

多孔径接收相干合束系统性能研究

劳陈哲^{1,2}, 孙建锋^{1*}, 周煜¹, 卢智勇¹, 李佳蔚¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 为了减小大气湍流引起的星地激光通信系统的性能衰落, 采用基于光纤相干合束的多孔径接收方案。针对典型的星地相干激光通信模型, 给出了通信系统的灵敏度和误码率随多孔径接收对湍流效应的补偿效果变化的数值仿真结果。同时基于已有的光纤合束方法搭建了一套 4 孔径接收的相干合束光通信接收装置, 测试了 2 个和 4 个孔径下系统的锁相带宽。利用旋转相位屏模拟了不同 Greenwood 频率的大气湍流对光束波前的影响, 保证了各路接收光强的不相干性。在此基础上, 给出了相干合束前后光纤中的光强相对起伏方差。结果表明该系统能在弱湍流环境中有效地抑制光强闪烁。

关键词 大气湍流; 多孔径接收; 相干合束; 控制带宽; 闪烁系数

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0705003

Performance of Coherent Beam Combining System with Multiple Aperture Receiver

Lao Chenzhe^{1,2}, Sun Jianfeng^{1*}, Zhou Yu¹, Lu Zhiyong¹, Li Jiawei¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to mitigate the performance fading of satellite-to-ground laser communication system caused by atmospheric turbulence, a multi-aperture receiving scheme based on fiber coherent beam combining (CBC) is used. A typical satellite-to-ground coherent laser communication model is considered in this paper, and the numerical simulation results of the variations in sensitivity and bit error rate of the communication system with turbulence compensation effect are given. Based on an existing beam combining method, a set of CBC optical communication receiver with four apertures is constructed, and the phase-locked bandwidth of the system under two and four apertures are measured. Then we use the rotating phase screen to simulate the influence of atmospheric turbulence on the wavefront at different Greenwood frequencies. Meanwhile, we ensure the incoherence of the received light intensity. On this basis, the relative fluctuation variances of light intensity in optical fiber before and after CBC are given. The results show that the system can effectively mitigate intensity scintillation in the weak turbulence.

Key words atmospheric turbulence; multi-aperture receiving; coherent beam combining; control bandwidth; scintillation coefficient

OCIS codes 010.1330; 140.3298; 290.5930

1 引言

近年来, 卫星激光通信技术在国际上得到了广泛重视, 该领域相关研究已成为热门话题^[1]。其中,

星地下行激光通信作为卫星激光通信网络的重要组成部分, 受到大气湍流的影响, 其接收到的信号光场的空间相干性受到破坏, 产生的光强闪烁、波前畸变等问题严重地降低了系统的通信性能^[2]。多孔径接

收稿日期: 2019-01-11; 修回日期: 2019-03-01; 录用日期: 2019-03-11

基金项目: 中国科学院国防科技创新基金(1705341X00)

* E-mail: sunjianfeng@163.com

收作为空间分集的一种形式,能够有效缓解大气湍流的影响,提高系统通信性能,具有极大的应用潜力^[3]。对于多孔径接收后的多路信号的合并方案主要分为数字合并^[4-5]和光学合并^[6-9]。其中,数字合并方案已得到广泛认可与应用,以2013年美国宇航局进行的月球激光通信演示验证(LLCD)为例^[10],其下行链路的接收端采用了4组40 cm的接收孔径,各望远镜收集到的光信号被分别耦合至4路多模保偏光纤内,再利用超导纳米线探测器阵列分别进行探测后,用高速数字电路将各组输出信号进行数字化和叠加,最终实现同步、解调和解码。而光学合并方案是指将各接收光束直接进行合并,再由单个光电探测器进行探测解码,与数字合并方案相比,其优势在于系统结构更加简化且信噪比更高。目前国内有关光学合并方案的研究主要集中在理论研究、可行性验证,以及多光束相干合成方法等方面^[7-9,11],而关于光学相干合束系统性能的研究,尚

未见详细的报道。

本文基于光纤中的光束相干合成方法,搭建了一套4孔径的相干合束系统,并给出了系统的锁相性能。同时,利用旋转相位屏完成了湍流传输模拟实验,测试了不同湍流强度下系统的合束性能。

2 理论模型

2.1 多孔径接收原理介绍

图1所示为基于多孔径接收的激光相干通信系统原理图,图中FSO代表自由空间光通信。假设激光通信发射终端发射的信号光为高斯光束,经由发射望远镜扩束准直和大气信道传输后,到达接收望远镜的光场分布的复振幅 $U(\mathbf{r}, L, t)$ 可表示为

$$U(\mathbf{r}, L, t) = A(\mathbf{r}, L, t) \cdot \exp\left[-ik\left(\frac{r^2}{2F} + L\right) + i\varphi(L) + i\psi(\mathbf{r}, L, t) + i\phi(t)\right], \quad (1)$$

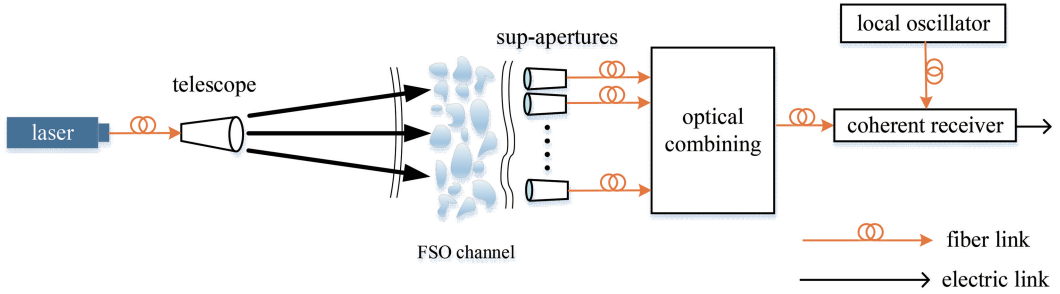


图1 基于多孔径接收的激光相干通信系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of laser coherent communication system based on multi-aperture receiving

式中: $A(\mathbf{r}, L, t)$ 为 t 时刻接收端光场振幅分布,其中 \mathbf{r} 为接收端面上任意一点的方向矢量, L 为激光传输距离; F 为接收望远镜处的光波阵面曲率半径; $\varphi(L)$ 为与 L 相关的相位因子; $\psi(\mathbf{r}, L, t)$ 为经过大气后接收面光场包含的相位扰动项; $\phi(t)$ 为 t 时刻接收信号中的信息相位值。 $A(\mathbf{r}, L, t)$ 可表示为

$$A(\mathbf{r}, L, t) = \frac{X(\mathbf{r}, L, t)W_0}{W} \exp\left(-\frac{r^2}{W^2}\right), \quad (2)$$

式中: $X(\mathbf{r}, L, t)$ 为 t 时刻接收端面光场振幅的衰减系数; r 为 \mathbf{r} 的大小; W_0 为发射端光斑半径; W 为接收面光斑半径。

在弱湍流环境条件下,假设接收孔径足够小,可以将其看作是点接收阵列,接收端第 n 个接收孔径处的光强可表示为^[12]

$$I_n = I(r_n) \exp(2X_n), \quad (3)$$

式中: $I(r_n)$ 为不存在湍流时第 n 个孔径处的光强,

r_n 为第 n 个接收孔径离光轴的距离; X_n 为第 n 路光的振幅衰减系数,满足正态分布,其均值为 μ_x ,方差为 σ_x^2 。

光强变化满足对数正态分布,其表达式为^[12]

$$f(I_n) = \frac{1}{2I_n} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left\{-\frac{\{\ln[I_n/I(r_n)] - 2\mu_x\}^2}{8\sigma_x^2}\right\}. \quad (4)$$

为了保证衰弱不影响平均功率,归一化衰弱系数 $E[I_n/I(r_n)] = 1$, E 表示数学期望,则需要 $\mu_x = -\sigma_x^2$ 。

将(3)式代入光强闪烁系数的定义式中,在弱湍流条件下,可进一步简化为

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 = \exp(4\sigma_x^2) - 1 \approx 4\sigma_x^2, \quad (5)$$

式中: I 为接收光强。

将各孔径面光强变化的空间相关性用矩阵 \mathbf{R} 来表征^[12],即

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & b(\rho_{12}) & \cdots & b(\rho_{1N}) \\ b(\rho_{21}) & 1 & \cdots & b(\rho_{2N}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b(\rho_{N1}) & b(\rho_{N2}) & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{N \times N}, \quad (6)$$

式中： ρ_{ij} (下标 i, j 为 $1 \sim N$ 的正整数) 为任意两孔径间的距离； N 为矩阵大小； $b(\rho_{ij})$ 为任意两孔径间光强变化的相关系数，其表达式为

$$b(\rho_{ij}) = \frac{E[X_i X_j] - E[X_i]E[X_j]}{\sigma_x^2}, \quad (7)$$

其中 X_i, X_j 分别表示第 i, j 孔径处的振幅衰减系数。

将 $\sum_{k=1}^K \exp(u_k)$ 用一个对数正态分布随机变量来近似 $\exp(z)$ ，其中 u_k 表示第 k 个高斯随机变量 (k 为 $1 \sim K$ 的正整数)，均值为 μ_k ，方差为 v_{kk} ，这里 z 也是高斯随机变量，其均值为 μ_z ，方差为 σ_z^2 。定义任意两个高斯随机变量间的协方差 $v_{kl} = \text{cov}(u_k, u_l)$ (下标 k, l 为 $1 \sim K$ 的正整数)，可得

$$\mu_z = \ln(\alpha / \sqrt{1 + \beta^2 / \alpha^2}), \quad (8)$$

$$\sigma_z^2 = \ln(1 + \beta^2 / \alpha^2). \quad (9)$$

这里参数 α 和 β 被定义为

$$\alpha = \sum_{k=1}^K \exp(\mu_k + v_{kk}/2), \quad (10)$$

$$\beta^2 = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \exp\left[\mu_k + \mu_l + \frac{(v_{kk} + v_{ll})}{2}\right] \cdot [\exp(v_{kl}) - 1]. \quad (11)$$

为使能量保持不变，即 $E[\exp(u_k)] = 1$ ，需满足 $\mu_k = -v_{kk}/2$ 。这样在弱湍流条件 $v_{kk} \ll 1$ 和协方差值较小 $v_{kl} \ll 1$ 的假设下，可得

$$\mu_z = \ln K - \sigma_z^2/2, \quad (12)$$

$$\sigma_z^2 \approx \frac{1}{K^2} \sum_{k,l} \exp(v_{kl}) - 1 \approx \frac{1}{K^2} \sum_{k=1}^K v_{kk} + \frac{1}{K^2} \sum_{k \neq l} v_{kl}. \quad (13)$$

由于本文系统采用的是光纤接收方式，因此还需要考虑空间光到单模光纤的耦合效率。在未采用自适应光学系统校正的情况下，波前的相位残留方差 σ_ϕ^2 可表示为^[13]

$$\sigma_\phi^2 = 1.0299(D/r_0)^{5/3}, \quad (14)$$

式中： D 为接收孔径直径； r_0 为大气相干长度。

根据已有文献推导^[14]，可将光纤耦合效率表示为 $\eta = \frac{2}{\pi \omega_a^2} a^2$ ，其中 ω_a 为光纤后向传输模场半径， $a^2 = a_r^2 + a_i^2$ ，这里 a_r, a_i 分别为 a 的实部与虚部。

在弱湍流条件下， a_r 和 a_i 的平均值和方差可表示为

$$\bar{a}_r = 2A \left(1 - \frac{1}{2} \sigma_\phi^2\right), \quad \sigma_r^2 = 0, \quad (15)$$

$$\bar{a}_i = 0, \quad \sigma_i^2 = \frac{A}{N} \sigma_\phi^2, \quad (16)$$

式中： $A = \frac{S}{2N} \sum_{k=1}^N \exp\left(-\frac{r_k^2}{\omega_a^2}\right)$ ， S 为接收孔径的面积， $S = \pi D^2/4$ ， r_k 为第 k 个散斑与光轴之间的距离； N 为散斑数，可近似表示为

$$N \approx 0.994(D/r_0)^2. \quad (17)$$

最终光纤耦合效率 η 的概率密度函数可表示为

$$p(\eta) = \frac{1+c}{\bar{\eta}} \exp(-c) \cdot \exp\left[-\frac{(1+c)\eta}{\bar{\eta}}\right] I_0\left(2\sqrt{\frac{(1+c)c\eta}{\bar{\eta}}}\right), \quad (18)$$

式中：系数 $c = a^2/\sigma_i^2$ ； I_0 为第一类零阶修正贝塞尔函数； $\bar{\eta}$ 为 η 的平均值，可表示为

$$\bar{\eta} = \frac{2}{\pi \omega_a^2} \bar{a}^2 = \frac{2}{\pi \omega_a^2} (\bar{a}_r^2 + \sigma_i^2), \quad (19)$$

式中： \bar{a} 为 a 的平均值。

此时每个孔径中耦合进光纤的光强 I_F 可表示为该孔径处光强 I 与耦合效率 η 的乘积，则第 n 路光纤中的光强可表示为

$$I_{Fn} = \eta_n \cdot I_n. \quad (20)$$

耦合效率相对起伏方差 σ_η^2 和光强相对起伏方差 $\sigma_{I_F}^2$ 的定义式为

$$\sigma_\eta^2 = \langle \eta^2 \rangle / \langle \eta \rangle^2 - 1, \quad (21)$$

$$\sigma_{I_F}^2 = \langle I_F^2 \rangle / \langle I_F \rangle^2 - 1. \quad (22)$$

由于孔径接收面光强与耦合效率相互独立，(19)式可进一步表示为

$$\sigma_{I_F}^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} \cdot \frac{\langle \eta^2 \rangle}{\langle \eta \rangle^2} - 1 = \frac{1}{(I_0/\bar{\eta})^2} \int f(I) I^2 dI \cdot \int p(\eta) \eta^2 d\eta - 1. \quad (23)$$

将(4)、(16)式代入(20)式即可得到光强相对起伏方差的具体表达式，比较(5)式和(20)式可以看出，当 $\langle \eta^2 \rangle / \langle \eta \rangle^2$ 趋于 1 时，即接收天线孔径与大气相干长度比值较小时，光纤中的光强相对起伏方差近似等于接收孔径面的光强闪烁系数与耦合效率相对起伏方差之和。

2.2 相干合束系统性能分析

为了研究多孔径接收对湍流效应的补偿效果和通信系统的性能，针对典型的星地相干激光通信模型进行分析，对于距离为 L 的大气激光链路，湍流

变化的功率谱密度可表示为^[15]

$$F_{\text{PSD}}(f) = 0.0326 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 f^{-8/3} \int_0^L C_n^2(z) V^{5/3}(z) dz, \quad (24)$$

式中: f 为湍流变化的频率; λ 为通信激光波长; $V(z)$ 为链路 z 处的垂直风速; $C_n^2(z)$ 为链路 z 处的大气折射率结构常数。这里利用最广泛使用的 Hufnagel-Valley 模型, 其大气折射率结构常数可表示为

$$C_n^2(h) = 0.00594(\omega/27)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + C_n^2(0) \exp(-h/100), \quad (25)$$

式中: h 为海拔高度; ω 为链路上的方均根风速; $C_n^2(0)$ 为地面附近的折射率结构常数。在描述大气湍流变化效应时, 选用 Bufton 模型描述垂直链路的风速^[15], 表达式为

$$V(h) = V_T + V_g + 30 \exp \left[- \left(\frac{h - 9400}{4800} \right)^2 \right], \quad (26)$$

式中: V_T 为卫星或飞行器运动引起的链路和湍流的相对速度; V_g 为地面风速。

根据几何定理推导出星地通信链路的天顶角为 θ 、链路长度 z 处的 V_T 为

$$V_T = \frac{\omega_s(R_e + H)}{L} z \sqrt{1 - \left(\frac{R_e \sin \theta}{R_e + H} \right)^2}, \quad (27)$$

式中: ω_s 为卫星或飞行器相对于地心的运动角速度; R_e 为地球半径; H 为卫星或飞行器的海拔高度。

假设锁相闭环系统为二阶控制系统, 则闭环的频率响应函数 $H(f)$ 可等效表示为

$$H(f) = \begin{cases} 1, & f \leq f_{\text{eq}}, \\ 0, & f > f_{\text{eq}} \end{cases}, \quad (28)$$

式中: f_{eq} 为二阶控制系统的等效频率, 可表示为^[15]

$$f_{\text{eq}} = \int_0^{f_c \cdot [(4\zeta^4 + 1)^{1/2} - 2\zeta^2]^{1/2}} H(f) df, \quad (29)$$

其中 f_c 为控制系统的固有频率, ζ 为阻尼系数。

经过控制系统相位跟踪后, 相位差 $\Delta\varphi$ 的剩余均方差可表示为

$$\sigma_{\Delta\varphi}^2 = 2 \times \int_0^\infty |1 - H(f)|^2 F_{\text{PSD}}(f) df. \quad (30)$$

将(24)式代入(30)式中, 可得到第一级相位跟踪剩余均方误差(MSE)为

$$\sigma_{\Delta\varphi}^2 = \frac{0.156\pi^2}{\lambda^2} \left[\int_0^{f_c \cdot [(4\zeta^4 + 1)^{1/2} - 2\zeta^2]^{1/2}} H(f) df \right]^{-5/3}.$$

$$\int_0^L C_n^2(z) V^{5/3}(z) dz, \quad (31)$$

则经由一级相干合束后损耗光功率的方均根 ΔP_{rms} 可表示为^[11]

$$\Delta P_{\text{rms}} = \frac{1}{4} P_{\text{MAX}} \sigma_{\Delta\varphi}^2, \quad (32)$$

式中: P_{MAX} 为第一级合束中能达到的最大输出功率。需要说明的是, 在后续计算中, 忽略了由于 3 dB 耦合器两输入端的光强不等时自身相干合成效率的下降。同时可以推导出第 k 级相位跟踪剩余均方误差 $\sigma_{\Delta\varphi_k}^2$ 和光功率损耗比的方均根 $\epsilon_{k\text{rms}}$ 为

$$\sigma_{\Delta\varphi_k}^2 = \frac{1}{2^{k-1}} \sigma_{\Delta\varphi}^2, \quad \epsilon_{k\text{rms}} = \frac{\Delta P_{k\text{rms}}}{P_{\text{MAX}}} = \frac{1}{4} \sigma_{\Delta\varphi_k}^2. \quad (33)$$

为了便于计算与设计, 采用两两合束的级联方式, 孔径数 $N = 2^k, k = 1, 2, \dots$, 这样在 k 次级联合束后, 最终所有孔径中接收到的光被相干合束到一根单模保偏光纤。为了研究相干合束系统闭环控制带宽对相干通信系统的影响, 针对强湍流条件分析了闭环带宽与二进制相移键控(BPSK)通信系统的灵敏度和误码率(BER)之间的关系。假设第 n 条支路接收到的光强为 I_n , 其概率密度函数为

$$p(I_n) = \frac{1}{\bar{I}} \exp(-I_n/\bar{I}), \quad I_n > 0, \quad (34)$$

式中: $\bar{I} = E[I_n]$ 为单一接收孔径中的平均光强, 一般对其作归一化处理。用随机变量 Z 表示各孔径处光强之和, 即 $Z = \sum_{n=1}^N I_n$, 由于各孔径处的 I_n 满足独立同分布, 则随机变量 Z 的概率分布函数可表示为

$$p(Z) = \frac{\bar{I}^{-N} Z^{N-1} \exp(-Z/\bar{I})}{\Gamma(N)}, \quad Z \geq 0. \quad (35)$$

此时系统的信噪比 SNR 可表示为

$$\gamma = \frac{R_d \bar{\eta}_c A Z}{q \Delta f} \cdot \prod_{k=1}^K (1 - \epsilon_{k\text{rms}}) = \gamma_0 Z \cdot \prod_{k=1}^K (1 - \epsilon_{k\text{rms}}), \quad (36)$$

式中: $\gamma_0 = \frac{R_d \bar{\eta}_c A}{q \Delta f}$ 表示每条支路的平均归一化信噪比, 其中 $\bar{\eta}_c$ 为平均光纤耦合效率, A 为子孔径面积, q 为电子电荷, Δf 为光电探测器噪声的等效带宽; R_d 为星地相干光通信中的自适应。

在 BPSK 外差探测系统中, 误码率可以根据信噪比求得^[16]

$$P_e(\gamma) = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\gamma}) \approx \frac{1}{2\sqrt{\pi\gamma}} \exp(-\gamma), \quad (37)$$

式中:erfc(·)为互补误差函数。平均误码率可表示为

$$P_e = \int_0^\infty P_e(Z) p(Z) dZ = \int_0^\infty \frac{\bar{I}^{-N}}{2\sqrt{\pi\gamma_0\mu}\Gamma(N)} Z^{N-\frac{3}{2}} \exp[-(\gamma_0\mu + 1/\bar{I})Z] dZ, \quad (38)$$

(38)式可进一步化简为

$$P_e = \frac{\Gamma(N-1/2)}{2\sqrt{\pi\bar{I}\gamma_0\mu}\Gamma(N) \cdot (\bar{I}\gamma_0\mu + 1)^{N-1/2}}. \quad (39)$$

3 系统性能数值仿真及测试实验

3.1 合束系统带宽测量

在实验室内搭建了一套基于光纤的4孔径相干合束接收装置,详细参数如表1所示。

表1 合束系统中主要器件的详细参数

Table 1 Detail parameters of main components in beam combining system

Item	Description
3 dB coupler	Polarizationmaintaining;coupling ratio: 50/50
Phase shifter	Total phase shift:75π;insertion loss: <0.5 dB
DSP	CPU:TMS320C28346;clock speed: 300 MHz ADC:AD7606;DAC: AD5344
APD	THORLABS APD430C;bandwidth: DC-400 MHz
Actuator driver	MPD-001;gain: 30

表1中DSP为数字信号处理芯片,CPU为中央处理器,ADC为模数转换器,DAC为数模转换器,APD为雪崩光电二极管。本系统的DSP中应用的主要算法为梯度下降算法,迭代频率为3kHz。由于文中涉及的锁相结构为非线性闭环系统,很难从理论上计算出系统的闭环带宽,所以通过在其中一路中加入一个相移器作为扰动源,模拟不同幅值(0.2π~0.7πrad)和不同频率下的相位扰动,测量2、4孔径合并下(即第一级合束和第二级合束)输出的光功率值。计算了不同幅值和不同频率下的归一化光功率抖动方均根误差(RMSE),再利用理论推导中的(33)式得出对应的相位方均根误差,接着用Matlab进行了曲线拟合,结果如图2(a)、图3(a)所

示。通过拟合出的曲线推算了不同扰动幅度(AMP)下,系统的相位补偿能力(相位方均根误差与所加扰动幅值之比,也称抑制比)随扰动频率变化的曲线,如图2(b)、图3(b)所示。

从图2(b)、图3(b)可以看到,一级相干合束中,随着扰动幅值从0.2π增加至0.7π,抑制比带宽从330Hz降低至130Hz。二级相干合束中的抑制比带宽则是由280Hz降低至100Hz,其整体抑制能力下降的原因是:第一级中的合束结果会影响第二级的合束的光强和相位。需要说明的是,合束系统在未加扰动时就存在的抖动方均根误差,会在抑制比计算中引入一定的误差,尤其是在扰动值较小的情况下。

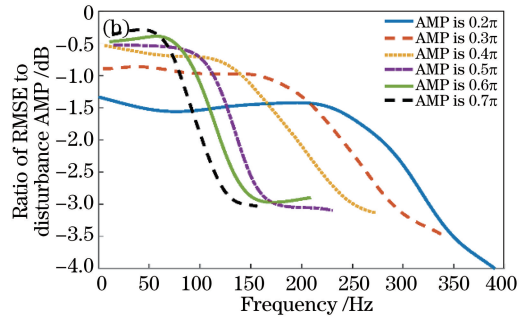
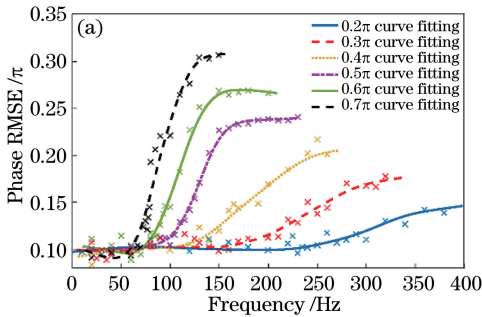


图2 第一级相干合束锁相精度。(a)不同扰动幅值下相位RMSE随扰动频率的变化;
(b)不同扰动幅值下相位RMSE与扰动幅值之比随扰动频率的变化

Fig. 2 Phase-locking accuracy of 1st stage coherent beam combining. (a) Phase RMSE as a function of disturbance frequency under different disturbance amplitudes; (b) ratio of phase RMSE to disturbance AMP as a function of disturbance frequency under different disturbance amplitudes

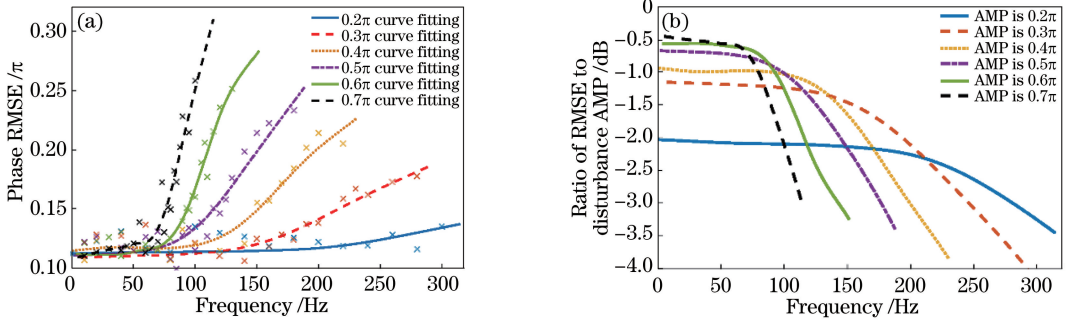


图3 第二级相干合束锁相精度。(a)不同扰动幅值下相位 RMSE 随扰动频率的变化；
(b)不同扰动幅值下相位 RMSE 与扰动幅值之比随扰动频率的变化

Fig. 3 Phase-locking accuracy of 2nd stage coherent beam combining. (a) Phase RMSE as a function of disturbance frequency under different disturbance amplitudes; (b) ratio of phase RMSE to disturbance AMP as a function of disturbance frequency under different disturbance amplitudes

3.2 旋转相位屏实验及结果分析

由图4可以看到,1550 nm 窄线宽激光器产生的激光经由光纤准直头准直输出,其光束直径约为6 mm。首先,准直光束垂直穿过相位屏上距离旋转

中心 $L = 3.5$ cm 处,相位屏旋转由电机驱动,将模拟的湍流扰动加载到光束波前上,再由一个放大倍率为10的透镜组进行扩束。

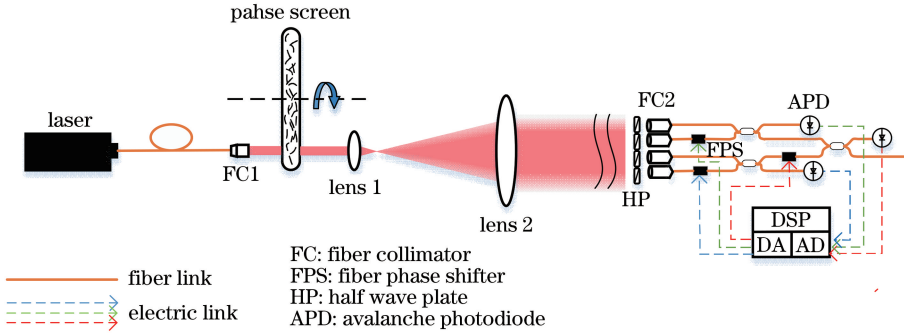


图4 基于旋转相位屏的系统合束性能测试原理图

Fig. 4 Diagram of beam combining performance test based on rotating phase screen

通过4个接收孔径大小为6 mm的准直头,再次将空间光耦合进光纤,为了保证各孔径间光场强度的不相干性,其中相位屏的大气相干长度 r_0 为3 mm,经过透镜组放大10倍后,在接收孔径处光束波前的相干长度变为3 cm,因此将各准直头之间的间距保持在4 cm左右,并且在每个准直头前加了一块半波片,以保证耦合光的偏振态与光纤的慢轴对准。最后经由相干合束系统后,得到最终光强输出。

实验中将相位屏转速参数设置为4000,6000,8000,10000,分别对应的周期 T 为2.5,1.67,1.25,1 s。由于透镜组的光斑放大不会影响光斑波面的时间尺度,之后计算所用的参数以接收孔径处为准。各转速下对应的相位屏时间尺度 Greenwood 频率 f_G 可表示为^[17]

$$f_G = 0.427 \frac{v}{r_0}, \quad (40)$$

式中: v 为等效风速,当相位屏以固定速度转动时,等效风速可认为是常数,即相位屏上光斑处的线速度与透镜组放大倍数的乘积。此时,等效风速可表示为

$$v = \frac{2\pi L}{T} \times 10. \quad (41)$$

为了研究多孔径相干合束对于光强闪烁的抑制作用,实验中在不同转速下,记录了10 s内各孔径以及相干合束后的光功率变化。表2给出了不同 Greenwood 频率下,4个孔径耦合入光纤中的光强相对起伏方差(依次为 $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_4^2$),以及相干合束后光强相对起伏方差 σ_1^2 。

表 2 不同 Greenwood 频率下合束前后光纤中光强相对起伏方差

Table 2 Relative variance of light intensity fluctuation in fiber before and after beam combination at different Greenwood frequencies

Wind speed / (m·s ⁻¹)	f _G /Hz	σ ₁ ²	σ ₂ ²	σ ₃ ²	σ ₄ ²	σ ₁ ²
0.88	12.5	0.0163	0.0136	0.0286	0.0119	0.0065
1.32	18.8	0.0160	0.0136	0.0291	0.0119	0.0065
1.76	25.0	0.0164	0.0138	0.0295	0.0120	0.0086
2.20	31.3	0.0168	0.0137	0.0282	0.0122	0.0110
2.64	37.5	0.0167	0.0136	0.0289	0.0120	0.0130

同时可以求得相关系数矩阵 \mathbf{R} 为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0477 & -0.0494 & 0.0142 \\ 0.0477 & 1.0000 & 0.0473 & 0.0425 \\ -0.0494 & 0.0473 & 1.0000 & 0.0341 \\ 0.0142 & 0.0425 & 0.0341 & 1.0000 \end{bmatrix}.$$

可以看出,各孔径接收到的光功率之间的相关度都接近于零,在前面推导的理论中,假设 4 路接收的平均光功率相同,则理论上相干合成后光束的光强相对起伏方差为 0.0044,这里 4 路光纤中实际的平均光功率分布为 1.81,2.24,1.62,1.9 μW,从光强分布来看,该理论值应该比 0.0044 略低,而实际测量结果最优仅为 0.0065,这可能是由合束中的两支路光强不相等引起的能量损耗,以及合束系统工作过程中自身引入的误差导致的,并且在 Greenwood 频率增大后该现象尤为明显。但总体来看,利用多孔径接收相干合束的方式来抑制光强闪烁的方法是切实有效的。

3.3 光通信链路性能数值仿真

本节给出了结合多孔径接收技术的星地相干光通信系统性能的数值仿真结果。比较了不同孔径个数 N 下,系统灵敏度及误码率随着多孔径接收对湍流效应的补偿效果的变化。仿真中考虑的是典型的近地卫星链路信道,所有参数列于表 3 中。

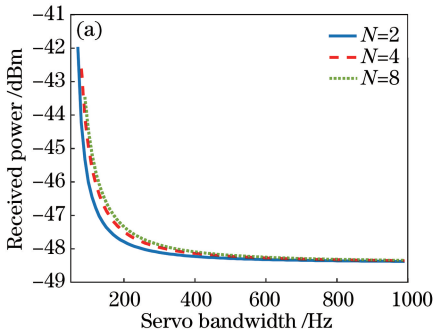


表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

Parameter	Symbol	Value
Laser wavelength / nm	λ	1550
Altitude of the satellite / km	h	150
Wind velocity / (m·s ⁻¹)	w	22
The zenith angle / (°)	θ	80
Number of aperture	N	2,4,8
Total average SNR / dB	Z_{avg}	15.6

图 5 给出了第一级锁相环中相位补偿剩余均方误差与闭环带宽之间的关系。可以看出,0~200 Hz 为相位差的主要补偿范围,当带宽大于 400 Hz 时,相位补偿效果趋于平缓。

图 6 为不同孔径数 N 下,系统灵敏度和误码率

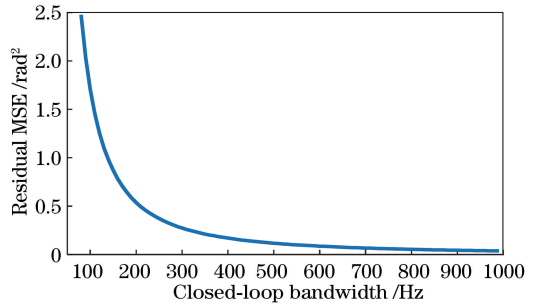


图 5 相位补偿剩余均方误差与闭环带宽的关系

Fig. 5 Relationship between residual MSE of phase compensation and closed-loop bandwidth

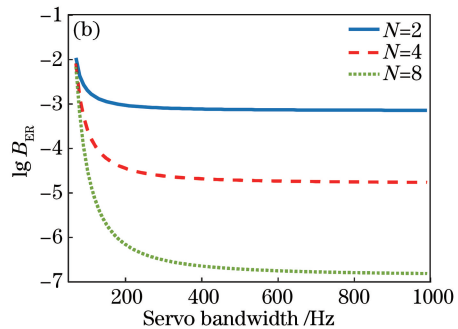


图 6 不同孔径数下系统灵敏度和误码率随湍流效应补偿效果的变化。

(a) 系统灵敏度随闭环带宽的变化; (b) 系统误码率随闭环带宽的变化

Fig. 6 Variations in system sensitivity and bit error rate with turbulence compensation effect under different aperture numbers.

(a) System sensitivity as a function of closed-loop bandwidth; (b) system bit error rate as a function of closed-loop bandwidth

(B_{ER})与多孔径接收对湍流效应补偿效果的量化曲线。其中,图 6(a)为系统灵敏度随闭环带宽变化的曲线,可以看到随着闭环带宽的增大,湍流效应的补偿效果得到提升,系统灵敏度提升显著,其变化趋势与图 5 相同,而孔径数的增加对系统灵敏度的影响不大,当然这也与仿真中忽略了各器件的插入损耗有关。图 6(b)是在各孔径总接收平均信噪比相等的情况下,系统误码率随闭环带宽变化的曲线。同样地,闭环带宽增大时,误码率随之下降,可以看到:随着孔径数的增加,误码率下降速度越快,则最终稳定的误码率越低,这主要是因为空间分集技术对大气闪烁起到了抑制作用。

4 结 论

基于现有的光束相干合成方法搭建了 4 孔径相干合束系统,当扰动幅值为 0.7π 时,其总的锁相带宽达到 100 Hz。在实验室内利用旋转相位屏模拟湍流环境,该装置能在 Greenwood 频率为 18.8 Hz 左右的弱湍流情况下完成 4 路光束的相干合束,并得到接近理想的合束结果,且最终合束光的光强相对起伏方差较合束前有明显的抑制效果。以上结果表明利用多孔径接收相干合束来抑制光强闪烁的方法是可行且有效的,为后续的外场实验提供了参考。针对典型的星地相干激光通信模型,给出了通信系统的灵敏度和误码率随多孔径接收对湍流效应的补偿效果变化的数值仿真结果,从结果中可以看出 $0\sim 200$ Hz 为相位差的主要补偿范围,当带宽大于 400 Hz 时,相位补偿效果趋于平缓,而孔径数的增加对系统灵敏度的影响不大,但对误码率影响明显,其原因主要是空间分集技术对大气闪烁起到了抑制作用。

参 考 文 献

- [1] Tsiftsis T A, Sandalidis H G, Karagiannidis G K, *et al.* Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8 (2): 951-957.
- [2] Ma J, Li K N, Tan L Y, *et al.* Performance analysis of satellite-to-ground downlink coherent optical communications with spatial diversity over Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7575-7585.
- [3] Lee E J, Chan V W S. Part 1: optical communication over the clear turbulent atmospheric channel using diversity [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(9): 1896-1906.
- [4] Geisler D J, Yarnall T M, Stevens M L, *et al.* Multi-aperture digital coherent combining for free-space optical communication receivers [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 12661-12671.
- [5] Li K N, Ma J, Tan L Y, *et al.* Performance analysis of fiber-based free-space optical communications with coherent detection spatial diversity [J]. Applied Optics, 2016, 55(17): 4649-4656.
- [6] Belmonte A. Digital equalization of time-delay array receivers on coherent laser communications [J]. Optics Letters, 2017, 42(2): 310-313.
- [7] Yang Y, Geng C, Li F, *et al.* Coherent polarization beam combining approach based on polarization controlling in fiber devices [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(12): 945-948.
- [8] Yang Y, Geng C, Li F, *et al.* Multi-aperture all-fiber active coherent beam combining for free-space optical communication receivers[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27519-27532.
- [9] Yang Y, Geng C, Li F, *et al.* Combining module based on coherent polarization beam combining [J]. Applied Optics, 2017, 56(7): 2020-2028.
- [10] Robinson B S, Boroson D M, Burianek D A, *et al.* The lunar laser communications demonstration[C] // 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), May 11-13, 2011, Santa Monica, CA, USA. New York: IEEE, 2011: 54-57.
- [11] Jolivet V, Bourdon P, Bennai B, *et al.* Beam shaping of single-mode and multimode fiber amplifier arrays for propagation through atmospheric turbulence[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 257-268.
- [12] Navidpour S, Uysal M, Kavehrad M. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 2813-2819.
- [13] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media [M]. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2005: 480-482.
- [14] Ma J, Ma L, Yang Q B, *et al.* Statistical model of the efficiency for spatial light coupling into a single-mode fiber in the presence of atmospheric turbulence [J]. Applied Optics, 2015, 54(31): 9287-9293.
- [15] Li J W, Chen W B. Bandwidth of adaptive optics system in satellite-ground coherent laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0806003.

李佳蔚, 陈卫标. 星地相干光通信中的自适应光学系统带宽研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0806003.

- [16] Sun J, Huang P M, Yao Z S. Diversity reception technology in coherent optical communication over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channel[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0706002.
孙晶, 黄普明, 么周石. Gamma-Gamma 大气湍流下相干光通信分集接收技术研究[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0706002.
- [17] Tan T, Luo Q, Tan Y, *et al.* Measurement of temporal and spatial characteristics of atmospheric turbulence simulated by a rolling phase screen [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080101.
谭涛, 罗奇, 谭毅, 等. 旋转相位屏模拟大气湍流时空特性的测量[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080101.