

近海激光通信分集技术对大气湍流扰动抑制的实验

李一芒¹, 高世杰^{1,2}, 盛磊¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033 ;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为评估分集收发技术在近海面激光通信系统应用中对大气湍流扰动的抑制作用, 设计了基于对多路 1 550 nm 激光光斑同步采集的验证实验方案。采用由时统终端触发的 FPGA+多核 DSP 架构的实时图像处理系统实现目标中心位置的提取与目标灰度和的统计, 进而得到激光从发射端至接收端的到达角起伏方差和闪烁指数。分别比较了等功率条件下单路发射和双路发射间、双孔径接收与等效单孔径接收间的到达角起伏方差和闪烁指数, 同时比较了不同跨距下双孔径接收的效果。实验表明, 在发射功率相同的情况下, 与单路发射相比, 双路发射能够有效地抑制因大气湍流扰动产生的到达角起伏和光强闪烁; 在接收面积相同情况下, 双孔径接收较单孔径接收所产生的到达角起伏与光强闪烁更弱, 且在一定范围内, 双孔径间的跨距存在最优值。

关键词: 激光通信; 大气湍流; 分集技术; 到达角起伏方差; 闪烁指数

中图分类号: P427.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0322001

Experiment of restraint of atmospheric turbulence using diversity technology based on analysis of offshore laser communication

Li Yimang¹, Gao Shijie^{1,2}, Sheng Lei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To evaluate inhibitory effect of diversity transceiver technology on the atmospheric turbulence in the application of offshore laser communication system, experiment verification scheme of multi-channel synchronous acquisition of laser spot based on 1 550 nm was designed. Extraction of target center position and target gray statistical of real time image processing system were realized by using terminal triggered with the FPGA+ multi-core DSP architecture, and then the arrival angle fluctuation variance and the scintillation index from the laser transmitting terminal to the receiving terminal were obtained. Under the conditions of equal power, arrival angle fluctuation variance and the scintillation index were compared between single way transmitting and double way transmitting, double aperture receiving and equivalent single aperture, and the effect of double aperture receiving was compared under different spans. Experimental results show that the same transmitting power, the arrival angle fluctuation variance and the scintillation index are effectively inhibited caused by atmospheric turbulence with dual way transmitting

收稿日期: 2015-07-09; 修订日期: 2015-08-08

基金项目: 国家 863 计划(2014AA7031010B)

作者简介: 李一芒(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光通信领域图像处理技术方面的研究。Email: liyimangkjd@126.com

compared with single way transmitting; in condition of same reception area, the arrival angle fluctuation variance and scintillation index is more weak through single aperture receiving compared with double aperture receiving. In a certain range, double size span exists optimal values.

Key words: laser communication; atmospheric turbulence; diversity technology;
angle of arrival fluctuation variance; scintillation index

0 引言

无线通信中的分集技术能够在不增加频谱资源和发射功率的情况下, 成倍提高现有系统的信道容量, 并且具有更强的抗干扰和抗衰落能力, 是高速数据传输的优选技术之一, 也是近年来射频通信的研究热点。相较于传统的无线射频通信技术, 激光通信具有带宽高、抗截获能力强和保密性好的优点, 伴随国内海上军事实力的提升, 激光通信技术在舰艇间、舰艇与岸基指挥通讯系统中的应用前景广阔^[1-8]。舰载激光通信系统的信号光需要通过海面上方十几米至几十米的大气, 而近海面大气湍流对激光通信的链路保持和通信质量有着非常严重的影响, 因此研究分集技术对近海面大气湍流扰动抑制有着非常重要的意义。

国内外研究机构在大气激光通信系统中分集技术方面已开展了一些具体的研究工作, 美国海军实验室(U.S. Navy Research Laboratory, NRL)公布了其在切萨皮克湾进行的一系列近海激光通信实验结果, 其中包括了采用多孔径接收技术抑制大气湍流干扰的相关方案与实验数据。在国内, 针对近海激光通信分集技术对大气湍流扰动抑制的研究工作也十分丰富。理论方面, 对近海大气湍流的分析和多孔径效应研究均取得了一定的成果; 实验方面, 武汉大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学和中国科学院安徽光学精密机械研究所等多家单位已进行了水域环境的大气激光通信实验^[9-14]。但目前国内已公开的资料中尚缺少在舰载激光通信系统实战应用环境下开展的多孔径收发实验。

文中介绍了在海拔 15~20 m, 跨海距离 16.25 km 的两地进行的基于图像处理技术的近海大气激光通信系统分集技术特点验证实验。以到达角起伏方差和闪烁指数作为定量评价大气湍流对激光传输扰动的重要参数, 比较了单路发射与等功率双路发

射, 双孔径接收与等效单孔径接收所受大气湍流的影响程度, 并给出了实验条件下双孔径间的最优距离, 为设计采用分集技术的近海激光通信系统提供实验依据。

1 对大气湍流扰动的定量评价

要分析近海激光通信系统中分集技术对大气扰动的抑制作用, 所开展的实验必须具备: ①实验地点与环境能够尽可能与近海激光通信的实际应用地点接近; ②需要提出定量评价分集技术对大气湍流扰动的方法。针对第 2 点, Andrews Larry C. 在其著作中^[15]提出: 到达角起伏方差和闪烁指数分别是大气湍流的“二阶统计(Second-Order Statistics)”和“四阶统计(Fourth-Order Statistics)”, 可以作为定量表征大气湍流强弱的参数。U.S. NRL、长春理工大学、中国科学院安徽光学精密机械研究所、哈尔滨工业大学等多个科研团队均将到达角起伏和闪烁指数作为评价大气湍流的重要参数, 并分别提出了基于到达角起伏和闪烁指数的大气折射率结构常数的测量方法。

根据参考文献^[15], 到达角起伏方差与大气折射率结构常数间的关系如公式(1)所示。

$$\langle \beta^2 \rangle = \begin{cases} 1.64 C_n^2 L l_0^{-1/3} [1 - 0.72 (\kappa_0 l_0)^{1/3}], & 2W_G < l_0 \\ 2.91 C_n^2 L (2W_G)^{-1/3} [1 - 0.81 (2\kappa_0 W_G)^{1/3}], & 2W_G > l_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\langle \beta^2 \rangle$ 为到达角起伏方差, 表示光斑中心的抖动强度; C_n^2 为大气折射率结构常数, 是评价大气湍流强度的重要参数; L 为传输距离; l_0 为大气湍流内尺度, $\kappa_0 = 2\pi/L_0$, L_0 为大气湍流外尺度; W_G 为接收半径。国内外研究团队将公式(1)中“ $[1 - 0.81 (2\kappa_0 W_G)^{1/3}]$ ”项进行了不同程度的简化或估算从而得出多个模型, 表征不同环境和约束条件下大气湍流对激光传输扰动的强度。

由于 NRL 的实验是在舰载激光通信实战应用环境下进行的, 文中采用由其提出的简化公式, 在对内外尺度进行了估计后得到大气折射率结构常数计

算模型如公式(2)所示。

$$C_n^2 = \frac{\sigma_\beta^2 D^{1/3}}{1.093L} \quad (2)$$

式中: σ_β^2 为到达角起伏方差; D 为接收口径的直径。

光强起伏是大气湍流,尤其是近海面大气湍流所引起的最明显的光传输效应之一。通信光在大气湍流中传输时,激光强度随时间变化而产生起伏的现象称之为闪烁,闪烁产生的原因是大气折射率起伏导致载有通信信息的激光相位变化时,也导致上述通信光的振幅产生了起伏,从而产生散射强度的起伏。Tatarskii 在运用 Rytov 近似对激光通过大气等随机介质后的接收光强起伏,即闪烁给出了相应的理论模型如公式(3)所示。

$$\sigma_{\ln}^2 = a C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (3)$$

其中当光波取球面波时, $a=0.496$,取平面波时, $a=1.23$, $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长。

在上述模型基础上,当仅考虑外尺度影响,将内尺度忽略为 0 时的部分修正后的闪烁指数表达式见公式(4)。

$$\sigma_{\ln}^2 = \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \quad (4)$$

式中: σ_R^2 为 Rytov 方差,一般地, $\sigma_R^2 = \sigma_{\ln}^2$ 。在同时考虑内外尺度影响时的修正闪烁指数表达式见公式(5)。

$$\sigma_{\ln, L_n}^2 = \exp\left[\sigma_{\ln}^2 - \sigma_{L_n}^2 + \frac{0.51\sigma_{PL}^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \quad (5)$$

式中: $\sigma_{\ln}^2$, $\sigma_{L_n}^2$ 分别为内外尺度下的闪烁方差, σ_{PL}^2 是考虑内尺度因素的 Rytov 方差。公式(3)~(5)表明无论是否考虑内外尺度的影响,闪烁指数都可以作为评价大气湍流强弱的重要参数,而到达角起伏方差和闪烁指数都与大气湍流的强度成正向关系,因此通过测量到达角起伏方差和闪烁指数的大小,能够评价湍流对激光通信链路干扰的相对强度。

2 同步图像采集与处理系统

到达角起伏方差测量方法和闪烁指数测量方法都需要获得接收端的激光光斑信息,文中采用基于光斑图像提取的方法,实验中图像采集与处理系统的工作过程为:配有相应口径镜头和相应波段滤光片的短波红外相机采集发射端发出的激光光斑图像,采集到的图像 1:1 复制后分路,一路直接存储,一路送入实时图像处理系统中。实时处理系统在完

成对图像的预处理后提取图像中的目标,根据阈值分割后的检测结果计算目标的质心位置与目标灰度和,通过对图像的连续采集与处理,在所得质心位置的变化基础上可以计算到达角起伏方差 $\langle\beta^2\rangle$,根据采集获得的目标灰度和与相机的量子转换效率则能够计算出闪烁指数。

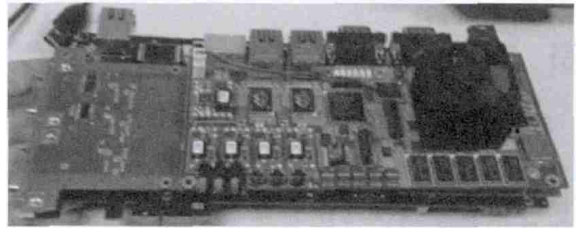


图 1 实时图像处理系统

Fig.1 Real-time image processing system

硬件系统主要由 FPGA 与 8 核 DSP 构成,其工作过程为 FPGA 的图像接收控制模块通过 FPGA 的 IO 资源控制 Camera Link 接口接收数字图像信号,数字图像在缓存模块及 DDR2 所提供的存储资源条件下进行乒乓缓存,图像预处理模块执行中值滤波和高斯滤波等图像预处理操作,FPGA 将预处理后的图像送入 DSP 中进行基于快速盲解卷积的图像复原运算,FPGA 与 DSP 间的通信经 SRIO 协议完成。设计 8 核 DSP 中的 1 个核为决策器和控制器,用于实现 SRIO 通信协议、多核资源的分配与调度以及处理结果的整合,其他 7 核将图像分为 7 份进行并行处理,决策器对图像进行分片时需设置一定的重叠区域,保证跨分区目标的提取。DSP 对图像进行目标提取并经 SRIO 回传至 FPGA, FPGA 内部开辟 PCI-e 通信内核,将目标位置信息以及原始图像信息以 DMA 方式按 PCI-eX4 模式传入计算机中。

在分集接收验证实验中,采用 3 套上述处理系统,其中 2 套镜头口径为 150 mm,1 套口径为 210 mm,统一由时统终端对相机进行触发,并在原始图像第一行写入时间码标记。上述处理过程中,对目标的检测是关键技术,文中采用基于方位滤波器的目标检测算法进行目标检测与位置信息提取,首先对图像进行中值滤波的预处理操作,去除孤立的噪声点,避免噪声对目标检测结果的影响,然后采用方位滤波提高图像的信噪比,最后根据连续多帧目标信息统计目标灰度和。位于海面上方十几米至几十米的大气湍流较强,而上述强度的湍流会使采集过程中出现

灰度饱和或丢失目标等情况。对于单帧采集结果,当灰度值饱和,质心位置与目标灰度和与实际值均会产生较大偏差;而丢失目标时,则无法计算所需信息。大气参数计算采用的并不是瞬时数据,而是一段时间内位置变化与灰度变化的方差,外场实测数据表明,饱和与丢失现象每 50 000 帧(采集频率 500 Hz)出现 1 次,出现时采用其前后 2 帧的平均作为替代,可以忽略其对最终结果所产生的影响。

3 实验结果与分析

3.1 实验环境与装调

实验在位于大连跨海距离 16.25 km, 海拔 20 m 的两地进行, 距离及海拔高度由差分式 GPS 获得, 实验位置与实验场景如图 2 所示。实验在初冬晴朗天气, 西北风约 3 级的条件下展开, 发射端功率需根

据接收情况进行调节, 使像素饱和与目标丢失达到第 2 节中所述情况。

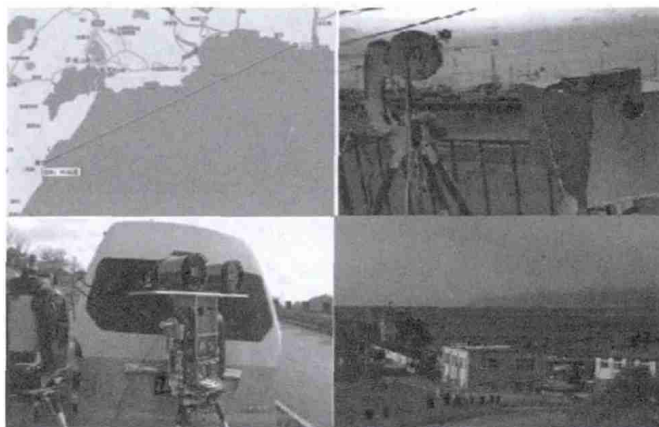


图 2 实验地点与场景

Fig.2 Place and scene of the experiment

实验平台如图 3 所示。

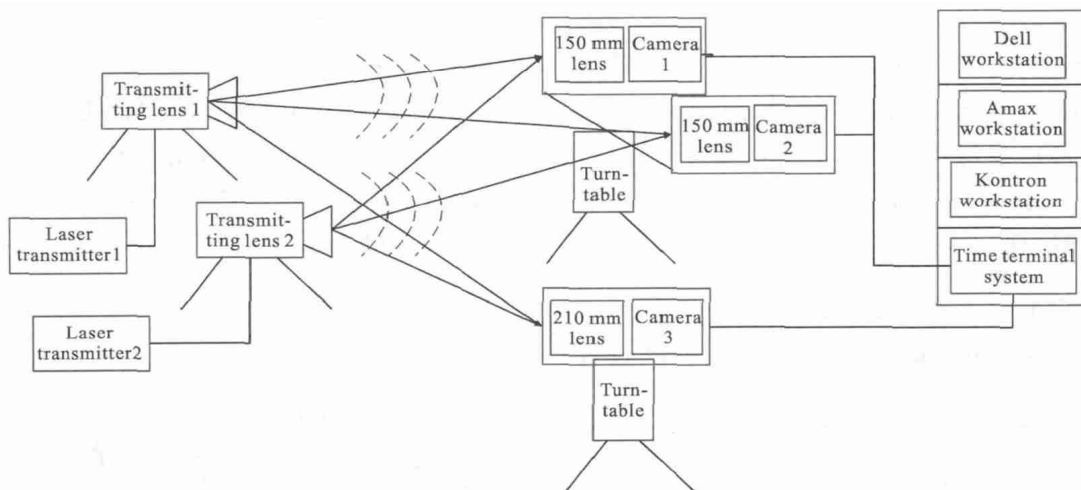


图 3 实验平台框图

Fig.3 Block diagram of the platform

实验方案设计如下:在发射端(图 3 虚线所代表的湍流的左侧),2 路 1 550 nm 波段的激光器分别经 80 mm 口径镜头,向对岸发射激光;在接收端(图 3 虚线右侧),分为 3 个功能单元,平台 1 是分集接收系统,由 2 个口径 150 mm,焦距 1 500 mm 的光学天线,分别连接短波红外相机组成,安置于跨距可调的转台上,平台 2 上放置的是口径 210 mm,焦距 2 000 mm 与短波红外相机组成的等效单孔径比对单元,此外还包括由 3 台工作站和时统与信号分路系统组成的工作站机柜。数据采集时,相机 1、2、3 在时统的触发下分别对光斑图像数据进行采集,叠加时间码后传输给工作站计算机。3 台工作站均安装有 2 块图像采

集卡,对应完成 3 路图像信息的存储与显示。

在每次正式数据采集实验前,需要调整接收端光学天线的位置,使 3 组光学系统的光轴平行,由于发射与接收端相距 16.45 km,到达接收端的光束近似为平行光束,因此判别光轴平行的方法可近似为使 3 组相机上激光光斑位置尽量靠近各自靶面的中心。目标因闪烁和漂移使其质心往往与光斑轮廓拟合出的圆心位置相差很大,因此采用形心作为表征光斑中心位置的参数。装调中,用形心坐标(目标形心与靶面中心位置之差)作为调试中的反馈,通过微位移和转动机构对 3 组光学系统调平。图 4、图 5 分别为装调前后,相机 1、2、3 的成像结果,其中各相机

分辨率为 200×200 , 形心位置以“(列像素, 行像素)”的格式给出, 保留 2 位小数。



图 4 装调前 3 台相机成像结果

Fig.4 Images of 3 cameras before adjustment

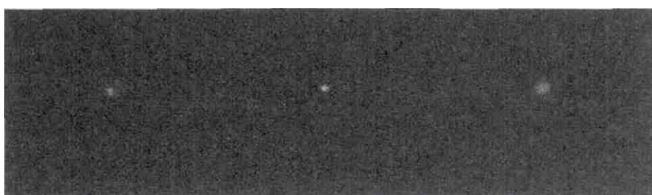


图 5 装调后 3 台相机成像结果

Fig.5 Images of 3 cameras after adjustment

图中装调前光斑的形心位置为 (92.02, 110.45), (51.59, 122.78), (115.23, 114.67)。装调后的形心位置为 (101.55, 99.26), (99.79, 98.31), (99.83, 97.62)。装调前后 3 台相机采集的光斑形心对照如表 1 所示, 其中每行为 1 min 内采集的形心均值, Std 表示取平均后形心位置的标准差。

表 1 装调前后光斑位置比较

Tab.1 Comparison of spot location before and after adjustment

	Before adjustment	After adjustment
Cam1	(92.28, 111.02)	(101.63, 99.37)
Cam2	(51.64, 122.49)	(99.81, 98.60)
Cam3	(115.19, 114.78)	(99.88, 98.07)
Std	(32.18, 5.84)	(1.03, 0.65)

3.2 实验结果与分析

分别按照公式(2)、(3)在同步图像采集所得数据基础上, 计算大气折射率结构常数 C_n^2 的值, 虽然 C_n^2 本身是大气固有值, 但由于 C_n^2 与大气湍流对激光通信系统的扰动是正向关系, 即计算得到的 C_n^2 越大, 表明系统受干扰程度越强, 因此文中的 C_n^2 计算结果仅表示在同一模型下, 大气对激光传输的干扰程度, 不是对 C_n^2 的定量计算。实验按图 3 所设计方案开展, 首先调整激光器 1 的发射功率至 -4.52 dBm, 计算结果如图 6 所示。

采用到达角起伏方差法和闪烁指数法分别对 C_n^2

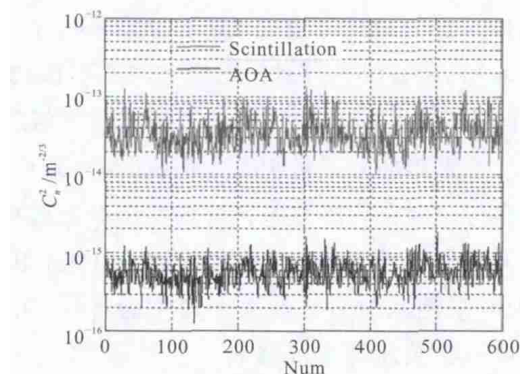


图 6 等功率单发单收结果

Fig.6 Result of single way transmitting single way receiving of equal power

计算均值结果为 3.73×10^{-14} 和 5.85×10^{-16} 。两种方法相差 2 个数量级, 原因为湍流谱包含的高波数湍涡少, 其对闪烁效应起主要贡献, 故闪烁效应弱, 低波数湍涡在湍流谱中的比重多, 漂移效应强, 因此采用经典公式(2)和(3)所计算出的结果在数量级上有差别, 但不影响比较分集技术与单孔径间闪烁效应和漂移效应的强弱。调整激光器 1 和激光器 2 的发射功率为 -6.93 dBm, 使其发射功率近似等效激光器 1 单独以 -4.52 dBm 的功率发射, 得到计算结果如图 7 所示。

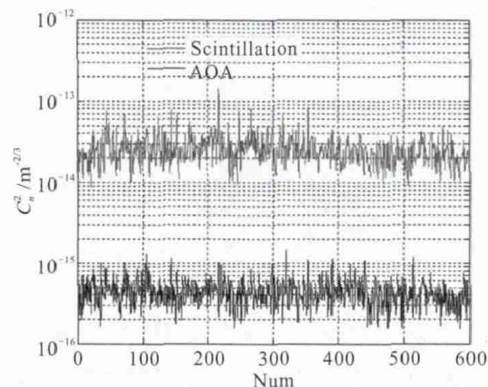


图 7 等功率单发双收结果

Fig.7 Result of single way transmitting double way receiving of equal power

采用到达角起伏方差法和闪烁指数法分别对 C_n^2 计算均值结果为 2.61×10^{-14} 和 4.49×10^{-16} 。综合图 6 和图 7 的计算结果可以看出, 等功率单发双收机制下到达角起伏方差和闪烁指数均小于单发单收的情况。

通过调整机构, 改变双口径中心跨距后(每次更改后都要重新微调 2 个接收镜头, 使光路平行)测量到达角起伏方差和闪烁指数, 图 8 和表 2 为测

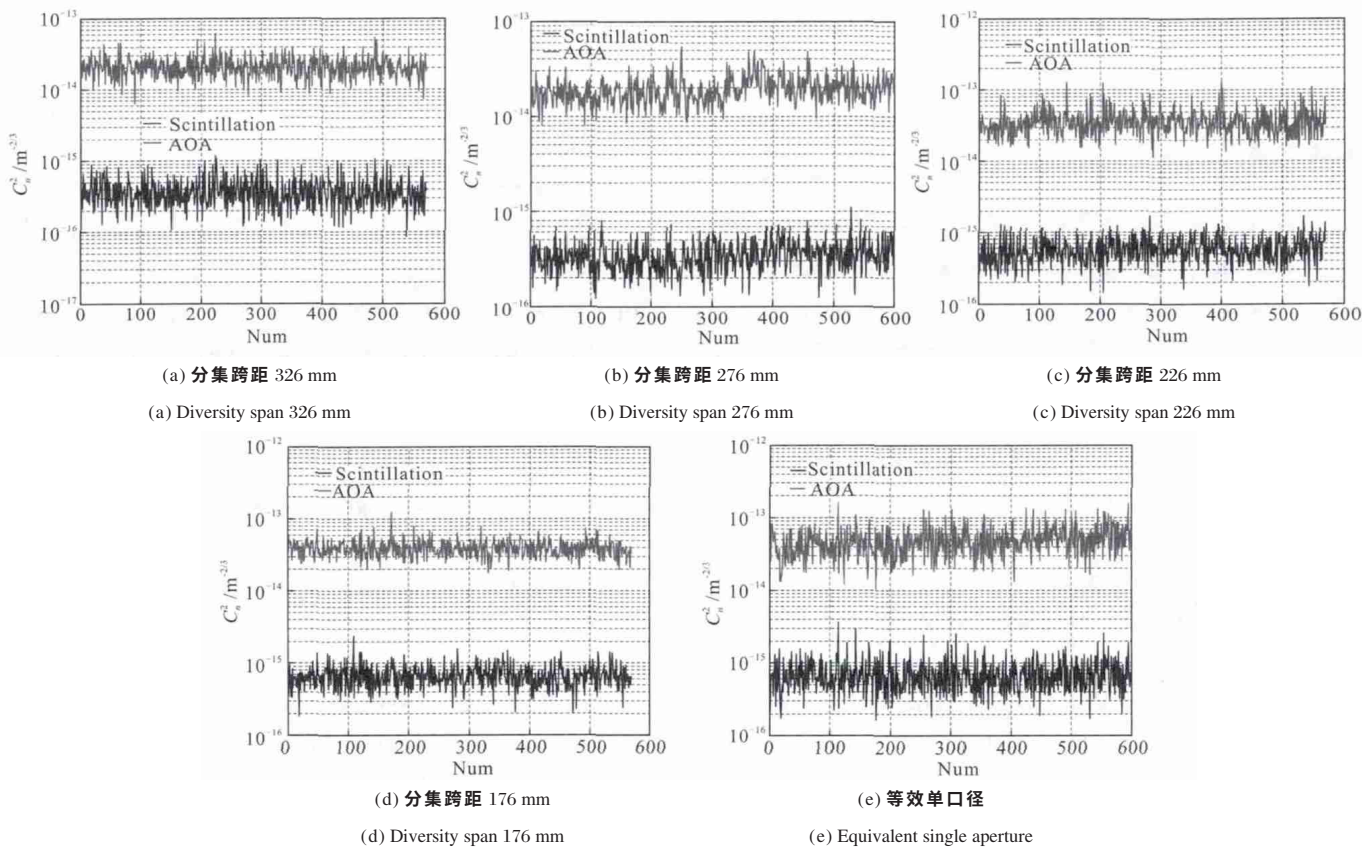


图 8 分集接收结果

Fig.8 Result of diversity receiving

表 2 分集接收结果比较

Tab.2 Comparison of diversity receiving results

	AOA	Scintillation
Diversity span 326 mm	2.13×10^{-14}	3.85×10^{-16}
Diversity span 276 mm	1.96×10^{-14}	3.53×10^{-16}
Diversity span 226 mm	3.73×10^{-14}	5.98×10^{-16}
Diversity span 176 mm	3.96×10^{-14}	6.74×10^{-16}
Equivalent single aperture	5.02×10^{-14}	7.21×10^{-16}

量结果。

综合图 8 和表 2 的结果可以得到,分集接收时,系统受大气湍流影响小于等效口径情况,与理论分析中的定性结论相符。采用口径 210 mm 的单口接收,实际上是与 2 个口径 150 mm 接收进行比对的,即等面积情况下,单口接收和分集接收间效果有何区别。2 个 150 mm 口径的接收面积与 212 mm 单口径相当,由于文中实验光学镜头为采购的货架产品,因此订购了与 212 mm 最接近的 210 mm 口径镜头,与 2 个 150 mm 镜头进行对比,证明接收面积相等情

况下分集与单筒接收的不同。在双孔径平行放置构成分集接收的条件下,孔径跨距为 276 mm 时能够取得最为理想(闪烁与漂移最小)的效果,在进一步重复实验并积累数据的基础上可以作为分集接收系统设计的依据。

4 结 论

分集技术在自用空间激光通信系统中的应用已成为近来相关领域的研究热点。文中基于图像处理技术,开展了远距离(16.45 km)、近海面(海拔 15~20 m)大气激光通信系统分集技术应用的验证实验。以到达角起伏方差和闪烁指数作为评价指标,定量比较了双发单收与等功率单发单收机制间,单发双收与等效口径的单发单收机制间,大气湍流对激光通信系统的影响。实验结果表明,在近海面环境下,分集收发机制较单发单收机制对大气湍流扰动有明显的抑制作用,实验同时还验证了当采用多接收器时,各接收天线间的排布和距离会影响对激光束的接收效果。在现有执行机构条件下,双孔径光学天线跨距为 276 mm 时闪烁

与漂移程度最弱。上述实验结果对分集式船载激光通信系统的研制提供了实验数据基础和设计依据。

参考文献:

- [1] Fu Qiang, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, et al. Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116–125. (in Chinese)
付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. *中国光学*, 2012, 5(2): 116–125.
- [2] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670–680. (in Chinese)
吴丛均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 670–680.
- [3] Abaza M, Mesleh R, Mansour A, et al. Spatial diversity for FSO communication systems over atmospheric turbulence channels [C]//Wireless Communications and Networking Conference(WCNC), IEEE, 2014, 382(387): 6–9.
- [4] Huang Jipeng, Wang Yanjie, Sun Honghai, et al. Precise position measuring system for laser spots [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(4): 841–848. (in Chinese)
黄继鹏, 王延杰, 孙宏海, 等. 激光光斑位置精确测量系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 841–848.
- [5] Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, et al. Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205007. (in Chinese)
钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205007.
- [6] Kaur P, Jain V K, Kar S. Performance analysis of FSO array receivers in presence of atmospheric turbulence[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2014, 26(12): 1165, 1168.
- [7] Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, et al. Optical principle research of space laser communication network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006003. (in Chinese)
姜会林, 胡源, 丁莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1006003.
- [8] Henniger H, Epple B, Haan H. Maritime mobile optical-propagation channel measurements[C]//Communications(ICC), 2010 IEEE International Conference on, 2010, 1(5): 23–27.
- [9] Chen Chunyi, Yang Huamin, Tong Shoufeng, et al. Measurement experiment and analysis of laser atmospheric structure constant of refractive index [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(10): 423–426. (in Chinese)
陈纯毅, 杨华民, 佟首峰, 等. 激光大气折射率结构常数测量实验与分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(10): 423–426.
- [10] Stell M F, Moore C I, Burris H R. Passive optical monitor for atmospheric turbulence and windspeed[C]//Proceedings of the SPIE, 2003, 5160: 422–431.
- [11] Gao Chong, Tan Liying, Ma Jing, et al. Experimental research of angle-of-arrival fluctuations in free-space optical communications [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 2(2): 177–181. (in Chinese)
高宠, 谭立英, 马晶, 等. 空间光通信的到达角起伏实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 2(2): 177–181.
- [12] Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Comparison of refractive index structure constants of atmospheric turbulence deduced from scintillation and beam wander effects[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(4): 538–542. (in Chinese)
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 利用闪烁和漂移效应测量大气折射率结构常数的对比分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(4): 538–542.
- [13] Wu Xiaoping, Huang Honghua, Qian Xianmei, et al. Thermosonde measurement of temperature structure parameter and temperature spectral power-law exponent profile in the lower stratosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 5(5): 0501001. (in Chinese)
吴晓庆, 黄宏华, 钱仙妹, 等. 低平流层下温度结构常数和温度起伏谱幂率廓线的探空测量 [J]. *光学学报*, 2014, 5(5): 0501001.
- [14] Rao Changhui, Jiang Wenhan, Ling Ning. Atmospheric parameters measurements for non-kolmogorov turbulence with Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(9): 1201–1207. (in Chinese)
饶长辉, 姜文汉, 凌宁. 应用哈特曼–夏克波前传感器测量大气湍流参数[J]. *光学学报*, 2000, 20(9): 1201–1207.
- [15] Andrews Larry C, Phillips Ronald L. Laser Beam Prorogation Through Random Media [M]. Bellingham, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998: 199–210.