性不强,这种方式使闪烁指数减小的幅度不大,在实际中应用不多。

3.3.2 基模高斯光束

2007年,Polynkin等^[11]进行了多束光闪烁的理论和实验分析,主要研究了多束基模高斯光的间距与轴闪烁指数的关系。利用相位屏模拟长为1 km的Kolmogorov均匀大气湍流对光束的影响。当激光波长 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$;大气折射率结构常数 $C_n^2 = 3.8 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,计算得到的Rytov方差约0.19,可以视为弱中湍流。图5给出光束间距对2束和4束光经过1 km长均匀大气的轴闪烁指数的影响,其中光束总功率不变,单束光光斑直径 $d = 1.33 \text{ cm}$, $D_{\text{out}} = 1.49 \text{ mm}$ 为单束光经传输后的光斑大小。当 $d/D_{\text{out}} = 0$ 时,表示为单束光情况。从图中可以看出,当各束光间距处于最佳大小时,2、4束光相比单束光的闪烁指数减小因子为2.1和5.1。另外他们还通过室内定标实验,验证了理论分析的正确性。

2009年,周朴等^[12]利用数值模拟的方法,比较了非相干合成、相干合成基模高斯光阵列与单束基模高斯光的轴闪烁指数。对于阵列光束,包含7束子光束,围成一圆环状,圆环直径 $D = 18 \text{ cm}$,其中各子光斑半径 $\omega_0 = 3 \text{ cm}$,光束间距 $d = 2\omega_0$,单束基模高斯光的光斑半径 $\omega_0 = 18 \text{ cm}$ 。在激光波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$,传输距离为20 km,大气湍流强度 $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 的情况下,图6给出了计算的结果。可以看出,阵列光束的轴闪烁指数都小于单束光的情况。

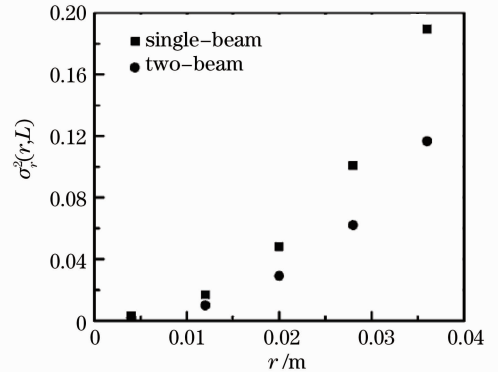


图4 单束和两束平均化的离轴闪烁指数随接收半径的变化

Fig. 4 Circularly averaged radial scintillation index as a function of radius for single beam and two beam

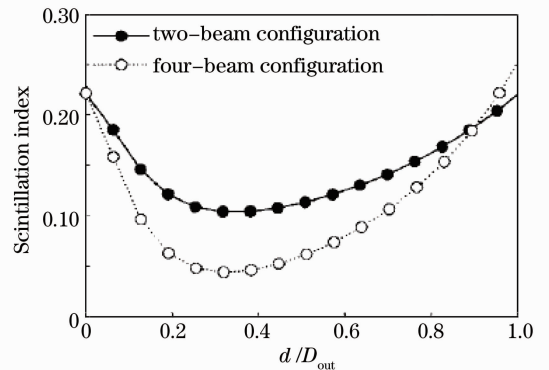


图5 2、4束阵列光发射时,接收面光轴闪烁指数随 d/D_{out} 的变化

Fig. 5 Calculated scintillation index versus d/D_{out} for two-beam configuration and four beam configuration

2011年, Tellez等^[13]利用单束光在中强湍流下的闪烁概率 Gamma-Gamma(GG)分布函数, 利用互不相干的闪烁概率之和的近似公式给出了激光通信中多束非相干光闪烁概率解释表达式, 计算了非相干合成光束的累积分布函数(CDF)。首先, GG分布函数定义为

$$p(I) = 2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}) / [\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)], \quad (4)$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 是伽马函数; $K_p(\cdot)$ 是修正贝塞尔函数; α, β 为大小尺度接受孔径平均闪烁数 σ_x^2, σ_y^2 的倒数, 即

$$\alpha = 1/\sigma_x^2 = 1/\{\exp[\sigma_{\ln x}^2(D)] - 1\},$$

$$\beta = 1/\sigma_y^2 = 1/\{\exp[\sigma_{\ln y}^2(D)] - 1\};$$

$\sigma_{\ln x}^2(D)$ 和 $\sigma_{\ln y}^2(D)$ 是接受孔径平均对数归一化强度起伏方差。

对于多束非相干光发射, 当各束光间距大于闪烁等晕角要求的距离时, 即各束光的闪烁互不相关, 则相应的大小尺度接收孔径平均闪烁数倒数 α_N, β_N 表达式可简化为 $\alpha_N = N\alpha + \epsilon_N, \beta_N = N\beta$, 其中 ϵ_N 为误差修正因子, 定义为

$$\epsilon_N = (N-1)(-0.127 - 0.95\alpha - 0.0058\beta) / (1 + 0.00124\alpha + 0.98\beta). \quad (5)$$

当 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-17} \text{m}^{-2/3}$, 传输距离 $L = 100 \text{km}$, 准直发射的高斯光的 $W_0 = 5 \text{cm}$, $D = 10 \text{cm}$, 阵列光总功率 $P_T = 1 \text{W}$ 时, 利用分析得到的解析解和多层相位屏模拟分别计算了接收端处的 CDF, 如图 7 所示。图中 I_T 为给定的接收功率阈值, P 为接收功率, T_x 为光束数目。随着阵列光束数目的增加, 接收端处的 CDF 减小, 即通信中的衰落概率变小, 而且解析解和数值模拟具有较好的一致性。

另外, 当各束光之间存在部分相干时, 利用和非相干合成光束类似的方法, 通过拟合公式给出了阵列光束相应的大小尺度接收孔径平均闪烁数倒数 α_N, β_N 表达式^[14]。当各束光之间间距为 d 时, α_N, β_N 分别可表示为

$$\alpha_N = \alpha[(N\alpha + \epsilon)/\alpha]^{f[\rho(d)]}, \quad \beta_N = \beta N^{f[\rho(d)]}, \quad (6)$$

式中 $\rho(d) \approx \exp(-0.6875d/\rho_c)$, $f[\rho(d)] \approx [1 - \exp(-0.6875d/\rho_c)]^{1.4894}$ 。这种分析方法为分析各束光之间存在部分相干时的闪烁特性提供了一种思路。

3.3.3 部分相干高斯光束

为了减少大气闪烁的影响, Korotkova等^[15]的理论研究表明, 单束部分相干光与单束完全相干光相比, 前者受大气湍流的影响较小, 能降低接收面上的光强起伏。

2003年, 刘维慧等^[16,17]在 Rytov 方差的基础上, 利用 Andrews 的唯像闪烁模型, 推导出部分相干高斯光通过强大气湍流后其对数光强起伏方差的公式。当各束光的对数光强起伏方差相等时, 多束部分相干高斯光传播一定距离后, 简单假定叠加后总方差 $\sigma_{\ln I}^2$ 表达式为

$$\sigma_{\ln I}^2 = [(1-\gamma)/n + \gamma]\sigma_{\ln I}^2, \quad (7)$$

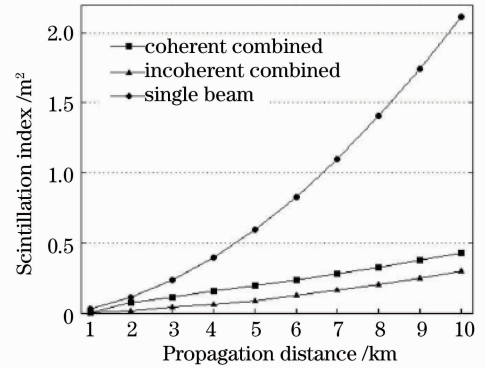


图 6 不同类型光束模拟计算得到的轴闪烁指数

Fig. 6 Variation of the on-axis scintillation index versus propagation distance for single-beam, coherent combined beam, and incoherent combined beam

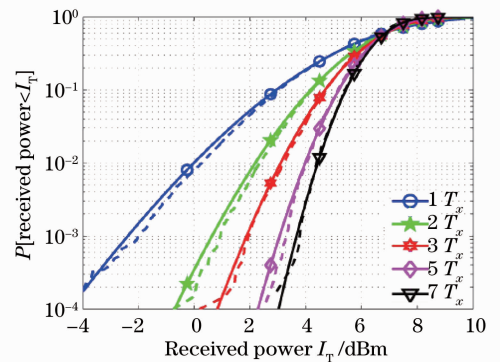


图 7 数值模拟(虚线)和理论公式(实线)计算得到的累积分布函数

Fig. 7 Analytical CDF (solid curves) and wave-optics results (dashed curves) plotted for one through seven beams

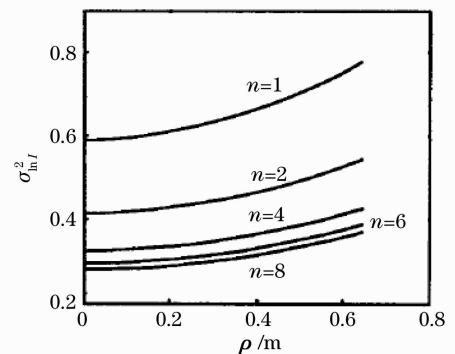


图 8 接收面对数光强起伏方差随不同数目光束的变化

Fig. 8 Target-plane intensity fluctuation variance versus beam numbers on the different receiving plane

式中 γ 表示 n 束光之间的相关程度,当 $\gamma = 1$ 时,光束完全相关,这与用单束光的效果没有区别。图 8 给出了当 $\gamma = 0.4$ 时,随着光束数目的增多,在接收平面上对数光强起伏方差的变化情况,图中 ρ 为接收面上的径向矢量。由图可见,光束数目越多,起伏方差降低越明显。分析结果近似地给出了部分相干光之间存在部分相干时的闪烁特性。

3.3.4 艾里光束

虽然部分相干光受大气湍流的影响较小,但其发散角较相干光的大,经过大气传输后到达接收面的光斑面积也较大,而其阵列光需要调整各束光的最佳间距才能具有最小的闪烁指数。另外准直发射时,接收端阵列光束也很难完全重叠在一起,存在功率密度较低的缺点。艾里(Airy)光作为一种特殊光束受到关注,它具有自重构能力、不受大气影响而自动保持其光强形态的优点,多束光平行发射时在接收端光强能够较好地叠加在一起。

2010年,Yalong Gu等^[18]分析了4束非相干合成艾里光束大气闪烁特性。首先在 $(x,y,0)$ 处单束光场分布可定义为

$$U(s_{xm}, s_{ym}) = Ai(s_{xm}) \exp(as_{xm}) Ai(s_{ym}) \exp(as_{ym}), \quad (8)$$

式中 $s_{xm} = \left[\sqrt{2}x \cos \frac{(3+2m)\pi}{4} + d \right] / x_0$, $s_{ym} = \left[\sqrt{2}y \cos \frac{(3+2m)\pi}{4} + d \right] / y_0$; 下标 m 表示第 m 束光。当 $x_0 = y_0 = 0.012$ m, $a = 0.1$, $d = 0.066$ 时,经过 3 km 长均匀大气传输后,准直发射的 4 束光的光强峰值在接收面上完全叠加在一起。通过多层相位屏技术模拟方法,当 $C_n^2 = 10^{-14}$ m^{-2/3}, $\lambda = 1.55$ μ m 时,计算得到的闪烁指数为 0.2135,是单束光的闪烁指数 1/4 左右。这说明了通过选择合适的参数, n 束艾里光在互不相关的大气湍流影响下可以使接收面处的光强最大化,同时闪烁指数可减小到单束光的 $1/n$ 左右。

4 结束语

理论和实验研究表明,阵列光束受大气闪烁的影响要比单束光小。考虑到在激光照明、激光通信等应用场合,非相干合成光束在湍流大气中传输的光强闪烁研究较丰富,许多研究集中在闪烁指数、光强分布及衰落概率等重要的参数的定量分析上。

在理论分析方面,由于在强起伏条件下的闪烁问题研究较复杂,闪烁饱和问题依然未得到根本解决;而且考虑接收孔径平均效应需要考虑的因素较多,因此,当前大部分工作限于利用 Rytov 近似方法研究基模高斯阵列光束在弱起伏条件下单点闪烁指数的解析解方面。而实际上接收口径都有一定的面积,由于孔径平均效应会导致方差降低,所以在实际工作中需要考虑孔径平均后的闪烁指数。而当各束光为部分相干光且存在相关性时,一般很难求出复杂方程的解析解,这方面的问题是值得重点研究的方向。另一方面,数值模拟可以直接得到接收端的光场信息,能够模拟从弱到强起伏条件下大气湍流对光强闪烁的影响,但是对于单束部分相干光,由于其光场的模拟一般是在一定的初始相干光场上叠加随时间变化的随机相位,部分相干光阵列需要计算很长时间,需要考虑其他的部分相干性模拟方法^[19]。下一步可以通过结合实际的多光束激光照明、激光通信实验,考虑实际的部分相干光束,对其在湍流大气中的传输进行数值模拟、理论分析,对比实验结果,逐步完善数值模拟、理论分析的准确性。

参 考 文 献

- 1 Rao Ruizhong. Laser Beam Propagation Through in Turbulence Atmosphere(1)[M]. Anhui: Science and Technology Publishing House, 2005. 175~214
- 2 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播(1)[M]. 安徽: 科学技术出版社, 2005. 175~214
- 3 P. Sprangle, A. Ting, J. Pedano *et al.*. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications[J]. *IEEE J. Quant. Elect.*, 2009, **45**(2): 138~148
- 3 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Comparative of coherent combining and incoherent combining of fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 276~280
- 周 朴, 刘泽金, 许晓军 等. 光纤激光相干合成与非相干合成的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 276~280
- 4 Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Propagation efficiency of various combined beams in turbulence atmosphere

- [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 733~738
- 周 朴, 马阎星, 王小林 等. 不同类型合成光束在湍流大气中的传输效率[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 733~738
- 5 H. T. Eyyuboglu, Y. Baykal, Y. Cai. Scintillations of laser array beams[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**(2): 265~271
- 6 C. Higgs, H. T. Barclay, D. V. Murphy *et al.*. Atmospheric compensation and tracking using active illumination[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1998, **11**(1): 5~26
- 7 Jiang Yijun. Theoretical and Experimental Researches on Influences of Atmosphere Turbulence in the Satellite-to-Ground Laser Communication Link[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2010. 2~15
- 姜义君. 星地激光通信链路中大气湍流影响的理论和实验研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2010. 2~15
- 8 I. I. Kim, H. Hakakha, P. Adhikari *et al.*. Scintillation reduction using multiple transmitters [C]. *SPIE*, 1997, **2990**: 102
- 9 A. Biswas, M. W. Wright. Mountain-Top-to-Mountain-Top Optical Link Demonstration; Part I[R]. IPN Progress Report, 2002. 42~149
- 10 A. Peleg, J. V. Moloney. Scintillation index for two Gaussian laser beams with different wavelengths in weak atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(12): 3114~3122
- 11 P. Polynkin, A. Peleg, L. Klein *et al.*. Optimized multiemitter beams for free-space optical communications through turbulent atmosphere[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(8): 885~887
- 12 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaojun Xu *et al.*. Comparative study on the propagation performance of coherently combined and incoherently combined beams[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(8): 1640~1647
- 13 J. A. Tellez, J. D. Schmidt. Multibeam scintillation cumulative distribution function[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(2): 286~288
- 14 J. A. Tellez, J. D. Schmidt. Multiple transmitter performance with appropriate amplitude modulation for free-space optical communication[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(24): 4737~4745
- 15 O. Korotkova, L. C. Andrews, R. L. Phillips. Model for a partially coherent Gaussian beam in atmospheric turbulence with application in Lasercom[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(2): 330~341
- 16 Weihui Liu, Jian Wu. Influence of space between atmospheric channels and beams' number on scintillation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11): 621~624
- 17 Liu Weihui, Wu Jian. Influence of multiple partially coherent beams through strong turbulence on light intensity scintillation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(4): 5~8
- 刘维慧, 吴 健. 多束部分相干光通过强湍流对光强闪烁的影响[J]. *光电工程*, 2004, **31**(4): 5~8
- 18 Y. Gu, G. Gbur. Scintillation of Airy beam arrays in atmospheric turbulence[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(20): 3456~3458
- 19 Qian Xianmei, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Research progress on partially coherent beam propagation in turbulent atmosphere[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(2): 81~93
- 钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中. 部分相干光在湍流大气中传输的研究进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(2): 81~93