

双向大气信道激光传输的信道互易性研究

刘艺, 赵义武, 倪小龙, 娄岩, 姜会林, 刘智

引用本文:

刘艺, 赵义武, 倪小龙, 娄岩, 姜会林, 刘智. 双向大气信道激光传输的信道互易性研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 140–147. doi: 10.3788/CO.20201301.0140

LIU Yi, ZHAO Yi-wu, NI Xiao-long, Lou Yan, JIANG Hui-lin, LIU Zhi. Channel reciprocity of bidirectional atmospheric laser transmission channels[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 140–147. doi: 10.3788/CO.20201301.0140

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/CO.20201301.0140>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性测量

Measurement of instantaneous-fading correlation in bidirectional optical channels through atmospheric turbulence

中国光学. 2019, 12(5): 1100 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1100>

泡沫覆盖不规则海面的非均匀空-水信道量子密钥分发

Quantum key distribution based on heterogeneous air-water channels with foam-covered irregular sea surfaces

中国光学. 2019, 12(6): 1362 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1362>

高斯涡旋光束在大气湍流传输中的特性研究

Characteristics of Gaussian vortex beam in atmospheric turbulence transmission

中国光学. 2017, 10(6): 768 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0768>

DWDM混合光学系统中帧间和信道内四波混频效应的抑制

Suppression of inter and intra channel four wave mixing effects in optical CDMA over DWDM hybrid system

中国光学. 2019, 12(1): 156 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0156>

空潜自由空间光通信的链路性能评估

Link performance evaluation for air-sea free-space optical communications

中国光学. 2019, 12(2): 405 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0405>

双向大气信道激光传输的信道互易性研究

刘 艺^{1,2}, 赵义武¹, 倪小龙¹, 娄 岩¹, 姜会林¹, 刘 智^{1*}

(1. 长春理工大学 空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 长春 130022;

2. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘要:在大气信道激光传输中,大气湍流对系统性能会产生较大影响,主要体现为降低传输速率和增加误码率。在具有信道互易性的双向激光传输链路中,两终端光斑信号强度的变化相关,可以在终端提取信道状态信息,以对信道影响进行补偿,从而提高传输速率。本文首先在弱湍流条件下,根据 Rytov 近似理论推导了平面波双向传输链路接收到的光斑信号的相关系数与传输路径的关系,并给出解析式。结果表明,两终端接收的光斑信号的光通量具有相关性,且相关系数与传输路径有关。进一步搭建了双向收发共轴激光传输系统,并进行了外场试验,试验结果不仅验证了双向大气信道激光传输链路具有互易性,且两接收端光斑信号光强的实时变化趋势相同。本文结论对实现大气信道高速率、低误码率激光传输具有重要意义。

关键词:信道互易性;大气湍流;光通量起伏;相关系数

中图分类号:TN929.1 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20201301.0140

Channel reciprocity of bidirectional atmospheric laser transmission channels

LIU Yi^{1,2}, ZHAO Yi-wu¹, NI Xiao-long¹, Lou Yan¹, JIANG Hui-lin¹, LIU Zhi^{1*}

(1. NUERC of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: liuzhiqi@cust.edu.cn

Abstract: In atmospheric channel laser transmissions, atmospheric turbulence has a large influence on system performance, reducing its transmission rate and increasing its bit error rate. In a bidirectional free-space laser transmission link with channel reciprocity, as the change in optical signal intensity at the two terminals is correlated, the Channel State Information (CSI) can be obtained at the transmitter and used to compensate the channel influence, thus improves the transmission rate. In this paper, under weakly fluctuating conditions, according to Rytov approximation, the relationship between the correlation coefficient of the spot signal received by plane wave bidirectional transmission link and the transmission path is deduced, and its analytical expression is derived. The results show that the intensity of the optical signal at the receiving end of the bidirectional free-space laser transmission link is related to the transmission end and that the correlation coefficient

收稿日期:2019-06-27;修订日期:2019-08-20

基金项目:国家自然科学基金(No. 61475025)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61475025)

cient is related to the location of the transmission path. A bidirectional coaxial laser transmission system is further established and an external field test is performed. The real-time change trend of the intensity of the speckle signal at both receivers is the same. Therefore, the atmospheric channel of the bidirectional free-space laser transmission link is reciprocal. The conclusion of this paper is of great significance for realizing high-rate and low bit error rate transmission in atmospheric channels.

Key words: channel reciprocity; atmospheric turbulence; light-flux fluctuation; correlation coefficient

1 引言

自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSO)系统具有实时性、高可靠性及高保密性等优点,其发展受到越来越多的关注。近年来大量的研究工作都集中于单向激光传输,然而双向激光传输更具有实用价值和研究意义^[1-4]。不同于单向激光传输,双向大气信道激光传输是由位于链路终端的同轴对称的两发射机发射出激光光束,在同一大气信道中传输。在双向大气信道激光传输中,能够测量和提取瞬时的大气信道中的湍流状态^[5],此外,两链路终端接收到的光通量起伏的相关性还可以反应大气信道环境对光信息传输的影响。通过在发射端进行预处理,可以提高传输系统性能,实现高速率、低误码率的激光传输。信道互易性,即在某种条件下,信号从a端传输到b端的信道状态与信号从b端传输到a端的信道状态是相同的^[6]。利用信道互易性,在信息传输的两个终端可获取大气信道链路的信道状态信息(CSI),针对CSI,采用适当的方法对信道影响进行补偿。这样,既可以不再应用传统自适应光学系统中的专用信道状态反馈链路,又可以提高数据传输速率,克服了传输系统接收端延迟的问题^[7-10]。如果双向大气信道光链路中的大气信道具有互易性,那么在两传输链路终端接收的光信号在理论上是相同的(相关系数为1),但在实际中通常相关系数近似为1^[11-14]。

1971年,美国凯斯西储大学的 Jeffrey H. Shapiro 提出并证明大气湍流信道的互易性,称其为点源点接收(Point-Source Point-Receiver, PSPR)大气信道互易性^[11]。2012年,德国的 Nicolas Perlot 和 Dirk Giggenbach 讨论了在大气湍流中两束双向传输的球面波的光强闪烁相关系数,从

而将 PSPR 互易性扩展到有限接收孔径内平均闪烁中。实验结果表明,两链路接收端接收到的光通量起伏间的相关系数明显小于1^[12]。2013年,美国的 Jean Minet 和法国的 Daniel Dolft 等研究了双向自由空间光通信链路两接收端信号功率的相关性。结果表明,采用准光学近似理论,在带有单模光纤准直器的单收发链路中,能够得到理想的(理论上100%)信号功率相关性^[15]。2017年,长春理工大学陈纯毅等研究并推导了在弱湍流中,两束反向传输光波的光通量起伏的相关性解析式,并基于 Tatarskii 湍流谱进行了仿真分析^[16]。

本文首先根据 Rytov 近似理论推导了平面波双向传输链路接收到的光斑信号的相关系数与传输路径的解析式,然后搭建了双向收发共轴激光传输系统,并进行了外场双向大气信道激光传输试验。

2 理论分析

在双向收发共轴激光传输系统中,两发射端同时出射的激光光束在同一大气信道中传输,但方向相反,最终被两接收端同时接收。双向大气信道激光传输链路示意图如图1所示。

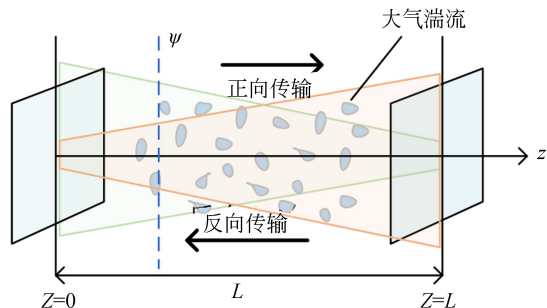


图1 双向大气信道激光传输链路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bidirectional atmospheric channel laser transmission link

在双向大气信道激光传输链路中,设传输距离为 L_0 。由平面 $Z=0$ 发射的激光光束,经大气信道传输,由平面 $Z=L$ 接收,此时称为“正向传输”(用下角标 F 表示),设正向传输的发射光信号强度为 $P_{T,F}$,接收光光强为 $P_{R,F}$;由平面 $Z=L$ 发射的激光光束,经大气信道传输,由平面 $Z=0$ 接收,此时称为“反向传输”,用下角标 I 表示,设反向传输的发射光光强为 $P_{T,I}$,接收光光强为 $P_{R,I}$ 。 Ψ 为传输路径上的湍流相位屏^[14-15,17-18]。

根据 Rytov 近似理论^[19],平面波正向传输的对数振幅 $\chi_1(\cdot)$ 和相位起伏 $S_1(\cdot)$ 的关系为^[20]:

$$\psi_{1,F}(\mathbf{r},z) = \chi_{1,F}(\mathbf{r},z) + iS_{1,F}(\mathbf{r},z) = \int_0^L dz \iint_{-\infty}^{\infty} h(x-x',y-y',L-z)n_1(x',y',z)dx'dy'. \quad (1)$$

其中:

$$h(x-x',y-y',L-z) = \frac{k^2}{2\pi(L-z)} \exp\left[ik \frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{2(L-z)}\right]. \quad (2)$$

对式(2)两端取傅立叶变换,得:

$$H_F(\boldsymbol{\kappa},L-z) = ik \exp\left[-i \frac{\boldsymbol{\kappa}^2(L-z)}{2k}\right], \quad (3)$$

其中, \mathbf{r} 为 $Z=L$ 平面内的一点, k 为波数且 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, $\boldsymbol{\kappa} = |\boldsymbol{\kappa}|$ 为 $\boldsymbol{\kappa}$ 的模。

利用随机函数的谱分解得:

$$H_F(\boldsymbol{\kappa},L-z) = H_{F_r}(\boldsymbol{\kappa},L-z) + H_{F_i}(\boldsymbol{\kappa},L-z) = k \sin \frac{\boldsymbol{\kappa}^2(L-z)}{2k} + ik \cos \frac{\boldsymbol{\kappa}^2(L-z)}{2k}. \quad (4)$$

将式(1)和式(3)中 $(L-z)$ 用 z 代替,得到平面波反向传输的对数振幅 $\chi_1(\cdot)$ 和相位起伏 $S_1(\cdot)$ 的关系为:

$$\psi_{1,I}(\boldsymbol{\rho},z) = \chi_{1,I}(\boldsymbol{\rho},z) + iS_{1,I}(\boldsymbol{\rho},z) = \int_0^L dz \iint_{-\infty}^{\infty} h(x-x',y-y',z)n_1(x',y',L-z)dx'dy', \quad (5)$$

其中 $\boldsymbol{\rho}$ 为 $Z=0$ 平面内的一点,且

$$h(x-x',y-y',z) = \frac{k^2}{2\pi z} \exp\left[ik \frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{2z}\right]. \quad (6)$$

对式(6)两端取傅立叶变换,得:

$$H_I(\boldsymbol{\kappa},z) = ik \exp\left(-i \frac{\boldsymbol{\kappa}^2 z}{2k}\right). \quad (7)$$

利用随机函数的谱分解得:

$$H_I(\boldsymbol{\kappa},z) = H_{I_r}(\boldsymbol{\kappa},z) + H_{I_i}(\boldsymbol{\kappa},z) = k \sin \frac{\boldsymbol{\kappa}^2 z}{2k} + ik \cos \frac{\boldsymbol{\kappa}^2 z}{2k}. \quad (8)$$

双向大气信道激光传输链路接收端光斑信号的一阶对数振幅分别为:

$$\chi_{1,F}(\mathbf{r},L-z) = \frac{1}{2} \int_0^L dz \iint_{-\infty}^{\infty} dv(\boldsymbol{\kappa},z) \times [H_F(\boldsymbol{\kappa},L-z) + H_F^*(\boldsymbol{\kappa},L-z)] \exp(i\boldsymbol{\kappa} \cdot \mathbf{r}), \quad (9)$$

$$\chi_{1,I}(\boldsymbol{\rho},z) = \frac{1}{2} \int_0^L dz \iint_{-\infty}^{\infty} dv(\boldsymbol{\rho},z) \times [H_I(\boldsymbol{\kappa},z) + H_I^*(\boldsymbol{\kappa},z)] \exp(i\boldsymbol{\kappa} \cdot \boldsymbol{\rho}), \quad (10)$$

其中, $H_F^*(\boldsymbol{\kappa},L-z)$ 和 $H_I^*(\boldsymbol{\kappa},z)$ 分别为 $H_F(\boldsymbol{\kappa},L-z)$ 和 $H_I(\boldsymbol{\kappa},z)$ 的共轭复数。

由于有限尺寸的接收孔径会减弱接收光斑的光强闪烁,即存在孔径平均效应。因此,需要确定接收孔径接收到的光通量起伏的统计量^[21-22]。根据 Rytov 近似理论, $I(\mathbf{r})/I_0 \approx 1 + 2[\chi_1(\mathbf{r}) + \chi_1^2(\mathbf{r}) + \chi_2(\mathbf{r}) + \dots]$, 其中, $I(\mathbf{r})$ 为在位置 \mathbf{r} 处的湍流引起的辐射照度, I_0 为真空中孔径接收的辐射照度。

二阶 Rytov 扰动对于对数振幅方差和辐射照度的影响可以忽略,因此在弱湍流下,接收端的归一化光通量可近似化简为:

$$P = \frac{\iint_D I(\mathbf{r})d^2\mathbf{r}}{\iint_D I_0 d^2\mathbf{r}} = S_A^{-1} \iint_D I(\mathbf{r})/I_0 d^2\mathbf{r} \approx 1 + 2S_A^{-1} \iint_D \chi_1(\mathbf{r})d^2\mathbf{r} = 1 + 2\bar{\chi}_1, \quad (11)$$

其中 D 为接收孔径区域, S_A 为半径是 R_a 的接收孔径面积, $\bar{\chi}_1$ 为 $\chi_1(\mathbf{r})$ 的孔径平均值, 设 a_0 为真空中平面波的振幅, 则 $I_0 = a_0^2$ 。

因此, $\bar{\chi}_{1,F}$ 和 $\bar{\chi}_{1,I}$ 分别为:

$$\bar{\chi}_{1,F} = S_A^{-1} \iint_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{r} \chi_{1,F}(\mathbf{r},z=L), \quad (12)$$

$$\bar{\chi}_{1,I} = S_A^{-1} \iint_{-\infty}^{\infty} d^2\boldsymbol{\rho} \chi_{1,I}(\boldsymbol{\rho},z=L). \quad (13)$$

已知 $\chi_{1,F}(\mathbf{r})$ 和 $\chi_{1,I}(\boldsymbol{\rho})$ 均为均值为零的实数, 根据统计理论, 则有 $B_{FI} = \langle \bar{\chi}_{1,F} \bar{\chi}_{1,I}^* \rangle$, $\sigma_F^2 = \langle \bar{\chi}_{1,F}^2 \rangle$

$\bar{\chi}_{1,F}^*$, $\sigma_I^2 = \langle \bar{\chi}_{1,F} \bar{\chi}_{1,I}^* \rangle$, 且 $\bar{\chi}_{1,F} \equiv \bar{\chi}_{1,F}^*$, $\bar{\chi}_{1,I} \equiv \bar{\chi}_{1,I}^*$ 。

将式(4)、式(8)、式(9)和式(10)分别代入

公式(12)和公式(13)中,并计算 B_{FI} , σ_F^2 和 σ_I^2 [16-17,23]:

$$\begin{cases} B_{FI} = 4\pi^2 k^2 \int_0^L dz \int_0^\infty d\kappa \kappa \Phi_n(\kappa, z) \text{jinc}^2(\kappa R_a) H_{Fr}(\kappa, L-z) H_{Ir}(\kappa, z) \\ \sigma_F^2 = 4\pi^2 k^2 \int_0^L dz \int_0^\infty d\kappa \kappa \Phi_n(\kappa, z) \text{jinc}^2(\kappa R_a) H_{Fr}^2(\kappa, L-z) \\ \sigma_I^2 = 4\pi^2 k^2 \int_0^L dz \int_0^\infty d\kappa \kappa \Phi_n(\kappa, z) \text{jinc}^2(\kappa R_a) H_{Ir}^2(\kappa, z) \end{cases}, \quad (14)$$

$\Phi_n(\kappa)$ 为大气湍流功率的 Kolmogorov 功率谱,得:

$$\begin{cases} B_{FI} = 0.033 \times 4\pi^2 k^2 R_a^{-1} \int_0^L dz \int_0^\infty C_n^2(z) \kappa^{-11/3} J_0(R_a \kappa) \sin\left(\frac{\kappa^2 z}{2k}\right) \sin\left[\frac{\kappa^2(L-z)}{2k}\right] d\kappa \\ \sigma_F^2 = 0.033 \times 4\pi^2 k^2 R_a^{-1} \int_0^L dz \int_0^\infty C_n^2(z) \kappa^{-11/3} J_0(R_a \kappa) \sin^2\left[\frac{\kappa^2(L-z)}{2k}\right] d\kappa \\ \sigma_I^2 = 0.033 \times 4\pi^2 k^2 R_a^{-1} \int_0^L dz \int_0^\infty C_n^2(z) \kappa^{-11/3} J_0(R_a \kappa) \sin^2\left(\frac{\kappa^2 z}{2k}\right) d\kappa \end{cases}, \quad (15)$$

其中, $C_n^2(z)$ 为传输路径 z 处的大气折射率结构常数, $J_0(\cdot)$ 为第一类零阶贝塞尔函数。

正向传输和反向传输的平面波光通量的相关系数为:

$$\mu_{FI} = \frac{\text{Cov}(P_F, P_I)}{\sigma_F \sigma_I} = \frac{B_{FI}}{\sigma_F \sigma_I}. \quad (16)$$

将公式(15)代入公式(16),即得到双向大气信道激光传输链路的信道相关系数。

在实际应用中,双向大气信道激光传输链路的两终端同时对接收光斑信号进行采样接收,归一化,并计算相关系数 μ_{FI} :

$$\mu_{FI} = \frac{\text{Cov}(P_{R,F}, P_{R,I})}{\sigma_F \sigma_I} = \frac{E\{(P_{R,F} - \mu_F)(P_{R,I} - \mu_I)\}}{\sigma_F \sigma_I}, \quad (17)$$

其中 σ_F 和 μ_F 为正向传输链路接收端光信号的标准差和均值, σ_I 和 μ_I 为反向传输链路接收端光信号的标准差和均值。

将双向传输链路终端接收到的光斑信号进行归一化,计算均方误差 $NMSE$ [14],即:

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{R,Fi} - P_{R,Ii})^2}{\mu_F \mu_I}, \quad (18)$$

其中, $P_{R,Fi}$ 和 $P_{R,Ii}$ 分别为正向传输链路和反向传输链路接收终端第 i 帧光斑信号的强度。

μ_{FI} 和 $NMSE$ 均可用于评估大气信道互易性。当 $\mu_{FI} \approx 1$ 或 $NMSE \approx 0$ 时,大气信道具有互易性。

3 试验测量系统

试验链路为无障碍通信城市链路,如图2所示。试验系统的两终端分别位于距离地面41.7 m高的长春理工大学科技大厦A座13楼以及距离地面33 m高的长春理工大学东区第二教学楼九楼,GPS测得的链路长度为0.9 km。



图2 试验链路示意图

Fig. 2 Experimental link diagram

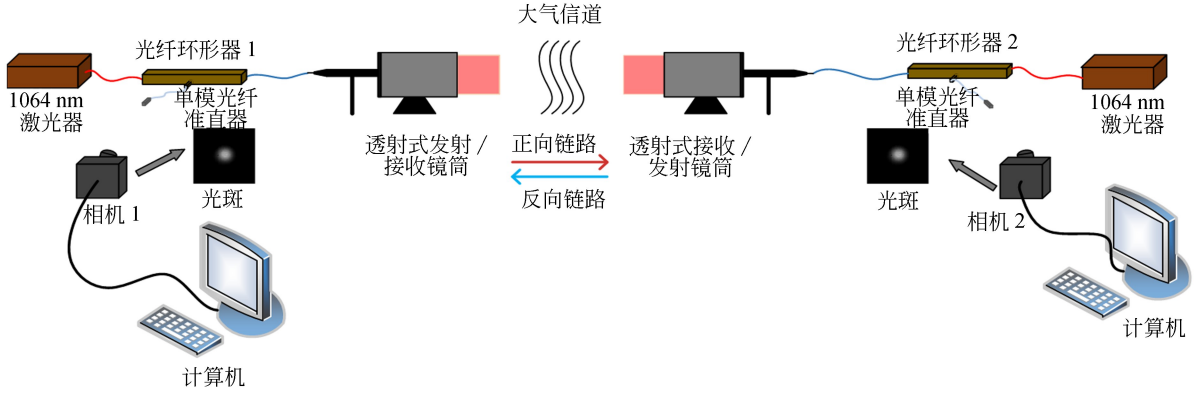


图 3 双向收发共轴大气激光传输系统

Fig. 3 Coaxial atmospheric laser transmission system with bidirectional transceiver

试验系统为双向收发共轴大气激光传输系统,如图 3 所示。在传输链路终端采用光纤环形器实现共享输入/输出端口。链路终端设备主要包括 1 064 nm 激光器,1 064 nm 单模光纤准直器,透射式发射/接收望远镜,高帧频相机,视频采集卡,图像处理软件及数据处理与分析计算机等。

本文数据为 2018 年 5 月至 7 月在上述双向收发共轴大气激光传输系统中采集的数据。试验链路中,双向大气信道激光传输链路终端孔径相同,为 $D=0.08\text{ m}$,传输距离为 $L=900\text{ m}$ 。在试验过程中,双向传输链路的收发终端始终保持严格一致。双向传输链路对准后,由两侧终端同时发射波长为 1 064 nm,功率为 20 mW 的激光光束,经过湍流大气信道传输,在接收端,激光束经透射式接收装置耦合进 1 064 nm 的单模光纤中,通过 1064 nm 单模光纤环形器进入高帧频相机,然后由在同一服务器网络下的两计算机对光斑进行采集及处理,采样频率为 1 kHz,每次试验采集 60 000 帧光斑灰度图像。光纤准直器主要用于分离本地发射光波和接收光波。

4 结果与分析

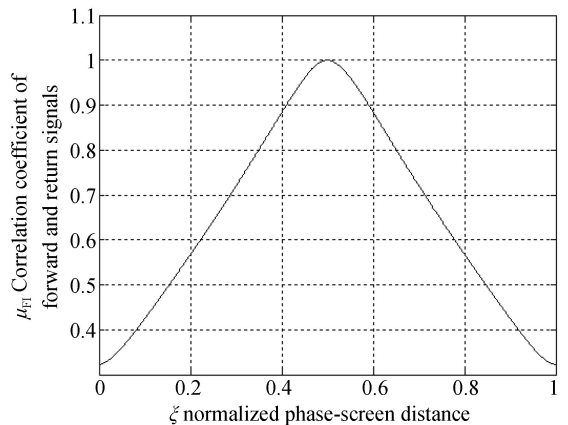
4.1 理论仿真结果与分析

理论仿真中,弱湍流情况下的大气信道相关系数 μ_{FI} 与传输路径 ξ 的关系如图 4 所示。在传输路径中间位置即 $\xi=0.5$ 时,链路接收端光信号的相关系数达到最大,双向大气信道激光传输相关系数 $\mu_{FI}=1$,表明此时大气信道互易性最好;在

靠近传输链路终端位置,两接收端光信号的相关系数较小,表明互易性较差。

4.2 试验测量结果与分析

图 5 为双向大气信道激光传输链路两终端探测到的光斑信号。由于双向收发共轴大气激光传输光路对准要求极为严格,并受到 1 064 nm 红外光的限制,试验仅在晚上进行,试验数据量较大,本文选取了一组具有代表性的数据。其中图 5 (a)和 5 (b)分别为双向大气信道激光传输链路终端采集的两组光斑图像数据,采集时间为 60 s。由图 5 可知,两接收端光斑信号的光强变化趋势相同。

图 4 弱湍流情况下信道相关系数 μ_{FI} 与传输路径 ξ 的关系Fig. 4 Relationship between channel correlation coefficient μ_{FI} and transmission path ξ under weak turbulence conditions

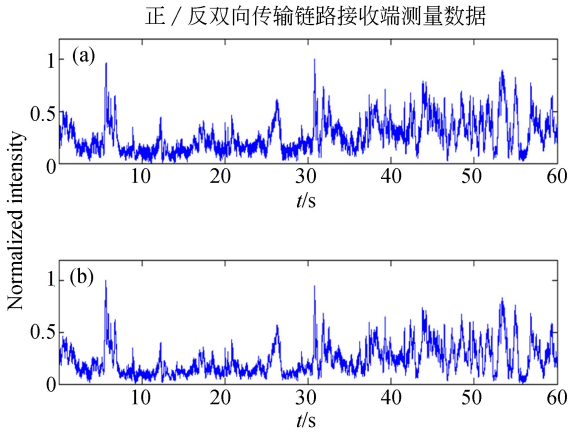


图5 双向自由空间激光传输链路两接收终端的光斑测量数据

Fig. 5 Measurement data of two receivers in bidirectional free space laser transmission link

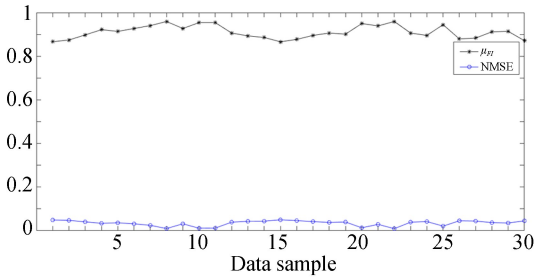


图6 30组数据样本的相关系数及归一化均方误差变化趋势

Fig. 6 The correlation coefficient and normalized mean square error of 30 groups of data samples

利用公式(17)和公式(18)计算了30组正反两传输链路终端光斑信号的相关系数及归一化均方误差,变化趋势如图6所示。本文随机抽取的30组接收光斑信号数据的相关系数均大于0.85,同时归一化均方误差均小于0.1。从侧面说明接

收终端光斑信号的相关系数和归一化均方误差的大小可以反应本文中建立的双向收发共轴大气激光传输系统的信道相关性,说明湍流大气信道具有互易性。由图6两接收终端光斑信号的相关系数和归一化均方误差的变化趋势可知,NMSE越小,对应的 μ_{FI} 值越大,说明两接收终端光斑信号互易性越好。上述双向大气信道激光传输试验证明该传输链路中湍流大气信道具有互易性。

5 结论

本文首先基于Rytov近似理论推导分析了弱湍流起伏条件下,正反双向大气信道激光传输链路接收终端光斑信号的相关性与传输路径位置的关系,结果表明,在传输路径中点 $\xi = 0.5$ 处,双向大气信道激光传输链路接收终端光斑信号的相关系数最大且为1,表明此时大气信道互易性最好;在靠近链路收发终端位置,接收终端光斑信号的相关系数较小,表明此时大气信道互易性较差。上述结果将为后续双向光链路传输系统中孔径遮拦比、收发端空间是否对称等因素对光斑信号相关性的影响研究奠定了基础。然后,搭建了双向收发共轴大气激光传输系统并进行外场试验。结果表明,两接收终端光斑信号的光强变化趋势相同,计算传输链路终端接收光斑信号的相关系数和归一化均方误差,结果显示传输链路接收终端光斑信号具有较高的相关系数(>0.85),同时正反两传输链路接收终端光斑信号的归一化均方误差均小于0.1。双向大气信道激光传输试验证明该传输链路中湍流大气信道具有互易性。本文的结论对提高自由空间激光传输系统的性能具有一定指导意义和参考价值。

参考文献:

- [1] 任伟. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国新通信, 2017, 19(24): 5-7.
REN W. Research status and development trend of space laser communication [J]. *China New Telecommunications*, 2017, 19(24): 5-7. (in Chinese)
- [2] 任建迎, 孙华燕, 张来线, 等. 空间激光通信发展现状及组网新方法[J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 143-150.
REN J Y, SUN H Y, ZHANG L X, et al. Development status of space laser communication and new method of networking [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 143-150. (in Chinese)
- [3] MECHERLE G S, HORSTEIN M. Comparison of radio frequency and optical architectures for deep-space communications

- via a relay satellite[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2123: 36-53.
- [4] MORTAZY E, MORAVVEJ-FARSHI M K. A new model for optical communication systems[J]. *Optical Fiber Technology*, 2005, 11(1): 69-80.
- [5] PURYEAR A L, SHAPIRO J H, PARENTI R R. Reciprocity-enhanced optical communication through atmospheric turbulence-part II: communication architectures and performance[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(8): 888-900.
- [6] 陈绍娟, 向劲松, 李晓双. 星地激光通信中多光束发射的最优发送[J]. 现代电信科技, 2013, 43(10): 43-48.
CHEN SH J, XIANG J S, LI X SH. Transmitter optimization in multi-beam transmitter for satellite-ground laser communication[J]. *Modern Science & Technology of Telecommunications*, 2013, 43(10): 43-48. (in Chinese)
- [7] PARENTI R R, ROTH J M, GRECO J A, *et al.*. Channel reciprocity in single-mode free-space optical links[C]. *Proceedings of 2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, IEEE*, 2012: 113-114.
- [8] PARENTI R R, ROTH J M, SHAPIRO J H, *et al.*. Experimental observations of channel reciprocity in single-mode free-space optical links[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21635-21644.
- [9] KOLKA Z, BIOLKOVA V, WILFERT O, *et al.*. Simulation model of correlated FSO channels[C]. *Proceedings of 2015 Conference on Microwave Techniques, IEEE*, 2015: 1-4.
- [10] ANDRÉP S, PINTO A N. Chromatic dispersion fluctuations in optical fibers due to temperature and its effects in high-speed optical communication systems[J]. *Optics Communications*, 2005, 246(4-6): 303-311.
- [11] SHAPIRO J H. Reciprocity of the turbulent atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(4): 492-495.
- [12] GIGGENBACH D, COWLEY W, GRANT K, *et al.*. Experimental verification of the limits of optical channel intensity reciprocity[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(16): 3145-3452.
- [13] PARTHASARATHY S, GIGGENBACH D, BARRIOS R, *et al.*. Simulative verification of channel reciprocity in free-space optical inter-HAP links[C]. *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, IEEE*, 2017: 154-159.
- [14] 王李, 施鹏, 赵生妹. 大气湍流下自由光通信信道模型的数值仿真[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2012, 32(4): 32-37.
WANG B, SHI P, ZHAO SH M. Numerical simulations of FSO channel through atmosphere turbulence[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2012, 32(4): 32-37. (in Chinese)
- [15] MINET J, VORONTSOV M A, POLNAU E, *et al.*. Enhanced correlation of received power-signal fluctuations in bidirectional optical links[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(2): 022401.
- [16] CHEN CH Y, YANG H M. Correlation between light-flux fluctuations of two counter-propagating waves in weak atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12779-12795.
- [17] PERLOT N, GIGGENBACH D. Scintillation correlation between forward and return spherical waves[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(15): 2888-2893.
- [18] TATARSKII V I. *Wave Propagation in A Turbulent Medium*[M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [19] RYTOV S M, KRAVTSOV Y A, TATARSKII V I. *Principles of Statistical Radiophysics: Wave Propagation Through Random Media*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- [20] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
RAO R ZH. *Modern Atmospheric Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [21] KHALIGHI M A, SCHWARTZ N, BOURENNANE S, *et al.*. Fading reduction by aperture averaging and spatial diversity in optical wireless systems[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2009, 1(6): 580-593.
- [22] 张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

ZHANG Y X, CHI Z Y. *Laser Wave Propagation and Imaging Throng Atmosphere*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)

[23] ISHIMARU A. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*[M]. New York: IEEE Press, 1977.

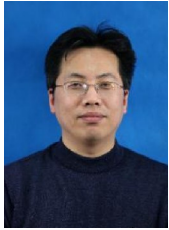
作者简介:



刘 艺(1992—),女,河北保定人,博士研究生,主要从事大气光学与空间激光通信传输方面的研究。E-mail: liuyi920611@163.com



姜会林(1945—),男,辽宁辽中人,博士,教授、博士生导师,中国工程院院士,应用光学专家。E-mial: hljiang@cust.edu.cn



刘 智(1971—),男,吉林长春人,博士,教授,1993年、2001年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为空间激光通信技术和激光在复杂信道中的传输特性。E-mail: liuzhiqi@cust.edu.cn