

双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性测量

向磊^{1,2}, 陈纯毅^{1,2*}, 姚海峰¹, 倪小龙¹, 潘石³, 刘中辉², 娄岩¹

(1. 长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022;

3. 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:为证明双向光传输系统中大气湍流信道的互易性, 提出一种测量瞬时接收信号衰落相关性的方法, 并建立了分析测量数据的数学模型。在相距 883 m 的两栋高楼之间进行双向光传输测量实验, 根据测得的光斑图像数据, 对信道的瞬时衰落相关性进行验证, 并分析了实际场景下归一化接收信号起伏方差对相关系数的影响。结果表明: 两个相反方向的光信道瞬时衰落相关系数大部分均在 0.85 以上, 最高可达 0.95, 证明了双向大气湍流光信道之间存在良好的互易性; 且随着归一化接收信号起伏方差的增大, 相关系数呈轻微下降的趋势。

关键词: 瞬时衰落; 大气湍流; 双向光信道; 互易性

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20191205.1100

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

XIANG Lei^{1,2}, CHEN Chun-yi^{1,2*}, YAO Hai-feng¹, NI Xiao-long¹,
PAN Shi³, LIU Zhong-hui², LOU Yan¹

(1. Key Laboratory for Defense Discipline of Space-to-Ground

Laser Communication Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Computer Science and Technology, Changchun University of

Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. School of Electrical and Information Engineering, Changchun University of

Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: chenchunyi@hotmail.com

收稿日期: 2018-11-19; 修订日期: 2019-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61775022, No. 61475025); 吉林省科技发展计划 (No. 20170521001HJ, No. 20180519012JH); 中国博士后科学基金 (2017M621179)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61775022, No. 61475025); the Science and Technology Development Program of Jilin Province of China (No. 20170521001HJ, No. 20180519012JH); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2017M621179)

Abstract: To prove the reciprocity of an atmospheric turbulent channel in bidirectional optical transmission systems, we propose a method for measuring the correlation between the fading of instantaneously received signals and establish a mathematical model for analyzing the measurement data. Experiments of bidirectional optical transmission measurements were carried out between two tall buildings separated by 883 m. According to the measured speckle image data, we verified the instantaneous-fading correlation of the channel and analyzed the effect of the normalized received signal fluctuation variance on the correlation coefficient in practical scenarios. It was shown that most of the instantaneous-fading correlation coefficients of optical channels in the two counter-directions were above 0.85 and even up to 0.95, which proves that reciprocity can be well maintained for a bidirectional turbulent optical channel. With an increasing fluctuation variance of the normalized received optical signal, the correlation coefficient is slightly descending.

Key words: instantaneous fading; atmospheric turbulence; bidirectional optical channel; reciprocity

1 引言

在过去的几十年里,通信技术得以飞速发展,其中光通信技术由于具有容量大、速度快等优势,引起了广泛关注,已成为国内外通信领域的研究热点^[1-6]。但是,由于大气湍流将引起大气的折射率变化,加之大气中气体分子对光波的吸收与散射作用,光波在传输过程中会有明显的强度衰弱现象,从而影响大气光通信系统的性能^[7-11]。为解决上述问题,自适应光学技术被提出并广泛应用于光通信系统中以缓解大气湍流对光通信的影响,该技术也同样适用于自由空间双向光传输系统^[12-14]。自由空间双向光传输系统在相同传播路径上通过两个处于不同位置的发射机发送传播方向相反的光波构成。在该系统中,为了探测通信两端实时的信道状态以满足自适应光学技术校正等需求,需要额外建立一条专用的反馈链路,然而这样做不仅耗费资源而且不能保证返还信道状态的实时性^[15]。

在大气湍流信道上的双向光传输系统中,两束反向传输的光波经过相同的大气链路,即可认为双向光传输系统中的两个信道具有相同的衰落特性,而双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性是一个非常重要的信道参数。例如在双

向大气湍流光信道瞬时信号衰落相关性较高时,可通过接收端的瞬时信号状态直接得到发射端的瞬时信号状态。这样不仅能采用自适应光学技术对由大气湍流作用造成的波前畸变进行校正,还能减少因建设反馈链路而产生的额外开销。此外,还可以在无反馈链路的情况下,利用信道互易特性获得实时信道状态信息,以在信道瞬时衰落相关性参数值较高时进行诸如密钥提取等工作^[16]。由此可见,进行双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性测量,对分析和研究自由空间双向光传输系统具有重要意义。因此需要对大气湍流中双向光传输信道瞬时衰落相关特性进行测量并分析。

已有的研究双向大气湍流光信道瞬时衰落相关性文献大都是先在理论上推导两端接收信号或接收功率公式;再代入互相关函数进行计算,得到相关系数;最后,在理论条件下进行数值模拟来判断湍流强度等因素对信道瞬时衰落相关性的影响^[15-17],对于实际情况下双向大气湍流光信道瞬时衰落相关性的报道较少^[18-19]。本文首先通过构造双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性测量系统,并进行实验测量;接着,根据测量结果对实际条件下双向大气湍流光信道瞬时衰落相关性进行验证;最后,分析实际条件下归一化接收信号起伏方差对相关性的影响。

2 双向光瞬时衰落相关测量理论

由本课题组前期工作可知,采用共同横向空间模式耦合系统来研究测试互易性理论,公式为式(1),见文献[16]。由此本文设计了如图1所示的实验原理图。文献[15-17]通过理论推导了根据两端接收信号求取双向大气湍流光信道瞬时衰落相关系数的计算方法。

将测量两端分别记为A端和B端, $P_A(t)$ 和 $P_B(t)$ 分别为A、B两端记录的接收信号,并假设它们都被认为是平稳的随机过程,那么它们之间归一化的互相关函数可以定义为^[17]:

$$\gamma_{AB}(\tau) = \frac{\langle P_A(t)P_B(t+\tau) \rangle - \langle P_A(t) \rangle \langle P_B(t) \rangle}{[\langle P_A^2(t) \rangle - \langle P_A(t) \rangle^2]^{1/2} [\langle P_B^2(t) \rangle - \langle P_B(t) \rangle^2]^{1/2}}, \quad (1)$$

其中, $\langle \cdot \rangle$ 表示 $P_A(t)$ 和 $P_B(t)$ 的均值, τ 代表瞬时时间变化。令 $A(\mathbf{r}, z=0)$ 和 $A(\mathbf{r}, z=L)$ 分别代表A、B两端输出光场的复振幅;令 $\psi(\mathbf{r}, z=0, t)$, $\psi(\mathbf{r}, z=L, t)$ 分别代表A端 $z=0$ 处与B端 $z=L$ 处的光场; κ_A, κ_B 都是取决于发射功率和光电探测器灵敏度的参数, L 为传播距离。则对于A端光电探测器记录的信号 $P_A(t)$ 有^[17]:

$$P_A(t) = \kappa_A \left| \int A(\mathbf{r}, z=0) \psi(\mathbf{r}, z=0, t) d^2\mathbf{r} \right|^2. \quad (2)$$

同理,对于B端探测器记录的信号 $P_B(t)$ 有^[17]:

$$P_B(t) = \kappa_B \left| \int A(\mathbf{r}, z=L) \psi(\mathbf{r}, z=L, t) d^2\mathbf{r} \right|^2. \quad (3)$$

由式(1)、式(2)、式(3)可以计算出A、B两端的接收信号,以及通过两端的接收信号来计算两端信号瞬时衰落相关系数。为了研究双向大气湍流光信道瞬时衰落相关性以验证光信道之间的互易性,本文构建了双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性测量系统,并根据测量数据进行了相关分析。

3 实验系统组成与测量

双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性测量

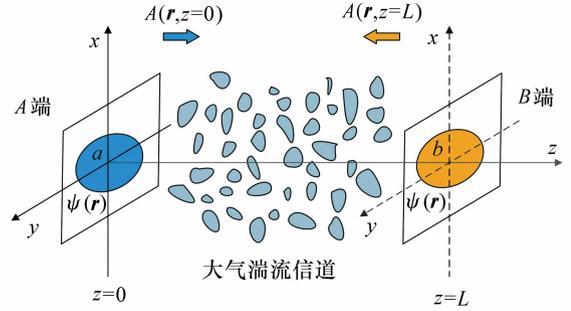


图1 双向光瞬时衰落特性相关测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of correlation measurement of bidirectional optical instantaneous fading

系统如图2所示,A端激光器 l_1 于发射端输出波长为1 064 nm的连续光波,经由隔离度为40 dB的环形分光器 c_1 ,通过准直光学天线 a_1 (由望远镜组成)实现扩束并发射到大气湍流信道中,光波经过传输到达B端时,会被B端的准直光学天线 a_2 收缩汇聚,再通过单模光纤经由环形分光器 c_2 最终输出到光电探测器 d_2 上,而 d_2 则会将收集到的光波转化为图像并利用计算机 p_2 中相应的光斑采样程序将其采集并存储到磁盘文件中。

采样程序通过预先设置好的同步服务器来确保两客户端对图像同步采样,以最大限度地确保测量数据的合理性。每采集10组数据后再采集1组本地光斑(接收端探测器检测到的由该端激光器所产生的光斑)以确保测量数据的可靠性。进行本地光斑采样前需使用预先准备好的工具阻断双向大气湍流光传输通信链路,以除去接收光波对本地光斑产生的干扰。光斑图像采样过程中可以根据实际需要获得两种不同类型的实验数据,一种是连续的光斑图像,另一种是连续图像中每一帧的灰度值。本文主要测量的是第二种数据,并根据灰度值进行分析。

实验中A、B两端使用的光学天线是由具有相同光学参数的望远镜组成的收发一体式光学天线,其中望远镜的口径为80 mm。实验所使用的激光器输出波长为1 064 nm,为获得离焦光斑图

像,探测器并未放置在透镜焦点位置。进行测量时,相机捕捉到的连续光斑的图像尺寸大小均为 $320 \text{ pixel} \times 320 \text{ pixel}$, 图像采集的帧速率为 $1\ 000 \text{ frame/s}$, 每组实验采集 1 min 共 $60\ 000$ 帧数据。

相关性测量系统的 A 端位于长春理工大学南校区科技大厦 13 层 1310 室, B 端位于长春理工大学东校区第二教学楼 9 层 908 室, 大气湍流光信道的传输距离为 883 m 。

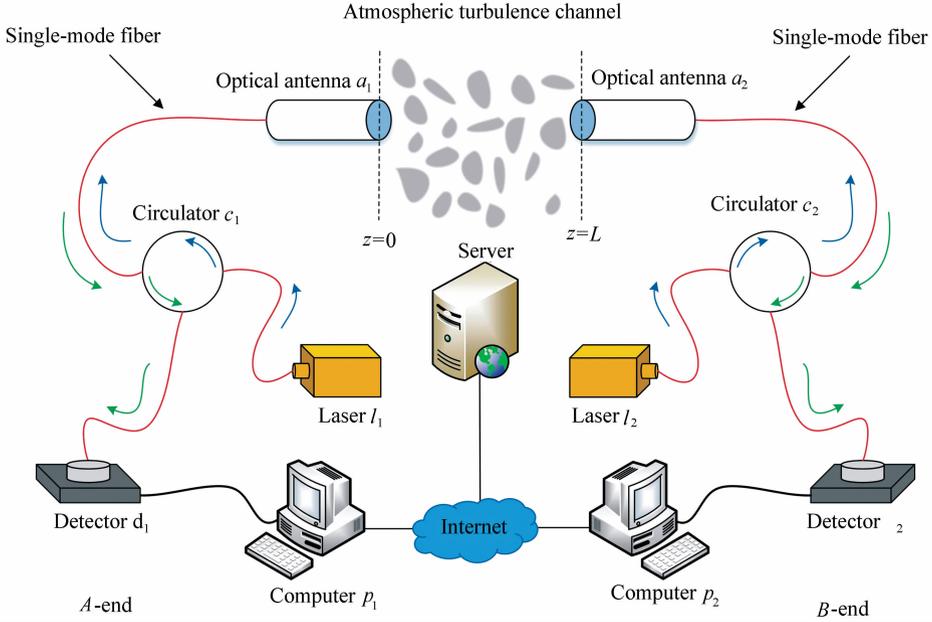


图2 双向大气湍流光信道瞬时衰落特性相关测量系统图

Fig.2 Measurement system diagram for instantaneous fading characteristic of bidirectional atmospheric turbulent optical channel

虽然理论上双向大气湍流光信道瞬时衰落相关系数可以通过式(1)来计算,但实际上式(1)中的接收信号会受到激光器发射功率的噪声干扰。

将激光器发射功率对接收信号的影响因子记为 ε , ε 与激光器发射功率大小和环形分光器质量有关,因此式(1)可变为如下形式:

$$\gamma_{AB}(\tau) = \frac{\langle P'_A(t)P'_B(t+\tau) \rangle - \langle P'_A(t) \rangle \langle P'_B(t) \rangle}{[\langle P_A'^2(t) \rangle - \langle P'_A(t) \rangle^2]^{1/2} [\langle P_B'^2(t) \rangle - \langle P'_B(t) \rangle^2]^{1/2}} \quad (4)$$

有以下关系式

$$\begin{aligned} P'_A(t) &= P_A(t) + \varepsilon_A \\ P'_B(t) &= P_B(t) + \varepsilon_B \\ P'_B(t+\tau) &= P_B(t+\tau) + \varepsilon_B \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $P'_A(t)$ 和 $P'_B(t)$ 分别代表 A 、 B 两端被干扰后的接收信号; ε_A 和 ε_B 分别代表 A 、 B 两端激光器的影响因子,假设其均为非线性噪声,为便于描述,统一记为 $\varepsilon_C, C \in \{A, B\}$ 。

在测定相关特性时,为忽略 ε_C 对系统的影响,必使其满足 $\varepsilon_C/P_c \ll 1$ ^[18-19]。此时,式(4)可简化为式(1)。因此,为不影响实验结果,需选择隔离度为 40 dB 以上的环形分光器,以保证 $P(t)$

和 ε_C 的比值相差 $10\ 000$ 以上。

4 实验结果与分析

由文献[16]和[17]可知,双向大气湍流光信道瞬时衰落相关系数最高可以达到1。但在实际情况下,许多因素会对信道瞬时衰落相关性的测量产生影响。例如,在进行实验时,准直光学天线实际上会有些许横向偏移偏差,而这种横向偏差会导致计算出的信道瞬时衰落相关系数值较理论值更低。本节主要对 A 、 B 两端得到的连续光斑图像的灰度值进行测量,然后根据测量数据对双

向大气湍流光信道瞬时衰落相关性进行验证,并分析实际情况下归一化接收信号起伏方差与双向

大气湍流光信道瞬时衰落相关系数的关系。

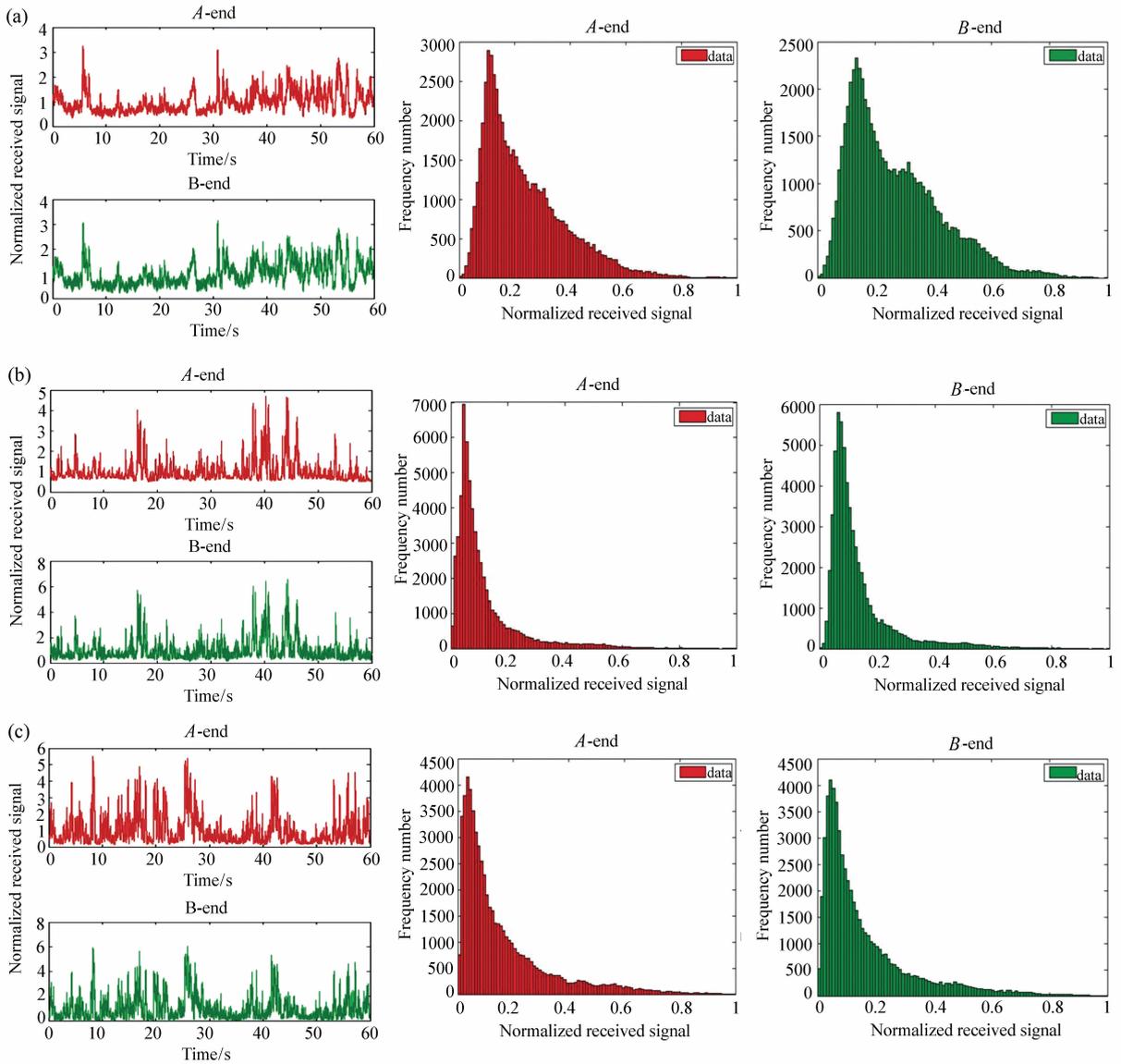


图 3 (a)、(b)和(c)分别为根据不同时间段的测量数据作图。从左至右依次为归一化接收信号随时间变化图、A端归一化接收信号频数分布直方图、B端归一化接收信号频数分布直方图,其中红色代表A端测量数据,绿色代表B端测量数据

Fig. 3 (a), (b), and (c) are plotted according to measurement data at different time. From left to right, the normalized received signal changes with time, the normalized received signal frequency distribution histogram of A-end, and the normalized received signal frequency distribution histogram of B-end, where the red represents measurement data at A-end, and green represents the measurement data at B-end

在不同时间段内测量得到共7 000组光斑图像灰度值数据,选取其中具有代表性的70组实验数据进行分析。由文献[16]可知,可通过接收功率来表征接收端瞬时信号的强弱程度,而光斑图

像的灰度值可用来表征接收功率的大小,因此,从70组数据中任意选取3组数据做图,如图3(彩图见期刊电子版)所示,图3(a)、3(b)、3(c)中左侧图所示为接收信号强度随时间变化趋势图(使用

平均接收信号强度对接收信号作归一化处理),其中测量时间从上到下依次为 19:30、20:30、21:30,红色曲线代表的是 A 端接收信号随时间的变化趋势,绿色曲线代表的是 B 端接收信号随时间的变化趋势。观察图 3(a)、3(b)和 3(c)中归一化接收信号随时间变化图可以发现,在各测量时间段内 A、B 两端接收信号随时间的变化规律都非常相似,即在该时间段内两端接收信号的瞬时衰落特性具有一定的相关性。

为了分析得到两端接收信号瞬时衰落之间的相关性,对图 3(a)、3(b)和 3(c)所代表的测量数据进行计算,求得 A、B 两端接收信号瞬时衰落相关系数 γ_{AB} 依次为 0.959 2、0.906 2、0.933 9。这说明此时两端接收信号瞬时衰落之间的相关性很强。对选取的 70 组数据进行计算,得到的相关系数统计频数分布直方图如图 4 所示。由图 4 可知,由每组测量数据计算得到的相关系数均在 0.7 以上,其中大部分的相关系数在 0.85 以上。这说明两个方向的大气湍流光传输信道瞬时衰落之间均存在着非常强的相关性,同时证明两个信道间存在良好的互易性。

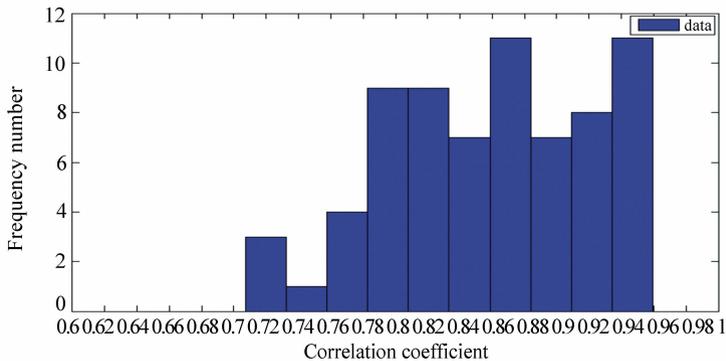


图4 相关系数频数分布直方图

Fig. 4 Correlation coefficient frequency distribution histogram

从 70 组数据中随机选取 20 组数据绘制了相关系数随 A 端归一化接收信号起伏方差变化图(如图 5 所示,彩图见期刊电子版),其中蓝色圆点是根据 A 端测量数据计算得到的点,红色曲线为根据蓝色圆点拟合得到的相关系数随 A 端归一化接收信号起伏方差的变化曲线。观察图 5 中的红色曲线可以发现,信道瞬时衰落相关系数会随着 A 端归一化接收信号起伏方差的增大而稍

由文献[20]可知,归一化接收信号起伏方差可表示为

$$\sigma^2 = \text{Var}\left(\frac{x}{\bar{x}}\right), \quad (6)$$

其中, x 代表接收信号序列, \bar{x} 代表接收信号序列的均值, $\text{Var}(\cdot)$ 为求方差函数。

由图 3 中的 3 组数据可以得到, A 端 3 组数据的归一化接收信号起伏方差从上到下依次为 0.189 4、0.272 7 和 0.799 9。再对图 3 中归一化接收信号强度随时间的变化趋势图进行统计可以得到图 3(a)、3(b)和 3(c)右侧结果。图 3(a)、3(b)和 3(c)右侧分别是 A、B 两端的归一化接收信号频数分布直方图(此处使用 0~1 归一化对接收信号进行处理),其中,给定接收信号值的频数数值越大说明接收信号取该值的概率越大,因此,频数分布直方图能反映出接收信号的概率密度分布情况。观察各组数据的频数分布直方图可以发现,出现概率最高的接收信号均小于平均接收信号,而且,随着归一化接收信号起伏方差的增大,出现概率最高的接收信号逐渐偏离平均接收信号,说明信道中的湍流在不断增强。

微有所下降,但趋势并不明显。此外,图 5 中偏移较大的点主要是由于实际测量中光纤准直系统偏移偏差过大所导致的。

已知相关系数的理论值为 1,再结合图 5 中的数据,可以分别计算得到相关系数的相对误差与绝对误差随 A 端归一化接收信号起伏方差的变化规律,如图 6 所示(彩图见期刊电子版),其中蓝色的点和曲线代表绝对误差的数据和其拟合

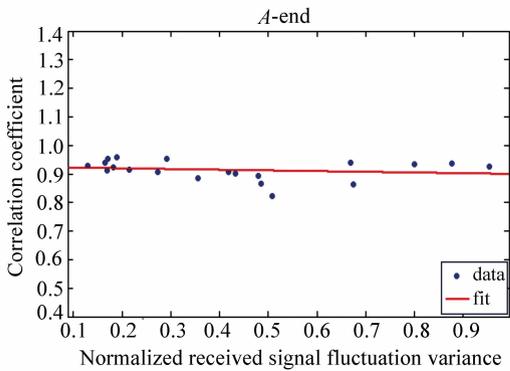


图 5 信号瞬时衰落相关系数随归一化接收信号起伏方差的变化趋势图

Fig. 5 Change of correlation coefficient of signal instantaneous fading with normalized received signal fluctuation variance

结果,红色的点和曲线代表相对误差数据和拟合结果。观察图 6 可以发现,在归一化接收信号起伏方差较小时,相关系数的测量值更加准确。而随着归一化接收信号起伏方差的增大,绝对误差与相关误差的差值略有增大但差值仍然很小,说明测量值准确度较之前有所下降但依旧较为准确。

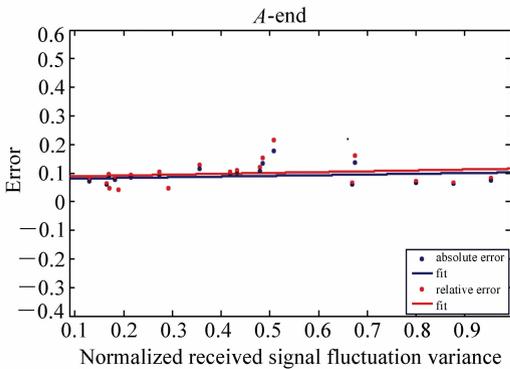


图 6 绝对误差和相对误差随归一化接收信号起伏方差的变化趋势图

Fig. 6 Change of absolute error and relative error with normalized received signal fluctuation variance

结合图 5 和图 6 中的数据 and 曲线分析可得:在归一化接收信号起伏方差较低时,信道瞬时衰落相关系数非常高且相关系数的相对误差与绝对误差也非常低,此时的测量非常准确,其中相关系数最高值可以达到 0.959,尽管相关系数会随着归一化接收信号起伏方差的增大而稍有下降,但

其仍然保持着较高值。由分析结果可知,虽然双向光信道瞬时衰落相关系数会受到归一化接收信号起伏方差的影响,但该影响有限,即在较高的归一化接收信号起伏方差下,大气湍流中两个方向的光信道瞬时衰落之间仍能保持良好的相关性。

理论上双向大气湍流光信道瞬时衰落相关系数可以达到 1,但经过多次实验发现,实际情况下相关系数最高只能达到 0.959,而且,绝大多数情况下一般处于 0.85 ~ 0.95 之间。这说明实际条件下仍存在一些因素对相关系数的测量产生干扰。由于实际条件有限,无法通过实验分析传输距离、发射孔径尺寸与接收孔径尺寸之比以及光学天线准直偏移差对双向大气湍流光信道瞬时衰落相关性的影响。在后续工作中,可通过改良双向光通信系统如精确光链路对准效果、寻找发射孔径尺寸与接收孔径尺寸最佳比值等使双向光信道之间的互易性更趋近于完美。此外,实验还发现虽然理论上通过将 $P(t)$ 和 ε 的比值保持在 10 000 以上可消除 ε 对实验结果的影响,但实际上, ε 对相关系数的测量仍然存在干扰,针对这一问题,也可以通过对接收功率的干扰进行进一步处理以增强互易性。

5 结 论

本文针对大气湍流的影响,采用共同横向空间模式耦合的收发一体式自由空间双向光传输系统,根据已有的双向大气湍流光信道瞬时衰落相关性理论,设计了双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性测量方法。在相距 883 m 的两栋高楼之间开展了野外双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性测量实验。实验结果表明:在弱湍流强度下,实验中两个方向的大气湍流光信道瞬时衰落相关系数大部分保持在 0.85 以上,其中最高可达 0.959。这说明两个方向的光信道瞬时衰落之间保持良好的相关性。由此证明,两个信道间存在良好的衰落互易性。此外,随着归一化接收信号起伏方差的增大,两个方向的光信道瞬时衰落相关系数有下降趋势,但不明显,即接收信号起伏程度对实际情况下相关性测量的影响有限。进一步证明,利用双向光信道瞬时衰落相关性来改善光

通信系统中自适应光学技术的应用以及将双向大气湍流光信道作为密钥提取技术中生成密钥的随机源等工作是切实可行的。

参考文献:

- [1] 付强,姜会林,王晓曼,等.空间激光通信研究现状及发展趋势[J].中国光学,2012,5(2):116-125.
FU Q,JIANG H L,WANG X M,*et al.*. Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*,2012,5(2):116-125. (in Chinese)
- [2] 吴从均,颜昌翔,高志良.空间激光通信发展概述[J].中国光学,2013,6(5):670-680.
WU C J,YAN CH X,GAO ZH L. Overview of space laser communications[J]. *Chinese Optics*,2013,6(5):670-680. (in Chinese)
- [3] 李一芒,高世杰,盛磊.近海激光通信分集技术对大气湍流扰动抑制的实验[J].红外与激光工程,2016,45(3):0322001.
LI Y M,GAO SH J,SHENG L. Experiment of restraint of atmospheric turbulence using diversity technology based on analysis of offshore laser communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2016,45(3):0322001. (in Chinese)
- [4] 王玉坤,贾娜,张锐.激光通信成像光斑处理方法研究[J].液晶与显示,2017,32(9):736-740.
WANG Y K,JIA N,ZHANG R. Laser communication spots imaging process method[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,2017,32(9):736-740. (in Chinese)
- [5] 车晓杰,梁忠诚,刘学明.室内MIMO可见光通信的接收特性[J].发光学报,2016,37(2):242-249.
CHE X J,LIANG ZH CH,LIU X M. Receiving characteristics of indoor MIMO visible light communication[J]. *Chinese Journal of Luminescence*,2016,37(2):242-249. (in Chinese)
- [6] 林宏,周朋超,王菲菲,等.用于光通信的高速响应有机电致发光器件[J].发光学报,2013,34(1):73-77.
LIN H,ZHOU P CH,WANG F F,*et al.*. Fast-response organic light-emitting devices for optical communication[J]. *Chinese Journal of Luminescence*,2013,34(1):73-77. (in Chinese)
- [7] 陈牧,柯熙政.大气湍流对激光通信系统性能的影响研究[J].红外与激光工程,2016,45(8):0822009.
CHEN M,KE X ZH. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2016,45(8):0822009. (in Chinese)
- [8] 柯熙政,张宇.部分相干光在大气湍流中的光强闪烁效应[J].光学学报,2015,35(1):0106001.
KE X ZH,ZHANG Y. Scintillation of partially coherent beam in atmospheric turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*,2015,35(1):0106001. (in Chinese)
- [9] 柯熙政,薛瑶.大气湍流尺度对部分相干光传输特性的影响[J].光子学报,2017,46(1):0101002.
KE X ZH,XUE Y. Effect on the partially coherent beam propagation properties in the atmospheric turbulence considering its scales[J]. *Acta Photonica Sinica*,2017,46(1):0101002. (in Chinese)
- [10] CHEN CH Y,YANG H M,TONG SH F,*et al.*. Mean-square angle-of-arrival difference between two counter-propagating spherical waves in the presence of atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*,2015,23(19):24657-24668.
- [11] YAO H F,NI X L,CHEN CH Y,*et al.*. Performance of M-PAM FSO communication systems in atmospheric turbulence based on APD detector[J]. *Optics Express*,2018,26(18):23819-23830.
- [12] 姚海峰,倪小龙,陈纯毅,等.基于脉冲激光在大气中传输的信道补偿[J].光学学报,2018,38(1):0101003.
YAO H F,NI X L,CHEN CH Y,*et al.*. Channel compensation based on pulse laser propagating in atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*,2018,38(1):0101003. (in Chinese)
- [13] 刘超,陈善球,廖周,等.自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正[J].光学精密工程,2014,22(10):2605-2610.
LIU CH,CHEN SH Q,LIAO ZH,*et al.*. Correction of atmospheric turbulence by adaptive optics in waveband of free-space coherent laser communication[J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,22(10):2605-2610. (in Chinese)
- [14] 赵海丽,姜会林,王晓曼,等.空间光通信中高帧频相机动态调光技术研究[J].液晶与显示,2012,27(2):267-270.

ZHAO H L,JIANG H L,WANG X M,*et al.* . Dynamic light-adjusting technology of high frame frequency CCD camera in space optical communication system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,2012,27(2):267-270. (in Chinese)

- [15] 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.
- [16] CHEN CH Y,YANG H M. Shared secret key generation from signal fading in a turbulent optical wireless channel using common-transverse-spatial-mode coupling[J]. *Optics Express*,2018,26(13):16422-16441.
- [17] 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.
- [18] PARENTI P 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.
- [19] GIGGENBACH D,COWLEY W,GRANT K,*et al.* . Experimental verification of the limits of optical channel intensity reciprocity[J]. *Applied Optics*,2012,51(16):3145-3152.
- [20] 陈纯毅,倪小龙,刘智,等. 大气光传输信道的闪烁与脉冲畸变测量研究[J]. *光学精密工程*,2016,24(10):330-337.

CHEN CH Y,NI X L,LIU ZH,*et al.* . Research on scintillation and pulse distortion measurement of atmospheric optical transmission channel[J]. *Opt. Precision Eng.*,2016,24(10):330-337. (in Chinese)

作者简介:



向磊(1996—),男,湖南衡阳人,硕士研究生,2017年于长春理工大学理学院获得学士学位,主要从事空间激光通信应用。E-mail:928663676@qq.com.cn



陈纯毅(1981—),男,重庆人,博士,教授,博士生导师,主要从事光传输建模与仿真等方面的研究。E-mail:chenchunyi@hotmail.com.cn