

空间分集技术在航空激光通信中的应用研究

赵 静 赵尚弘 李勇军 赵卫虎 刘 韵 李 轩

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 研究了采用空间分集技术补偿机间激光通信链路中的大气湍流影响。基于直接相干探测接收分集系统模型,分析了最佳合并(OC)接收分集的功率增益和中断概率性能,并与等增益合并(EGC)分集和最大选择合并(SMC)分集系统进行了比较。分析结果表明:在强湍流条件和低中断概率时,OC和EGC可获得较高的功率增益,且明显优于SMC系统,其中OC系统性能相对EGC具有优势,二者性能相差较小,但是OC实现方式较复杂,因此实际航空激光通信工程应用中应综合考虑分集技术进行选择。

关键词 光通信; 航空激光通信; 大气湍流; 空间分集; 相干探测

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.080603

Application of Spatial Diversity Technology for Airborne Laser Communication

Zhao Jing Zhao Shanghong Li Yongjun Zhao Weihu Liu Yun Li Xuan

School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

Abstract The spatial diversity can be used to mitigate atmospheric turbulence over airborne optical links. Based on the direct detection receivers, the outage probability and power gain of optimal combining (OC) spatial diversity are compared with those of equal gain combining (EGC) and select-max combining (SMC) diversity. The power gain of these diversity systems is found to be substantial, and the performance of optimal combining is better than those of equal combining and select-max combining, as the performance of equal combining is found to be almost as good as that of optimal combining. But optimal combining is more difficult to implement. Hence the diversity technology should be chosen after comprehensive consideration in actual airborne laser communication engineering applications.

Key words optical communications; airborne optical communication; atmospheric turbulence; spatial diversity; coherent detection

OCIS codes 200.2605; 010.1330; 060.2650

1 引言

激光通信路具有高速率、抗干扰及隐身传输等一系列优势,已成为空间通信技术发展的重要方向^[1-3]。若利用激光链路实现机间信息传输,可进一步以航空平台为节点构建航空网络^[4-6]。航空激光网络不仅可以开展空-空、空-星、空-地等通信连接,为天基信息网络提供重要通信节点和枢纽,还能够与现有机间宽带射频数据链相结合,共同提供高速、安全、可靠的空中通信网络。

在机间通信链路中,首先面临的是大气信道中吸收效应、散射效应以及湍流作用对通信系统的影响,因而存在信道衰落现象,严重时导致链路中断,因此如何有效缓解机间激光通信链路中的大气影响成为亟待解决的关键问题^[7-12]。多孔径发射与接收技术作为一种空间分集方式,通过在发射端从孔径距离大于大气相干长度的发射镜中发射不相干激光束,在接收端非相干叠加后能够克服大气激光信道中的湍流效应以实现大气信道的有效补偿。已有文献[13-15]针对大气激光通信中弱湍流效应影响,采用微波无线通信中的分集接收技术和似然比检测理论进行研究分析,但未考虑湍流效应造成的深度衰落甚至中断情况;分析了多光束系统在不同

收稿日期: 2015-01-15; 收到修改稿日期: 2015-04-01; 网络出版日期: 2015-07-22

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M512066)

作者简介: 赵 静(1988—),女,博士研究生,主要从事空间光通信方面的研究工作。E-mail: panpasi126@126.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事空间光通信与激光技术方面的研究。

E-mail: Zhaoshangh@aliyun.com

背景噪声条件下的信道容量,但未对信道容量、发射/接收天线数量及中断概率关系做出定量分析。

本文基于直接相干探测接收分集系统,在晴朗大气条件下,分析最佳合并(OC)接收分集的功率增益和中断概率性能,并与等增益合并(EGC)分集和最大选择合并(SMC)分集系统进行了比较,试图找出适用于航空网络环境的最佳分集方案。

2 系统模型

机间激光通信链路受到大气吸收和大气散射的影响,激光信号强度会严重衰减;同时受到大气湍流的影响会产生光强闪烁、光束漂移和相位起伏等效应。本文假设机间信道条件为晴朗大气信道,不考虑恶劣的气候环境(如雨、雪和雾等)。

机间激光通信分集系统采用直接探测脉冲位置调制,考虑分集系统中多光束在信道传输中的空间相干性,为保证接收端获得的激光信号满足非相干条件,发射孔径之间的距离 S_i 应满足 Fresnel 半径^[16],即

$$S_i \geq \sqrt{\lambda L}, \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长, L 为通信距离,满足此条件时接收光强满足对数正态分布。当波长选用 1550 nm,发射孔径之间距离需满足 S_i 在 10 cm 量级,这在实际应用中能够实现。

分析最优合并分集系统性能,考虑机间大气激光信道条件,需作以下假设:1) 信息源发送“0”的概率 H_0 和“1”的概率 H_1 相等;2) $R_{i,0}$ 和 $R_{i,1}$ 为第 i 个接收器在第一个和第二个半比特间隙的输出信号; R_0 和 R_1 分别表示在第一个和第二个半比特经过合并处理的输出信号;3) α_{ij} 为从发射器 j 到接收器 i 的时变功率衰减因子, $\ln(\alpha_{ij})$ 服从均值为 $-2\sigma_\chi^2$, 方差为 $4\sigma_\chi^2$ 的正态分布, χ 为对数振幅, σ_χ^2 为对数振幅方差;假设光强衰减相干时间远大于信息码元间隔周期,且 α_{ij} 在码元周期时间 T 内可认为是常数;4) 热噪声、背景噪声及暗电流噪声都是加性且相互独立,可认为是加性高斯白噪声;5) 定义 $m_{n,x}$ 为分集数为 n , 合并方式为 x 时的链路功率余量,即 n 个接收器和合并方式获得中断概率所需的链路功率余量。

无分集大气激光通信系统获得中断概率 P_{out}^* 时所需的链路余量为^[17]

$$m_1 = \exp\{2\sigma_\chi [Q^{-1}(P_{\text{out}}^*) + \sigma_\chi]\} \approx \exp\{2\sigma_\chi [\sqrt{-2 \ln P_{\text{out}}^*} + \sigma_\chi]\}, \quad (2)$$

式中 $Q(x)$ 为高斯 Q 函数,定义为 $Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$ 。在接收端采用最佳合并空间分集的激光通信系统如图 1 所示。系统接收器个数 $n \geq 2$ 。

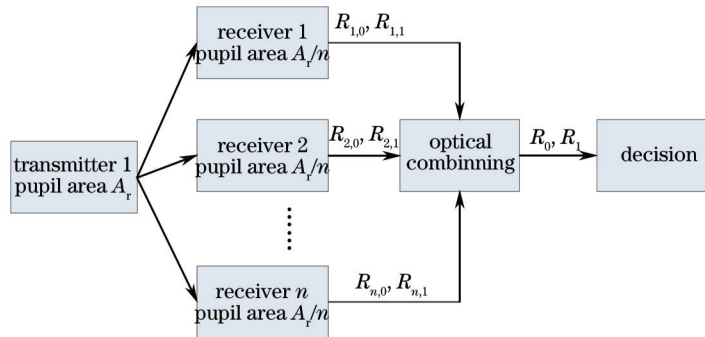


图 1 最佳合并接收分集系统

Fig.1 System with receiver diversity and optimal combining

根据最大似然比判决准则,当满足(3)式时,最佳判决准则判为 H_0 ; 否则判为 H_1 ^[18]。

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{i1} R_{i,0} \geq \sum_{i=1}^n \alpha_{i1} R_{i,1}. \quad (3)$$

接收器输出如(4)式所示,

$$\begin{aligned} H_0: R_{i,0} &= \frac{\alpha_{i1} m_{n,OC} S^*}{n} + \nu_{0i}; & R_{i,1} &= \nu_{0i} \\ H_1: R_{i,0} &= \nu_{0i}; & R_{i,1} &= \frac{\alpha_{i1} m_{n,OC} S^*}{n} + \nu_{0i} \end{aligned}, \quad (4)$$

式中 i 为 1 到 n 之间的数, ν_{0i} 是高斯随机变量,服从均值为 0, 方差为 σ_i^2 的正态分布, S^* 是当链路余量 $m_1=1$

无衰减条件下误码率为 P_e^* 的接收器输出^[18]。

定义 R_0 和 R_1 为

$$R_0 = \sum_{i=1}^n \alpha_{i1} R_{i,0}; \quad R_1 = \sum_{i=1}^n \alpha_{i1} R_{i,1}, \quad (5)$$

取 $\alpha_i = \alpha_{i1}, i = 1, 2, \dots, n$ 。 R_0 和 R_1 的噪声方差为^[18]

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \frac{\sigma_{\text{EGC}}^2}{n} = \frac{N_0^{\text{OC}}}{2}. \quad (6)$$

式中 σ_{EGC}^2 为等增益接收系统噪声方差, 有 $\sigma_{\text{EGC}}^2 = N_0^{\text{EGC}}/2$, N_0^{OC} 为最佳合并分集的系统噪声功率。

3 性能分析

3.1 中断概率

在长时平均误码率条件下, 深度衰落机间激光链路通常面临 1~100 ms 的中断, 通过链路性能度量指标中断概率进行链路性能检测。中断概率定义为短时间内误码率高于系统误码率门限的概率, 中断概率是数据通信网络中链路的重要参数, 同时在航空激光网络的传输层和网络层协议设计中起决定性作用。

定义 $K_{\text{EGC}} = N_0^{\text{EGC}}/N_0^{\text{IREC}}$ 为等增益接收分集与无分集时系统噪声变化比, N_0^{EGC} 为等增益接收分集时系统噪声功率, N_0^{IREC} 为无分集时系统噪声功率。 $K_{\text{EGC}} = 1$ 对于低衰减大气条件和无主动跟踪的情况比较符合实际, 最佳合并分集系统的中断概率表示为

$$P_{\text{OC}} = P\left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{i1}^2 m_{n,\text{OC}} S^*}{n}\right)^2 < (S^*)^2 \frac{N_0^{\text{OC}}}{N_0^{\text{IREC}}}\right] = P\left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{i1}^2 m_{n,\text{OC}} S^*}{n}\right)^2 < (S^*)^2 \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{i1}^2 N_0^{\text{EGC}}}{n N_0^{\text{IREC}}}\right] = P\left[\sum_{i=1}^n \alpha_{i1}^2 < \frac{n}{m_{n,\text{OC}}^2} K_{\text{EGC}}\right] = \int_{-\infty}^{\ln \frac{n}{m_{n,\text{OC}}^2} K_{\text{EGC}}} f(Y) dY =$$

$$\int_{\delta}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\ln\left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n}\right]}} \times \exp\left[-\frac{\left\{\ln\left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n}\right]\right\}^2 y^2}{2 \ln\left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n}\right]}\right] \cdot \sqrt{\ln\left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n}\right]} dy = \int_{\delta}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy = Q(\delta), \quad (7)$$

$$\text{式中 } \delta = \left\{ \ln \left[\frac{m_{n,\text{OC}}^2}{K_{\text{EGC}} \sqrt{1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n}}} + 16\sigma_x^2 \right] \times \left\{ \sqrt{\ln\left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n}\right]} \right\}^{-1} \right\}.$$

假设接收器接收的信号衰减相互独立, 对数正态随机变量 α_{i1}^2 的和可近似为 $\sum_{i=1}^n \alpha_{i1}^2 = Z' = \exp(Y)$ 。根据对数正态分布运算特性, Y 服从均值为 μ_Y , 方差为 σ_Y^2 的正态分布, 其中 μ_Y 和 σ_Y^2 可表示为

$$\mu_Y = \ln n + 4\sigma_x^2 - \frac{1}{2} \ln \left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n} \right]; \quad \sigma_Y^2 = \ln \left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n} \right]. \quad (8)$$

3.2 功率增益

最佳合并接收分集系统的功率增益可表示为

$$G_{\text{OC}} = \frac{m_1}{m_{n,\text{OC}}} = \frac{m_1}{\sqrt{K_{\text{EGC}}} \left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n} \right]^{1/4} \exp \left\{ \frac{1}{2} \left(-\sigma_x + \frac{\ln m_1}{2\sigma_x} \right) \sqrt{\ln \left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n} \right]} - 2\sigma_x^2 \right\}}, \quad (9)$$

式中 m_1 由(2)式给出。当接收分集数 n 趋向于无穷时的最佳合并接收分集系统功率增益为

$$n \rightarrow \infty; \quad \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n} \rightarrow 0; \quad \left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n} \right]^{1/4} \rightarrow 1; \quad \ln \left[1 + \frac{\exp(16\sigma_x^2) - 1}{n} \right] \rightarrow 0$$

$$G_{\text{OC}} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{m_1}{\sqrt{K_{\text{EGC}}} \exp(-2\sigma_x^2)} = \frac{m_1}{\sqrt{K_{\text{EGC}}}} \exp(2\sigma_x^2) \quad (10)$$

3.3 数值仿真

系统分集数 n 是影响接收分集系统性能的重要因素之一,采用蒙特卡罗积分方法分析了在分集数 n 不同的情况下 EGC、OC 的功率增益,以及当接收分集数趋向于无穷时二者的功率增益极限,同时对比了 OC、EGC、SMC 和无分集系统的中断概率随链路余量的变化趋势。其中在不同中断概率和湍流条件影响下的等增益合并和最佳合并接收分集的功率增益随分集数变化的曲线如图 2 所示。系统处于低、中湍流条件下,即 σ_x 取 0.1 和 0.3,仿真参数 $K_{\text{EGC}}=1$, $P_{\text{out}}^*=0.1$ 或 0.01。

由图 2 可知,EGC 和 OC 接收分集的功率增益均随分集数的增大而不断增大,但随着分集数不断增大,功率增益增长的幅度逐渐降低。从图中可以看出当 $\sigma_x=0.3$ 且 $P_{\text{out}}^*=0.01$ 时,即系统处于较强湍流强度和较低中断概率时 EGC 和 OC 均能够获得较大的功率增益,且二者的功率增益几乎相等,OC 分集系统并未体现出其性能优势;这是因为深度衰落通常是随机产生的,最佳合并的加权因子无法即时反映所有路径信道增益的变化,因而无法实现真正的最佳合并过程。这样当一个接收信号发生深度衰落,有没有采用最优合并对系统性能几乎没有影响,同时由于对数正态近似,EGC 曲线与 OC 曲线之间存在细小的差异。

图 3 给出了当接收器数量趋向无穷时,EGC 和 OC 接收分集系统的功率增益随中断概率的变化曲线,由图中曲线可知接收分集系统通过增加接收器数量可获得的功率增益极限。仿真参数 $K_{\text{EGC}}=1$, σ_x 分别取 0.1、0.3、0.5。

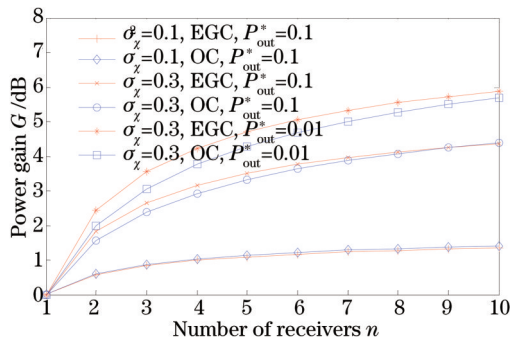


图 2 等增益合并及最佳合并接收分集系统功率增益随分集数变化曲线

Fig.2 Power gains of receiver diversity with EGC and OC systems vary with number of receivers

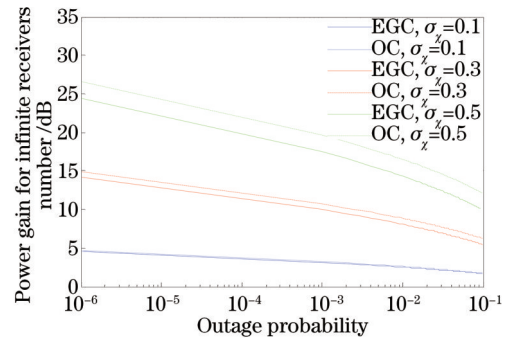


图 3 等增益合并及最佳合并接收分集系统功率增益极限

Fig.3 Power gains of EGC and OC systems as the number of receivers approaches infinity

由图 2 可知系统功率增益极限可通过合适数量的接收器获得,图 3 中的变化曲线说明当湍流强度较高及中断概率较低时,系统获得较高的功率增益;EGC 和 OC 均获得与单接收系统相比显著的功率增益,OC 分集系统在低、中、高不同湍流条件下的功率增益均优于 EGC 系统,但相较于 EGC 其功率增益优势并不显著,同时由于 OC 分集系统需要对 n 个衰减因子进行估计,其实现方式与 EGC 相比较为复杂。

图 4 对比了采用最佳合并、等增益合并、最大选择合并分集方式系统与无分集系统的中断概率随链路余量的变化趋势,仿真参数 $K_{\text{EGC}}=1$, $K_{\text{branch}}=1/n$, σ_x 分别取 0.1 和 0.3。

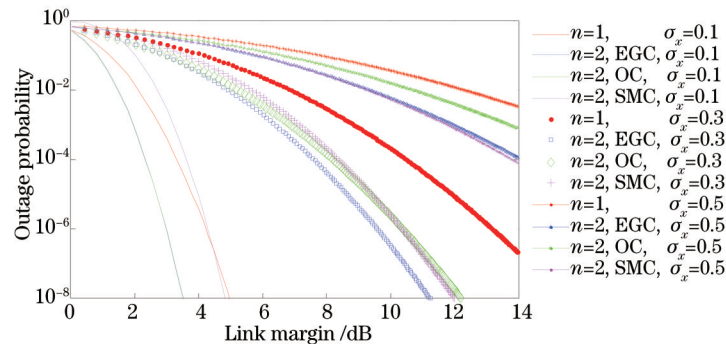


图 4 不同合并方式接收分集系统中断概率

Fig.4 Outage probability of receiver diversity with OC, EGC and SMC

由图4可知,当 $\sigma_x = 0.1$ 时OC能有效降低系统中断概率,且在相同链路余量条件下,EGC曲线接近OC曲线,明显优于SMC;当存在弱湍流且链路余量较小时,采用SMC方式的系统性能劣于无分集系统。这是因为在无衰减时,每个SMC接收器输出信号是无分集系统的 $1/n$,所以当系统加入弱湍流,即 $\sigma_x = 0.1$ 时,输出信号几乎总是低于门限。然而随着链路余量增加,SMC分集曲线与无分集曲线相交,当链路余量增加超过相交点,SMC能够获得低于无分集系统的中断概率。当 $\sigma_x = 0.3$ 时,EGC在链路余量较小条件下与OC性能接近,均优于SMC系统性能,随链路余量增大,EGC系统中断概率逐渐增加并接近SMC;当 $\sigma_x = 0.5$ 时EGC与SMC性能接近,二者系统性能明显优于OC系统。

4 结 论

在晴朗大气激光通信系统中大气湍流会造成严重的传输损失,通常发生10 dB~20 dB的衰落,因此对于可靠通信必须采用有效缓解技术来提高传输可靠性。分析了OC接收分集的功率增益和中断概率性能,并与EGC分集和SMC分集系统进行了比较,得到以下结论:1) 大气激光通信系统中的分集技术可以显著降低中断概率同时提供较高链路余量,当系统处于强湍流和低中断概率时EGC和OC均能够获得较大的功率增益;2) OC分集系统在低、中、高不同湍流条件下的功率增益极限均优于EGC系统,OC分集系统性能在弱湍流条件下获得最低中断概率,EGC在低、中、高不同湍流条件下均可获得较低的中断概率,由于OC需要对 n 个衰减因子进行估计,因此EGC的简单实现与OC相比更具有吸引力。由于长时、频繁的中断关系到端到端网络时延,且通过传输控制层协议(TCP)可能引发相反反应(例如TCP中的窗口关闭和阶段终止)将严重影响网络性能,因此下一步将针对中断概率对航空激光网络的传输层性能影响进行讨论。

参 考 文 献

- 1 J H Shapiro. Imaging and Optical Communication through Atmospheric Turbulence[M]. //John W Strohbehn. Laser Beam Propagation in the Atmosphere, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1978: 171-222.
- 2 K E Wilson, P R Leatherman, R Cleis, *et al.*. Results of the Compensated Earth-Moon-Earth Retroreflector Laser Link (CEMERLL) Experiment[R]. TDA Progress Report, JPL-TDA-PR-42-131, 1997: 1-13.
- 3 Dong Wei, Zhou Jinsong, Nie Yunfeng, *et al.*. Optical design of airborne hyperspectral imaging system with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0511007.
董 伟,周锦松,聂云峰,等. 机载大视场高光谱成像系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0511007.
- 4 Jacob J, Macdonald T, Walther F. Airborne laser communications: The challenges of the propagation medium[C]. Military Communications Conference, 2006: 1-6.
- 5 Gangl M E, Fisher D S, Zimmermann J, *et al.*. Airborne laser communication terminal for intelligence, surveillance and reconnaissance[C]. SPIE, 2004, 5550: 93.
- 6 Jiang Huilin, Zhang Zhigang, Tong Shoufeng, *et al.*. Analysis for the environmental adaptation and key technologies of airborne laser communication system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1): 299-302.
姜会林,张志刚,佟首峰,等. 机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(s1): 299-302.
- 7 M M Fernandez, V A Vlnrotter. Coherent optical receiver for PPM signals received through atmospheric turbulence: Performance analysis and preliminary experimental results[C]. SPIE, 2004, 5338: 151-162.
- 8 M M Fernandez, V A Vlnrotter, R Mukai, *et al.*. Coherent optical array receiver experiment: Design, implementation and BER performance of a multichannel coherent optical receiver for PPM signals under atmospheric turbulence[C]. SPIE, 2006, 6105: 61050R.
- 9 K E Wilson, M Jeganathan, J R Lesh, *et al.*. Results from Phase-1 and Phase-2 GOLD Experiments[R]. TDA Progress Report, JPL-TDA-PR-42-128, 1997.
- 10 Li Xiaofeng. The Principle and Technology of the Satellite-to-Ground Laser Communication Links[M]. BeiJing: National Defence Industry Press, 2007: 119-130.
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 119-130.
- 11 Qiang Ruoxin, Zhao Shanghong, Wang Xiang, *et al.*. Ultraviolet multipath scattering link model under the influence of high altitude turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605002.
强若馨,赵尚弘,王 翔,等. 高空湍流影响下紫外光多径散射链路模型[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605002.

- 12 Wang Ligu, Wu Zhensen, Wang Mingjun. Numerical research on effect of the size of the target in turbulence on the residual scintillation index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0201003.
王利国, 吴振森, 王明军. 大气湍流中目标尺寸对回波闪烁残余指数影响的数值研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0201003.
- 13 V Vilnrotter, M Srinivasan. Optical communications through atmospheric turbulence using photodetector arrays[C]. SPIE, 2001, 4272: 282-292.
- 14 S M Haas, J H Shapiro. Capacity of wireless optical communication[J]. *IEEE J Sel Area Comm*, 2003, 21(8): 1346-1357.
- 15 Wang Xiang, Zhao Shanghong, Zheng Guangwei, *et al.*. Performance analysis of high altitude platform optical communication links with spatial diversity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106001.
王翔, 赵尚弘, 郑光威, 等. 基于空间分集的高空平台光链路性能研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106001.
- 16 Lbrahim M M, Lbrahim A M. Performance analysis of optical receivers with space diversity reception[J]. *IEE Proc Communication*, 1996, 143(6): 369-372.
- 17 Shin E J, Chan V WS. Optical communication over the turbulent atmospheric channel using spatial diversity[C]. *Global Telecommunications Conference*, 2002, 3: 2055-2060.
- 18 Ma Dongtang. Study on Multiple-Beam Transmission and Reception Techniques for Atmospheric Laser Communication [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004: 30-45.
马东堂. 大气激光通信中的多光束发射和接收技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004: 30-45.

栏目编辑: 王晓球