

## 激光与光电子学进展

大气湍流信道中部分相干光-光纤阵列  
耦合效率的研究

雷思琛\*, 南友新, 杨玉峰, 吴鹏飞

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 利用大气湍流传输理论和部分相干光交叉谱密度函数,研究了部分相干光-光纤阵列的耦合效率,分析了光源相干度、透镜阵列子孔径数  $N$ 、传输距离、湍流强度和波长对耦合效率的影响。仿真结果表明,透镜阵列可以很好地抑制光源相干度的下降和大气湍流对部分相干光-光纤阵列耦合效率的影响。在等效接收口径一致时,增加  $N$  可以有效提高部分相干光-光纤阵列的耦合效率。当  $N=37$ 、传输距离大于 3 km 时,耦合效率变化曲线趋于稳定。对于波长为 1550 nm,相干度为 0.04 m 的光源,相比单透镜接收,在中、强湍流情况下, $N=37$  的透镜阵列可使耦合效率从 40% 和 8% 分别提高到 60% 和 53%;相比长波长光源,透镜阵列对短波长光源的耦合效率提高更明显。对于波长为 850 nm 和 1550 nm,相干度为 0.04 m 的光源,相比单透镜接收, $N=37$  的透镜阵列可使耦合效率从 18% 和 41% 分别提高到 57% 和 60%。

**关键词** 相干光学; 部分相干光; 光纤阵列; 透镜阵列; 耦合效率

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0501001

Research on Coupling Efficiency of Partially Coherent Light-Fiber Array  
Under Atmospheric Turbulence Channel

Lei Sichen\*, Nan Youxin, Yang Yufeng, Wu Pengfei

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** Using atmospheric turbulence transmission theory and partially coherent light cross spectral density function, the coupling efficiency of partially coherent light-fiber array is studied, and the influences of light source coherence, lens array sub-aperture number  $N$ , transmission distance, turbulence intensity, and wavelength on coupling efficiency are analyzed in this paper. Simulation results show that the lens array can well restrain the decrease of the coherence degree of the light source and the influence of atmospheric turbulence on the coupling efficiency of partially coherent light-fiber array. When the equivalent receiving aperture is the same, the increase of the  $N$  of the lens array can effectively improve the coupling efficiency of partially coherent light-fiber array. When  $N=37$  and the transmission distance is greater than 3 km, the coupling efficiency curve tends to be stable. For a light source with a wavelength of 1550 nm and a coherence of 0.04 m, compared with single-lens reception, the lens array with  $N=37$  can increase the coupling efficiency from 40% and 8% to 60% and 53% respectively in the case of

收稿日期: 2020-08-21; 修回日期: 2020-08-25; 录用日期: 2020-09-03

基金项目: 领域基金(XXX7Y20XXXXXXXXXX4901)、陕西省科技成果转移与推广计划(2020CGXNG-041)、陕西省重点研发计划(2019GY-033)、陕西省教育厅服务地方专项科学研究计划(20JC027)、西安市科技计划(2020KJRC0038)、碑林区 2020 科技计划(GX2009)

\*E-mail: lsc429@163.com

moderate and strong turbulence. Compared with the long-wavelength light source, the coupling efficiency of the lens array to the short-wavelength light source is improved more obvious. For light sources with wavelengths of 850 nm and 1550 nm and a coherence of 0.04 m, compared with single-lens reception, the lens array with  $N=37$  can increase the coupling efficiency from 18% and 41% to 57% and 60%, respectively.

**Key words** coherence optics; partially coherent light; fiber array; lens array; coupling efficiency

**OCIS codes** 030.1670; 040.1240; 140.3295

## 1 引言

与传统微波通信相比,无线激光通信技术具有容量大、带宽高、架设方便以及无需频谱许可等优点。随着地面光纤通信技术的发展,特别是掺铒光纤放大器、波分复用器和解复用器等光纤器件的应用,使无线激光通信得到了快速发展。采用前置光放大器接收技术进行探测之前,需要将光束耦合进光纤,光纤阵列可以提高中远距离激光通信的耦合效率<sup>[1-3]</sup>。现有研究多以完全相干光为理想光源模型,而实际光源存在时间及空间尺度扩展,是部分相干的,因此,在实际通信中有必要研究影响部分相干光耦合效率的因素。

2002年,Ricklin等<sup>[4]</sup>研究了部分相干高斯光束在大气湍流中的传输特性。2015年,Tan等<sup>[5]</sup>以高斯-谢尔模型光束为对象仿真了大气湍流中部分相干光-单透镜-单模光纤的耦合效率,分析了光源相干度对耦合效率的影响;李枫等<sup>[6]</sup>基于随机并行梯度下降(SPGD)算法的自适应光纤耦合器(AFC)阵列接收技术,以完全相干光束为模型,分析了空间光-光纤阵列的耦合效率。2018年,Hu等<sup>[7]</sup>以高斯-谢尔模型光束为例,研究了海洋湍流中部分相干光束与单模光纤的耦合效率。

上述研究主要分析了部分相干光在大气中的传输特性、部分相干光-单模光纤的耦合效率和完全相干光与光纤阵列的耦合效率,并没有对部分相干

光-光纤阵列的耦合效率进行分析。本文利用部分相干光的交叉谱密度和大气湍流传输理论,对部分相干光-光纤阵列的耦合效率进行了数值仿真,并分析了光源相干度、透镜阵列子孔径数 $N$ 、湍流强度、传输距离和波长对部分相干光-光纤阵列耦合效率的影响。研究表明,利用透镜阵列接收,可以提高部分相干光-光纤阵列的耦合效率;相比弱湍流情况,透镜阵列对中、强湍流情况下耦合效率的提高更明显;相比长波长光源,透镜阵列对短波长光源耦合效率的提高更明显。

## 2 部分相干光-透镜阵列-光纤阵列耦合模型

### 2.1 透镜阵列模型

透镜阵列耦合是将照射在 $N$ 个有效阵列单元上的光分别耦合进 $N$ 根等长的分立光纤,通过熔融拉锥技术或简单的合并,使光纤尾端面积与信号光电探测器的光敏面面积一致。透镜阵列的子孔径按照正六边形紧密排列,其排列方式如图1所示。透镜阵列的子孔径数分别取1、7、19和37(子孔径数为1表示单透镜), $D$ 为等效口径的直径。当光斑完全覆盖透镜阵列表面时,需考虑透镜阵列有效透光面积的占有率 $\eta_s$ ,可表示为

$$\eta_s = \frac{N}{N_s^2}, \quad (1)$$

式中, $N_s$ 为阵列沿横向的最大子孔径数。

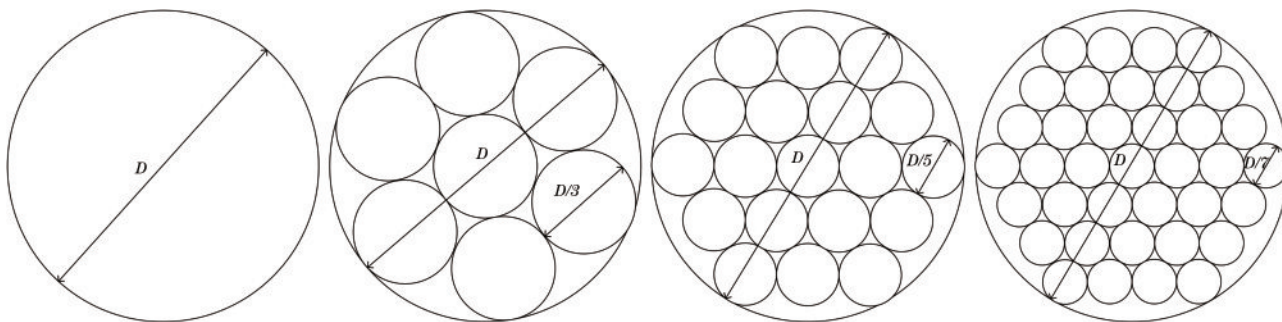


图1 不同子孔径数的透镜阵列。(a) $N=1$ ;(b) $N=7$ ;(c) $N=19$ ;(d) $N=37$

Fig. 1 Lens array with different sub-aperture numbers. (a)  $N=1$ ; (b)  $N=7$ ; (c)  $N=19$ ; (d)  $N=37$

### 2.2 部分相干光-光纤阵列耦合效率理论

无线激光通信中,空间光耦合进光纤阵列的过程如图 2 所示,空间光-光纤阵列的耦合效率  $\eta$  可表示为<sup>[8]</sup>

$$\eta = \frac{\eta_s}{A_R} \iint_A \mu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) U_{i,A}^*(\mathbf{r}_1) U_{i,A}(\mathbf{r}_2) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2, \quad (2)$$

式中,  $A_R = \pi D^2/4$  为接口孔径的面积,  $\mu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z)$  为接收端面 A 的入射光场复相干度,  $\mathbf{r}_1$  和  $\mathbf{r}_2$  为接收平

面中心到接收平面内的径向向量,  $z$  为传输距离,  $*$  为复共轭符号,  $U_{i,A}(\mathbf{r})$  为单模光纤在接收端面 A 上的后向传输模场, 可表示为<sup>[9-11]</sup>

$$U_{i,A}(\mathbf{r}) = \frac{k\omega_0}{\sqrt{2\pi}f} \exp\left[-\left(\frac{k\omega_0}{2f}\right)^2 p^2\right], \quad (3)$$

式中,  $k = 2\pi/f$  为波数,  $\omega_0$  为单模光纤的模场半径,  $f$  为透镜的焦距,  $p$  为透镜表面径向任意一点到透镜中心的距离。

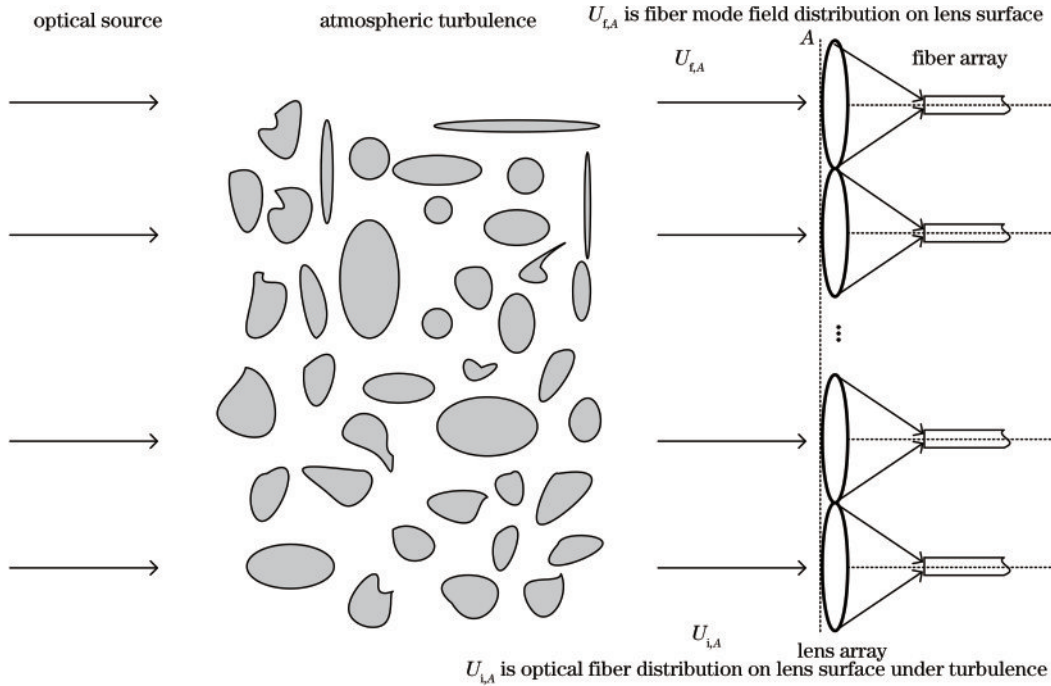


图 2 空间光-透镜阵列-光纤阵列耦合示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the spatial light-lens array-fiber array coupling

对于部分相干光,复相干度  $\mu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z)$  可表示为<sup>[12]</sup>

$$\mu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \frac{W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z)}{\sqrt{W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1, z)} \sqrt{W(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_2, z)}}, \quad (4)$$

式中,  $W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z)$  为接收端面 A 上的交叉谱密度函数, 可表示为<sup>[13]</sup>

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \frac{I_0}{L(z)} \exp\left\{-\left[\frac{1}{2\theta^2 L(z)} + M\left[1 + \frac{2}{L(z)}\right] - \frac{2M^2 z^2}{k^2 \omega_0 L(z)}\right] (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2\right\} \times \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{2\omega_0^2 L(z)}\right] \exp\left[\frac{ik(\mathbf{r}_2^2 - \mathbf{r}_1^2)}{2R(z)}\right], \quad (5)$$

式中,  $\omega_0$  为光束半径。其中,

$$\begin{cases} M = 0.33\pi^2 k^2 z \int_0^\infty k^3 \phi_n(k) dk \\ L(z) = 1 + 2z(1 + \omega_0^2/\sigma_0^2 + 2M\tau\omega_0^2)/k^2\omega_0^2 \\ \theta^2 = \omega_0^2\sigma_0^2/(\omega_0^2 + \sigma_0^2) \\ R(z) = z k^2 \omega_0^2 L(z) / [k^2 \omega_0^2 L(z) + 4Mz^2 - k^2 \omega_0^2] \end{cases}, \quad (6)$$

式中,  $\sigma_0$  为光源相干度, 当  $\sigma_0 = \infty$  时, 光源为完全相干光,  $\phi_n(k)$  为大气折射率功率谱模型, 修正的 Von Karman 谱<sup>[14]</sup> 可表示为

$$\phi_n(k) = 0.033 C_n^2 \frac{\exp(-k^2/k_m^2)}{(k^2 + k_0^2)^{11/6}}, \quad (7)$$

式中,  $k_m = 5.92/l_0$ ,  $k_0 = 2\pi/L_0$ ,  $l_0$  为湍流的内尺度,  $L_0$  为湍流的外尺度,  $C_n^2$  为大气折射率结构常数。将

(5)式~(7)式代入(4)式,得到

$$\mu(r_1, r_2, z) = \exp\left\{-\left[\frac{1}{2\theta^2 L(z)} + M\left[1 + \frac{2}{L(z)}\right] - \frac{2M^2 z^2}{k^2 \omega_0^2 L(z)} - \frac{1}{2\omega_0^2 L(z)}\right] |r_1 - r_2|^2\right\} \times \exp\left[\frac{ik(r_2^2 - r_1^2)}{2R(z)}\right], \quad (8)$$

式中,  $|r_1 - r_2|^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ ,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为  $r_1$  和  $r_2$  与传输路径中心轴的夹角,  $r_1$  和

$r_2$  分别为  $r_1$  和  $r_2$  的模。定义归一化径向积分变量  $x_1 = 2r_1/D, x_2 = 2r_2/D$ , 将(2)式和(8)式代入(1)式,得到部分相干光-光纤阵列的耦合效率为

$$\eta = 8\eta_s \beta^2 \int_0^1 \int_0^1 \exp\left[-\left(\frac{A_R}{A_H} + \beta^2\right)(x_1^2 + x_2^2)\right] J_0\left(2\frac{A_R}{A_H} x_1 x_2\right) x_1 x_2 dx_1 dx_2, \quad (9)$$

式中,  $\beta = \pi d \omega_0 / 2\lambda f$  为光纤耦合参数,  $d$  为子孔径的直径,  $\lambda$  为光源波长。已有研究表明, 当子孔径直径  $d$ 、单模光纤模场半径  $\omega_0$ 、耦合透镜焦距  $f$  满足  $\pi d \omega_0 / 2\lambda f = 1.12$ , 即  $d/f = 0.2$  时, 单路单模光纤耦合效率最大, 为 81%<sup>[6]</sup>。  $J_0(\cdot)$  为修正的零阶第一类贝塞尔函数,  $A_H = \pi \rho_H^2$ ,  $\rho_H$  为部分相干光的相干半径, 可表示为

$$\rho_H = \left\{ \frac{1}{2\sigma_0^2 L(z)} + M\left[1 + \frac{2}{L(z)}\right] - 2\frac{M^2 z^2}{k^2 \omega_0^2 L(z)} \right\}^{-1/2}. \quad (10)$$

### 3 部分相干光-光纤阵列的耦合效率

根据(9)式对部分相干光-光纤阵列的耦合效率进

行仿真, 仿真参数: 波长  $\lambda$  分别为 1550、1310、850 nm, 光源相干度  $\sigma_0$  分别为  $\infty$ 、0.04、0.02 m, 光束半径  $\omega_0 = 0.04$  m, 大气折射率结构常数  $C_n^2$  分别为  $10^{-16}$ 、 $10^{-15}$ 、 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ , 湍流的内尺度  $l_0 = 5$  mm, 外尺度  $L_0 = 50$  m, 传输距离  $z = 10$  km, 等效口径的直径  $D = 0.1$  m, 光纤耦合参数  $\beta = 1.12$ 。

#### 3.1 耦合效率与传输距离的关系

在光源相干度分别为  $\infty$ 、0.04、0.02 m, 子孔径数为 1、7、19 和 37 时, 仿真得到部分相干光-光纤阵列耦合效率与传输距离的变化曲线如图 3 所示。可以发现, 当光源为完全相干光时 ( $\sigma_0 = \infty$ ), 其耦合效率高于部分相干光 ( $\sigma_0 = 0.04, 0.02$  m), 且三条曲线均随传输距离的增大呈会聚趋势。完全相干光

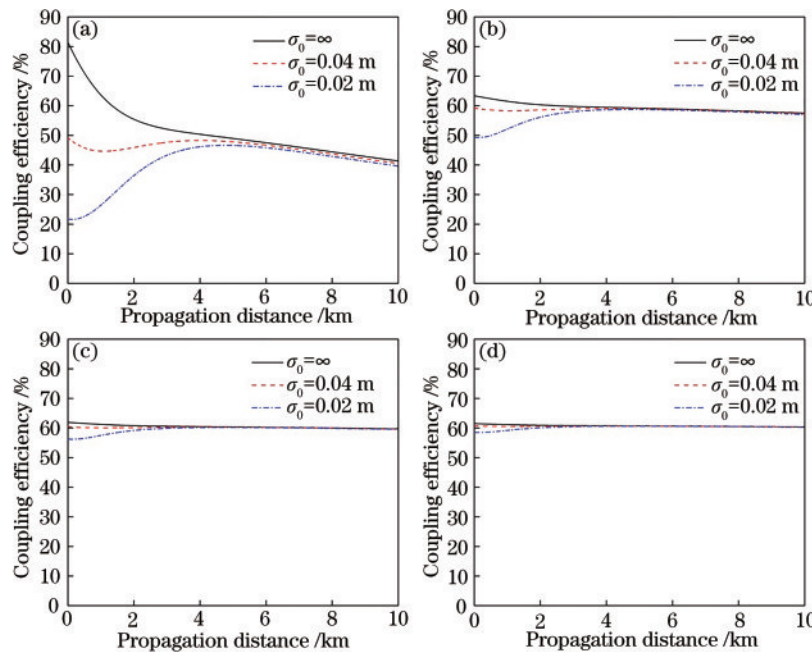


图 3 不同  $\sigma_0$ 、 $N$  情况下耦合效率随传输距离的变化曲线。(a)  $N=1$ ; (b)  $N=7$ ; (c)  $N=19$ ; (d)  $N=37$   
 Fig. 3 Variation curves of coupling efficiency with transmission distance under different  $\sigma_0, N$  conditions.

(a)  $N=1$ ; (b)  $N=7$ ; (c)  $N=19$ ; (d)  $N=37$



的耦合效率曲线随传输距离的增大而下降,而部分相干光的耦合效率曲线会先会聚再下降。随着透镜阵列子孔径数的增加,耦合效率有明显提高,当传输距离增大到一定程度时,耦合效率趋于稳定。原因是耦合效率由光源相干度和大气湍流强度共同决定,如图 3(a)所示,当传输距离较小时,大气湍流的影响较弱,影响耦合效率的主要因素是光源相干度。随着传输距离的增大,大气湍流的影响逐渐累加,成为影响耦合效率的主要因素,不同相干度光源下的耦合效率差值逐渐减小,曲线成会聚状态。

从图 3 可以看出,相比单透镜接收,使用透镜阵列接收可以有效提高耦合效率,且对于长距离传输的提高更明显。对于完全相干光,短距离传输时,透镜阵列接收反而会降低耦合效率,原因是透镜阵列存在间隙,无法将入射到孔径平面内的光束全部耦合进光纤<sup>[15]</sup>。当透镜阵列的子孔径数分别为 1、7、19 和 37 时,耦合效率曲线分别在传输距离约为 6、5、4、3 km 处开始会聚。对于短距离传输,透镜阵列对低相干度光源耦合效率的提高更明显;对于长距离传输,透镜阵列接收对不同相干度光源的耦合效率基本趋于一致。部分相干光在大气传输时一定程度上会抑制光强起伏,透镜阵列接收可以抑制光源相干性衰退引起的耦合效率下降问题,因此,研究部分相干光-光纤阵列的耦合模型对于无线激光通信探测系统具有重要意义。

### 3.2 耦合效率与大气湍流强度的关系

$C_n^2$  分别为  $10^{-16}$ ,  $10^{-15}$ ,  $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  时,部分相干光 ( $\sigma_0 = 0.04 \text{ m}$ ) 耦合效率在子孔径数为 1、7、19 和 37 的分布情况如图 4 所示。可以看出,在中、强湍流情况下,随着透镜阵列子孔径数的增大,耦合效率会得到显著提高,但在弱湍流情况下,子孔径数的增大,反而会降低耦合效率。原因是,在中、强湍流情况下,经大气传输后光束到达接收端面时光斑的破碎情况更严重,透镜阵列的接收,可以抑制光斑破碎带来的影响,从而提高耦合效率。当传输距离为 10 km 时,对于波长为 1550 nm,相干度为 0.04 m 的部分相干光光源,在强湍流 ( $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ) 情况下,用子孔径数为 1、7、19 和 37 的透镜阵列接收,耦合效率分别为 8%、33%、47% 和 53%;在中湍流 ( $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ) 情况下,用子孔径数为 1、7、19 和 37 的透镜阵列接收,耦合效率分别为 40%、57%、59% 和 60%。而在弱湍流 ( $C_n^2 =$

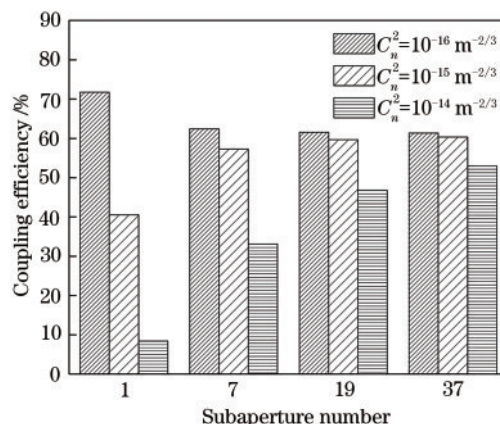


图 4 不同湍流强度下的耦合效率

Fig. 4 Coupling efficiency under different turbulence intensities  $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$  情况下,用子孔径数为 1、7、19 和 37 的透镜阵列接收,耦合效率分别为 71%、63%、62%、61%,呈下降趋势,原因是弱湍流对激光在大气中的传输影响较小,用透镜阵列接收时,透镜阵列的有效透光面积占有率不能到达 100%,导致不能完全接收。

### 3.3 耦合效率与光源波长的关系

波长分别为 850, 1310, 1550 nm, 子孔径数为 1、7、19 和 37 的耦合效率如图 5 所示。可以发现,随着子孔径数的增大,不同波长部分相干光光源 ( $\sigma_0 = 0.04 \text{ m}$ ) 的耦合效率有所增大,短波长光源耦合效率增大的更明显。相比等口径的单透镜接收,对于波长为 850, 1310, 1550 nm 的光源,用子孔径数为 37 的透镜阵列接收时,耦合效率分别从 18%、33%、41% 增加到 57%、59% 和 60%。实际应用中,850 nm 的激光器成本相对较低,用子孔径数为 19 的透镜阵列接收时耦合效率可达到 55%。虽然相比 1550 nm 光源,850 nm 光源更容易受到大气吸收、散

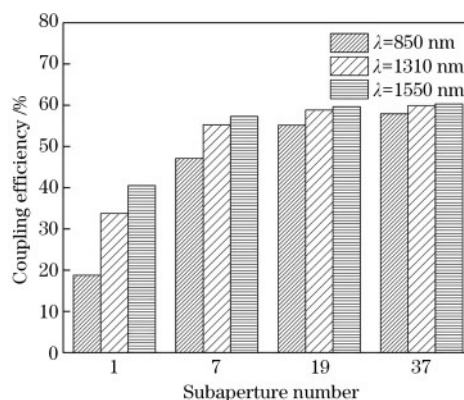


图 5 不同波长下的耦合效率

Fig. 5 Coupling efficiency at different wavelengths

射等影响,但通过透镜阵列接收,可以克服相关缺陷,提高耦合效率。

## 4 结 论

以部分相干光为入射光源,研究了光源相干度、波长、传输距离、湍流强度和透镜阵列的子孔径数对耦合效率的影响。仿真结果表明,随着传输距离的增大,完全相干光的耦合效率逐渐下降,但部分相干光的耦合效率会先增大再减小。随着透镜阵列子孔径数的增大,耦合效率有所提高,耦合效率曲线会聚的趋势也更早;相比弱湍流情况,增加透镜阵列的子孔径数,可以显著提高中、强湍流情况下部分相干光-光纤阵列的耦合效率;相比长波长光源,透镜阵列对短波长部分相干光源耦合效率的提高更明显;相比等口径的单透镜接收,对于波长为 850, 1310, 1550 nm 的光源,用子孔径数为 37 的透镜阵列接收时,耦合效率分别从 18%、33%、41% 增加到 57%、59% 和 60%。该研究可为中远距离的激光通信系统设计提供重要的理论依据。

## 参 考 文 献

- [1] Winzer P J, Leeb W R. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(13): 986-988.
- [2] Hu B B, Zhang Y X, Zhu Y. New model of the fiber coupling efficiency of a partially coherent Gaussian beam in an ocean to fiber link[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25111-25119.
- [3] Zhao B Q, Meng L X, Yu X N, et al. Spatial light to single-mode fiber nutation coupling technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1105001.  
赵佰秋, 孟立新, 于笑楠, 等. 空间光到单模光纤章动耦合技术研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1105001.
- [4] Ricklin J C, Davidson F M. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication[J]. *JOSA A*, 2002, 19(9): 1794-1802.
- [5] Tan L Y, Li M N, Yang Q B, et al. Fiber-coupling efficiency of Gaussian Schell model for optical communication through atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2318-2325.
- [6] Li F, Geng C, Li X Y, et al. Technical research of adaptive fiber coupler array based on SPGD algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2156-2161.  
李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于 SPGD 算法的自适应光纤耦合器阵列技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2156-2161.
- [7] Hu B B, Shi H F, Zhang Y X. Fiber-coupling efficiency of Gaussian-Schell model beams through an ocean to fiber optical communication link [J]. *Optics Communications*, 2018, 417: 14-18.
- [8] Dikmelik Y, Davidson F M. Fiber coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5338: 76-80.
- [9] Ke X Z, Lei S C. Spatial light coupled into a single-mode fiber by a Maksutov-Cassegrain antenna through atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(15): 3897-3902.
- [10] Andrews L C, Phillips R L. *Laser beam propagation through random media* [M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE, 2005.
- [11] Roychowdhury H, Ponomarenko S A, Wolf E. Change in the polarization of partially coherent electromagnetic beams propagating through the turbulent atmosphere [J]. *Journal of Modern Optics*, 2005, 52(11): 1611-1618.
- [12] Wheeler D J, Schmidt J D. Coupling of Gaussian Schell-model beams into single-mode optical fibers [J]. *JOSA A*, 2011, 28(6): 1224-1238.
- [13] Wang J, Ke X Z. Speckle characteristics of partially coherent beam propagating in atmospheric turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0722003.  
王姣, 柯熙政. 部分相干光束在大气湍流中传输的散斑特性 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(7): 0722003.
- [14] Miller W B, Ricklin J C, Andrews L C. Effects of the refractive index spectral model on the irradiance variance of a Gaussian beam [J]. *JOSA A*, 1994, 11(10): 2719-2726.
- [15] Lei S C, Ke X Z. Coupling efficiency of lens array spatial light in turbulence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0605004.  
雷思琛, 柯熙政. 大气湍流中透镜阵列的空间光耦合效率研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0605004.