

Effects of turbulent atmosphere on the properties of the multilayer radial beam array communication system

Xuejing Yuan, Hua Tang[#]

School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

#Email: huatang@buaa.edu.cn

Abstract

Based on the Rytov approximation theory, the analytical expression for the scintillation index of multiple beams propagating through non-Kolmogorov turbulence is derived, where the incoherent combination is considered. The intensity fluctuation and bit error rate (BER) of the on-off-keying modulated multilayer radial beam array are studied. The results show that with a given beam array radius, the scintillation index and BER can be reduced by adjusting the layer number of the beam array and the beam number on each layer.

Keywords: Rytov Approximation Theory; Scintillation Index; Intensity Fluctuation; Multilayer Radial Beam Array; BER

湍流大气对多层径向光束阵列通信系统性能的影响*

袁雪敬, 唐华

北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191

摘要: 基于李托夫近似理论, 推导出了非相干合成情况下多高斯光束在非科尔莫哥洛夫湍流大气模型中闪烁指数的解析表达式, 研究了多层径向光束阵列在弱湍流中传输的强度起伏和开关键控调制情况下系统的误码率。结果表明在给定阵列半径的情况下, 可以通过调整阵列层数和每层上的光束数目以减小接收端的强度起伏和误码率。

关键词: 李托夫近似理论; 闪烁指数; 强度起伏; 多层径向光束阵列; 误码率

引言

多光束合成是提高激光功率的有效方法, 主要有相干合成和非相干合成两种方式^[1-2]。同时, 多个激光束经过不同的路径传输到远场接收端并实现强度叠加, 可以平滑接收信号的光强起伏, 从而抑制大气湍流效应^[3-5]。已有研究对多种光束在大气湍流中的传输特性及系统误码率均有深入讨论^[6-24]。结果表明合理空间排布的光束阵列可以有效减小光强起伏和光束扩展现象, 同时降低通信系统的误码率。此外, 径向阵列在较小的空间占空比的情况下有可能得到较好的合成效果^[25], 而且在给定阵列面积的情况下, 单层径向光束阵列的闪烁指数随着光束数目的增大而减小, 但是在光束数目比较大时增大光束数目对降低闪烁指数的效果不太明显^[16]。为分析在较大光束数目情况下湍流大气对光束阵列通信系统的影响, 基于李托夫(Rytov)近似理论^[26], 我们计算了光束阵列在非科尔莫哥洛夫(non-Kolmogorov)大气湍流模型中传输时接收平面上的闪烁指数, 分析了多层径向光束阵列层数和各层光束数目的不同对闪烁指数和误码率的影响, 从而为在提高接收光场能量的同时减小大气湍流的影响提供理论参考。本研究对实际空间激光通信系统的设计有潜在

*基金资助: 受国家自然科学基金支持资助 (No.61101005 和 No.61008049)。

的应用价值。

1 多层径向光束阵列发射系统

设在发射端平面上，一个多层径向光束阵列共由 P 个半径分别为 R_{0p} 的圆环组成，其中第 $p(1 \leq p \leq P)$ 层上有 N_p 个光束均匀分布，则在该层上每两个相邻的高斯光束之间的夹角为 $\varphi_{0p} = 2\pi/N_p$ ，且此径向光束阵列总的光束数目为 $N = \sum_{p=1}^P N_p$ ，总的半径为 $R_0 = R_{0p}$ 。

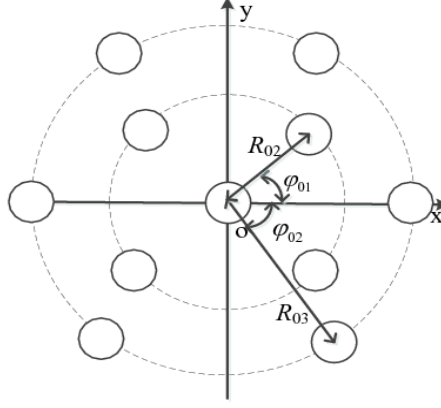


图 1 多层径向光束阵列结构示意图

在发射平面上中心坐标位于 $\mathbf{d}_n = (x_n, y_n)$ 处的第 n 个高斯光束的场分布为^[24]

$$E_n(\mathbf{r}, 0, t) = \sum_{n=1}^N A_{0n} \exp \left[- \left(\frac{1}{W_{0n}^2} + \frac{ik_n}{2F_{0n}} \right) \mathbf{r}_n^2 \right] \exp[-i2\pi k_n t], \quad (1)$$

其中 W_{0n} 为该光束在发射平面的束腰半径， F_{0n} 为相前曲率半径， $\mathbf{r}_n = \mathbf{r} - \mathbf{d}_n$ ， \mathbf{r} 是在接收平面上的坐标矢量， $k_n = 2\pi/\lambda_n$ 为光波数， λ_n 为光波波长。

非相干合成情况下多层光束阵列在接收平面上总的光强分布为^[25]

$$I(\mathbf{r}, L) = \sum_{n=1}^N I_n(\mathbf{r}_n, L), \quad (2)$$

式中 L 为从源平面到接收平面的传播距离， $I_n(\mathbf{r}_n, L) = \langle E_n(\mathbf{r}_n, L) E_n^*(\mathbf{r}_n, L) \rangle_t$ 表示接收端第 n 个光束的强度， $\langle \cdot \rangle_t$ 表示时间平均。

根据随机介质中的辐射场传输原理，接收平面上的闪烁指数为^[24]

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 = \frac{\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \langle I_m(\mathbf{r}_m, L) I_n(\mathbf{r}_n, L) \rangle}{\left(\sum_{n=1}^N \langle I_n(\mathbf{r}_n, L) \rangle \right)^2} - 1, \quad (3)$$

$\langle \cdot \rangle$ 为取系综平均，在弱起伏情况下，根据 Rytov 近似理论可得到第 n 个光束的平均强度为^[24]

$$\langle I_n(\mathbf{r}_n, L) \rangle = I_{0n}(\mathbf{r}_n, L) \exp[H_{1n}(\mathbf{r}_n, L)], \quad (4)$$

其中 $H_{1n}(\mathbf{r}_n, L) = 4\pi^2 k_n^2 L \int_0^1 d\xi \int_0^\infty d\kappa \kappa \Phi_n(\kappa) \left[I_0(2\Lambda_n r_n \xi \kappa) \exp(-\Lambda_n L \kappa^2 \xi^2 / k_n) - 1 \right]$ ， $\xi = 1 - z/L$ ， z 为传输距离。 $\Phi_n(\kappa)$ 为大气湍流折射率功率谱， κ 为在极坐标下的二维空间频率， I_0 为修正的零阶贝塞尔函数， $I_{0n}(\mathbf{r}_n, L)$ 为不考虑大气湍流影响时第 n 束光在接收端的强度^[24]。同理，光强的二阶统计特性为

$$\begin{aligned} & \langle I_m(\mathbf{r}_m, L) I_n(\mathbf{r}_n, L) \rangle \\ &= \langle I_m(\mathbf{r}_m, L) \rangle \langle I_n(\mathbf{r}_n, L) \rangle \exp \left\{ 2 \operatorname{Re} \left[E_{2mn}(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n; k_m, k_n) + E_{3mn}(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n; k_m, k_n) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 E_{2mn} 和 E_{3mn} 是关于 κ 和 ξ 的两个二重积分^[24]。

本文采用基本的 non-Kolmogorov 谱大气湍流模型，即 $\Phi_n(\kappa, \alpha) = A(\alpha) \tilde{C}_n^2 \kappa^{-\alpha}$, $0 < \kappa < \infty$, $3 < \alpha < 4$, 其中 α 是广义指数, $A(\alpha)$ 为广义振幅, \tilde{C}_n^2 为广义的折射率结构参数, 将该模型带入公式(4)和(5)可得^[27]

$$H_{1n}(\mathbf{r}_n, L) = \frac{2\pi^2 A(\alpha) \Gamma(1-\alpha/2) \tilde{C}_n^2 k_n^{3-\alpha/2} L^{\alpha/2} \Lambda_n^{\alpha/2-1}}{\alpha-1} {}_1F_1\left(1-\frac{\alpha}{2}; 1; \frac{2r^2}{W^2}\right), \quad (6)$$

$$E_{2mn}(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n; k_m, k_n) = \frac{\pi^2 A(\alpha) \Gamma(1-\alpha/2) \tilde{C}_n^2 k_m k_n L^{\alpha/2} i^{\alpha/2-1}}{2^{\alpha/2-2}} \int_0^1 \left[\left\{ \xi \left(\gamma_m/k_m - \gamma_n^*/k_n \right) \right\}^{\alpha/2-1} \right] \\ \times {}_1F_1\left(1-\alpha/2; 1; \left[-(\gamma_m \mathbf{r}_m - \gamma_n^* \mathbf{r}_n)^2 / \left\{ i2L\xi \left(\gamma_m/k_m - \gamma_n^*/k_n \right) \right\} \right] \right) d\xi, \quad (7)$$

$$E_{3mn}(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n; k_m, k_n) = -\frac{\pi^2 A(\alpha) \Gamma(1-\alpha/2) \tilde{C}_n^2 k_m k_n L^{\alpha/2} i^{\alpha/2-1}}{2^{\alpha/2-2}} \int_0^1 \left[\left\{ \xi \left(\gamma_m/k_m + \gamma_n/k_n \right) \right\}^{\alpha/2-1} \right] \\ \times {}_1F_1\left(1-\alpha/2; 1; \left[-(\gamma_m \mathbf{r}_m - \gamma_n \mathbf{r}_n)^2 / \left\{ i2L\xi \left(\gamma_m/k_m + \gamma_n/k_n \right) \right\} \right] \right) d\xi, \quad (8)$$

式中 ${}_1F_1(a; c; z) = \sum_{j=0}^{\infty} \left[\frac{(a)_j}{(c)_j} \frac{z^j}{j!} \right]$, $|z| < \infty$ 为第一类合流超几何函数, $\gamma_n = 1 - (\bar{\Theta}_n + i\Lambda_n)\xi$, $\bar{\Theta}_n$ 和 Λ_n 为接收端第 n 个高斯光束的特征参数^[26]。

通信系统的误码率与发射端调制方式和接收端信噪比有关, 在开关键控(OOK)调制和直接探测情况下, 系统的误码率为^[27]

$$BER = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} p_I(I) \operatorname{erfc} \left(\frac{I \langle SNR \rangle}{2\sqrt{2} \langle I \rangle} \right) dI, \quad (9)$$

其中 erfc 为互补误差函数, SNR 是探测器接收信噪比, $p(I)$ 为接收场强度的概率分布, 在弱起伏区域光场强度的统计特性符合对数正态分布^[27]

$$p(I) = \frac{1}{I \sigma_I \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(I/\langle I \rangle) + 0.5\sigma_I^2]^2}{2\sigma_I^2} \right\}, I > 0. \quad (10)$$

2 理论仿真结果与分析

在数值仿真中, 设各光束具有相同的波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 束腰半径 $W_0 = 1 \text{ cm}$, 相前曲率半径 $F_0 = \infty$, non-Kolmogorov 谱中广义指数 $\alpha = 3.8$ 和广义折射率结构常数 $\tilde{C}_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{3-\alpha}$ 。二层光束阵列轴上闪烁指数 σ_I^2 在不同光束数目的情况下随传输距离 L 变化关系如图 2 所示, 其中 $R_0 = 20 \text{ cm}$ 。从图中可以看出与单层相干合成径向光束阵列相似, 在远场区的二层非相干合成光束阵列的闪烁指数小于单光束, 且二层光束阵列比单光束的闪烁指数减小的程度因光束数目的不同而变化。

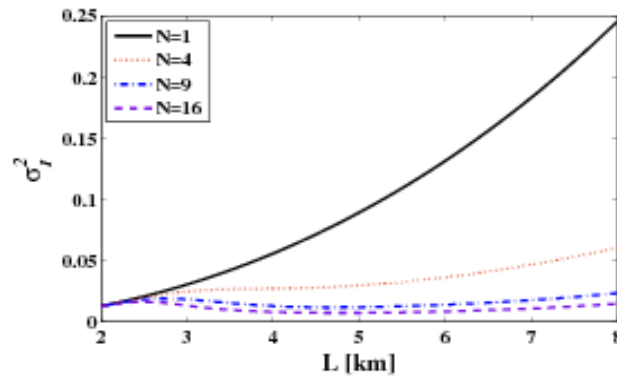


图 2 二重光束阵列闪烁指数在不同的光束数目情况下随传输距离变化关系图。

二层光束阵列轴上闪烁指数 σ_I^2 在不同的阵列半径 R_0 的情况下随光束数目 N 的变化关系如图3所示，其中 $L=8\text{km}$ 。可以看出与单层相干合成径向光束阵列相似，二层非相干合成光束阵列的闪烁指数随着光束数目的增大而减小，且在大的光束数目的情况下趋于定值，这是因为在较多光束的时候，圆周上的光束阵列近似为一个空心光束。在相同光束数目情况下，闪烁指数因光束阵列半径的不同而变化。

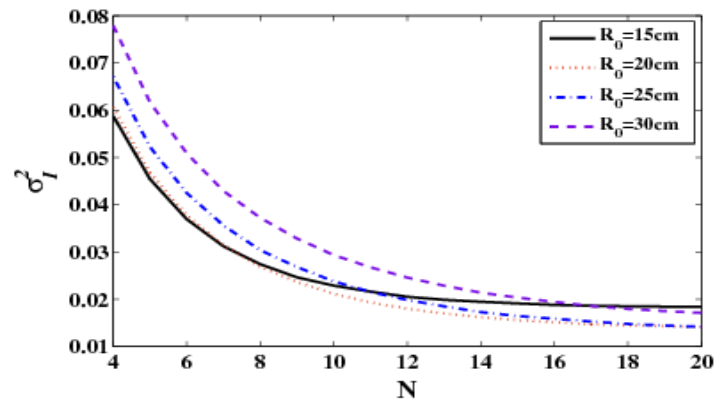


图 3 二重光束阵列闪烁指数在不同的光束阵列半径情况下随光束数目变化关系图。

为满足高功率的需求，在系统设计中需要考虑采用较多光束发射，因此我们考虑将光束分布于多个同心圆环上，下面研究多层径向光束阵列的闪烁指数。当 $N=16$ 时，多层光束阵列轴上闪烁指数 σ_I^2 在不同光束排布情况下随阵列半径 R_0 变化关系如图 4 所示，其中三层光束阵列的各层半径满足 $R_0 = R_{03} = 2R_{02}$ ， $R_{01} = 0$ ， $L=8\text{km}$ 。从图中可知，在给定光束数目和各层半径比的情况下，选取最优的阵列半径 R_{0m} 可以得到最小的闪烁指数；最优的阵列半径 R_{0m} 和其相对应最小闪烁指数因光束阵列的层数和每层上的光束数目的不同而有差异。由于实际的系统设计可能受到空间的限制，因此在给定阵列半径的情况下，可以通过调整光束阵列的层数和各层上的光束数目以减小闪烁指数。

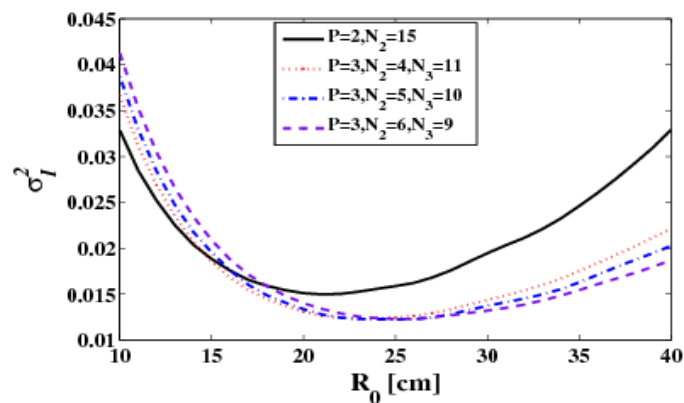


图 4 闪烁指数在不同光束排布情况下随阵列半径变化关系图。

二层光束阵列的误码率 BER 在不同传输距离 L 的情况下随平均信噪比 $\langle SNR \rangle$ 变化关系如图 5 所示，其中 $R_0 = 20\text{cm}$ ， $L=8\text{km}$ 。由图可知，虽然在图 2 中 2~8km 传输距离范围内，4 束光对应的闪烁指数大于 16 束光的情况，但是误码率却不随着光束数目的增大而减小，在某些传输距离时 4 束光对应的误码率却小于 16 束光组成阵列的误码率，这是因为误码率同时受到光强闪烁和接收光强两个因素的影响，不同的光束数目影响了接收到的光强大小。

多层光束阵列的误码率在不同光束排布条件下随平均信噪比变化关系如图 6 所示，其中 $R_0 = 25\text{cm}$ ， $N=16$ 。从图中可以得知，在图 4 中 $R_0 = 25\text{cm}$ 时，三种光束排布情况下闪烁指数相差不大，但是对应的误码率却受光束排布的影响较明显，因此在实际的系统设计中，应当全面考虑光束阵列半径、光束层数和各层上的光束数目减小系统的误码率，而不能只从减小闪烁指数方面设计发射系统的结构。

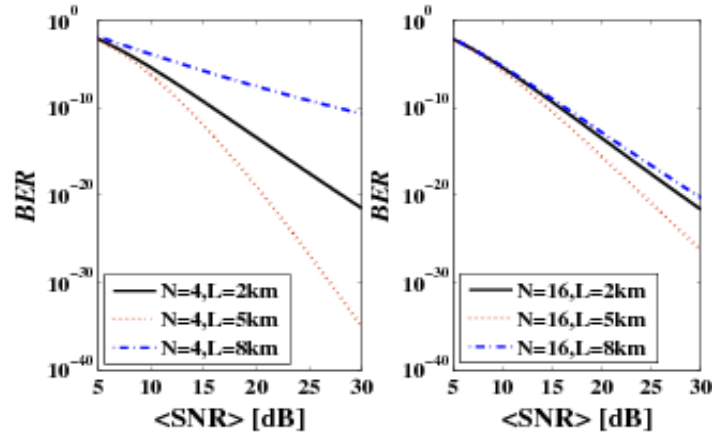


图 5 二重光束阵列误码率在不同传输距离和光束数目情况下随平均信噪比变化关系图。

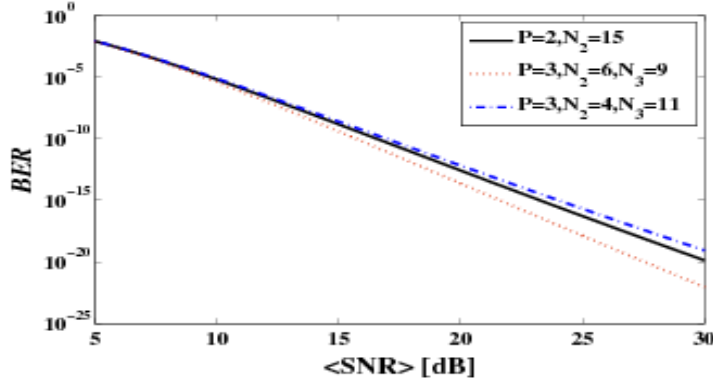


图 6 误码率在不同光束排布情况下随平均信噪比变化关系图。

3 结论

本文研究了湍流大气对非相干合成情况下多光束发射通信系统性能的影响。仿真结果表明在给定半径比例的情况下，多层光束阵列存在最优的阵列半径，使得闪烁指数达到最小值。当阵列面积固定时，闪烁指数随着光束数目的增大而减小，最后趋于稳定值。所以在多层光束阵列系统设计过程中，需要综合考虑有限面积上的阵列层数和每层上的光束数目，从而减小湍流大气对信号的干扰，提高系统性能。

REFERENCES

- [1] P. Zhou, Z.J. Liu, and X.J. Xu. "Comparative of Coherent Combining and Incoherent Combining of Fiber Lasers". [J]. Chinese Journal of Laser, 2009, 36(2): 276~280
- [2] L. Sun, H. Zhao, and W.S. Yang, et al. "Study on Coherent Combination Theory of Multi-beam Laser". [J]. Laser and Infrared, 2007, 32(2): 111~113
- [3] P. Zhou, J. Hou, and Z.L. Chen, et al. "Research Progress of Mitigation Technologies of Turbulence Effects in Atmospheric Optical Communication". [J]. Acta Armamentarii, 2007 19(8): 1254~1256
- [4] P. Zhou, J. Hou, and Z.L. Chen, et al. "Research Progress of Mitigation Technologies of Turbulence Effects in Atmospheric Optical Communication". [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(6): 779~791
- [5] J. Wang, X.G. Tao. "Impact of Multi-beam Launch on Laser Atmospheric Transmission under Turbulence Effect". [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(1): 179~183
- [6] X.L. Ji. "Influence of Atmospheric Turbulence on the Spreading and Directionality of Radial Gaussian Array Beams". [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(1): 692~698
- [7] X.Q. Li, F.L., and Y.L. Zheng, et al. "Influence of Atmosphere Turbulence on the Angular Spreading of Radial Gaussian-Shell Model Array Beams". [J]. Journal of Sichuan Normal University, 2010 33(6): 798~802

- [8] T.H. Lian, S.Y. Wang, and Z. Guo, et al. "Evaluation of Spatial Coherent Combination of Laser Beams". [J]. Journal of Applied Optics, 2011 32(1): 149~154
- [9] X.L. Ji, X.Q. Li. "Influence of Turbulence on the Coherent and Incoherent Combination of Off-axis Gaussian Beams". [J]. Acta Physica Sinica 2008 57(12) : 7674~7679
- [10] B.Z. Li, X.Y. Tao, and B.D. Lu, et al. "Study on the Beam Characteristic of Laser Diode Stacked Array". [J]. Journal of Nanchang University, 2003 25(3): 6~9
- [11] C.J. Li, Y.Q. Shao. "Effect of Geometric Distribution of Beams on Propagation Properties of Multiple Radial Array Beam". [J]. Laser Journal, 2012 33(3): 15~16
- [12] Y.X. Zhang, C.K. Tao. "Angle-of-arrival of Gaussian Schell Beam Propagation in Atmospheric Turbulence". [J]. Acta Photonica Sinica, 2005 34(3): 424~427
- [13] J.S. Huang. "Influence of Multi-aperture Transmitter on the BER of Atmospheric Laser Communication System". [J]. Electronic Design Engineering, 2010 18(2): 21~23
- [14] W.M. Wu, Y. Ning, and Y.J. Ren, et al. "Research Progress of Scintillation for Laser Array Beams in Atmospheric Turbulence". [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2012 49(0700) 070081~070087
- [15] P. Polynkin, A. Peleg, L. Klein, and Laura Klein, et al. "Optimized Multi emitter Beams for Free-space Optical Communications through Turbulent Atmosphere". [J]. Opt. Lett., 2007, 32(8): 885-887
- [16] H. T. Eyyuboğlu, Y. Baykal, and Y. J. Cai. "Scintillations of Laser Array Beams". [J]. Appl. Phys. B, 2008, 91(2): 265~271
- [17] G.Q. Pei. "Performance Research on Multi-beam Transmission and Multi-Aperture Reception in Turbulent Atmosphere". [D]. Xian: Xi'an University of Technology, 2012
- [18] Y. J. Cai, Y. T. Chen, and H. T. Eyyuboğlu, et al. "Propagation of Laser Array Beams in a Turbulent Atmosphere". [J]. Appl. Phys. B, 2007, 88(3): 467~475
- [19] H. Tang, B.L. Ou, and B. Luo, et al. "Average Spreading of a Radial Gaussian Beam Array in Non-Kolmogorov Turbulence". [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2011, 28(6): 1016~1021
- [20] X.L. Ji, H. T. Eyyuboğlu, and Y. Baykal. "Influence of Turbulence on the Effective Radius of Curvature of Radial Gaussian Array Beams". [J]. Optics Express, 2010, 18(7): 6922~6928
- [21] X.Q. Li, X.L. Ji, and F. Yang. "Beam Quality of Radial Gaussian Schell-model Array Beams". [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(4): 604~609
- [22] S.M. Navidpour, M. Kavehrad. "BER Performance of Free-Space Optical Transmission with Spatial Diversity". [J]. IEEE Trans. Commun, 2007, 6(8): 2813~2819
- [23] K.P. Peppas, F. Lazarakis, and A. Alexandridis, et al. "Simple, Accurate Formula for the Average Bit Error Probability of Multiple-input Multiple-output Free-space Optical Links over Negative Exponential Turbulence Channels". [J]. Opt. Lett, 2012, 37(15): 3243~3245
- [24] I.I. Kim, H. Hakakha, and P. Adhikari, et al. "Scintillation Reduction Using Multiple Transmitters". [C]. International Society for Optics and Photonics, 1997, 2990: 102~113
- [25] Y. Z. Li, L.J. Qian, and D.Q. Lua. "Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution". [J]. Optical Fiber Technology, 2009, 15: 226~232
- [26] L.C. Andrews, R.L. Philips. "Laser Beam Propagation through Random Media". [M]. SPIE PRESS, 2005, 81~218
- [27] A. Zilberman, E. Golbraikh, and N.S. Kopeika. "Some limitations on optical communication reliability through Kolmogorov and non-Kolmogorov turbulence". [J]. Optics Communications, 1997.2990: 102-113, SPIE, 283, (2010). 1229~1235

【作者简介】



¹ 袁雪敬（1987- ），女，汉族，硕士，2011 年起就读于北京航空航天大学，主要从事空间激光通信理论的研究。

Email: yjj1987@yeah.net



² 唐华（1980- ），女，汉族，博士，副教授，华南师范大学理学博士，日本京都大学博士后。主要从事光信息处理的研究，包括强激光传输、大气光传输、量子相干及干涉等。

Email: huatang@buaa.edu.cn