

非线性光谱展宽载波的湍流信道高速传输特性

王天枢^{1,2}, 张莹^{1,2}, 于策^{1,2}, 董芳^{1,3}, 马万卓^{1,2}, 刘显著^{1,2}

(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, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学光电工程学院, 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: 采用非线性光谱展宽光源作为高重复频率部分相干光载波光源, 开展大气湍流信道中高速信息传输实验研究。通过皮秒光纤激光器泵浦高非线性光纤获得非线性光谱展宽的部分相干光载波光源, 重复频率可达 10 GHz。采用 10 Gbit/s 脉冲高速数字调制, 通过模拟大气湍流信道传输, 相干光载波和部分相干光载波在湍流信道传输前后的信噪比分别从 16.83 dB 和 11.83 dB 降低至 4.31 dB 和 5.64 dB。在温度差 $\Delta T=230^{\circ}\text{C}$ 的模拟大气湍流通道中, 当误码率为 3.8×10^{-3} 时, 部分相干光载波链路灵敏度达到 -27.8 dBm , 与相干光载波相比, 灵敏度提高了 1.6 dB。

关键词: 非线性光谱展宽; 高速传输; 部分相干光; 大气湍流

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021014

High-speed transmission characteristics of nonlinear spectral broadening carrier in turbulent channel

WANG Tianshu^{1,2}, ZHANG Ying^{1,2}, YU Ce^{1,2}, DONG Fang^{1,3}, MA Wanzhuo^{1,2}, LIU Xianzhu^{1,2}

1. National and Local Joint Engineering Research Center 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

3. College of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

Abstract: The nonlinear spectral broadening light source was used as a partially coherent carrier source with high repetition frequency to carry out experimental research on high-speed information transmission in atmospheric turbulence channels. A partially coherent beams source with nonlinear spectral broadening was obtained by pumping a highly nonlinear fiber with a picosecond fiber laser, and the repetition frequency could reach 10 GHz. The 10 Gbit/s pulse high-speed digital modulation was used and transmitted through a simulated atmospheric turbulence channel, the signal-to-noise ratio of the coherent optical carrier and partially coherent optical carrier before and after the turbulent channel transmission is reduced from 16.83 dB and 11.83 dB to 4.31 dB and 5.64 dB, respectively. In the simulated atmospheric turbulence channel at $\Delta T=230^{\circ}\text{C}$, when the bit error rate is 3.8×10^{-3} , the sensitivity of partially coherent optical carrier links reaches -27.8 dBm , which is 1.6 dB higher than that of coherent optical carriers.

Keywords: nonlinear spectral broadening, high-speed transmission, partially coherent beam, atmospheric turbulence

1 引言

无线激光通信与微波通信相比, 调制速率更高, 频带更宽, 且不占用频谱资源; 与光纤通信相比, 具有施工周期短、成本低、安装灵活等优点^[1-2]。

然而, 无线光通信的最大缺点是受大气信道影响比较严重, 导致功率衰减、光束漂移、光束扩展和光强闪烁等问题。

长期以来, 由于大气湍流的影响, 长距离自由空间光通信发展遇到了障碍。理论分析和数值模拟

收稿日期: 2020-09-10; 修回日期: 2020-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61975021, No.61905022)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61975021, No.61905022)

等方面的许多研究表明,部分相干光束受湍流的影响小于相干光束。Salem 等^[3]从理论上证明了湍流环境传输的部分相干光束与相干光束相比具有优势。Shirai 等^[4]首先验证了湍流对部分相干光束的影响小于相干光束。Liu 等^[5]证明,在大气湍流通道中,相干性较低的高斯谢尔模型光束与相干性较高的光束相比,其漂移和变形较小。产生部分相干光的方法很多,主要包括扩展光源、空间光调制器及旋转随机相位屏等。Deschamps 等^[6]使用扩展光源发出的非相干光生成部分相干光。Dogariu 等^[7]使用旋转随机相位屏实验生成了部分相干源。Shirai 等^[8]提出液晶空间光调制器,对激光束的相位和幅度进行调制,控制入射光束的相干性并生成部分相干光。Xiao 等^[9]提出了一种使用由不同长度的光纤组成的光纤阵列来产生部分相干光的方法,光纤阵列是用于部分相干光生成的相对简单的方法。但是,以上方法产生的部分相干光调制速率较低,很难突破 Gbit/s 量级,难以获得高速空间光通信的应用。

采用超快光纤激光激发的超连续谱是一种稳定的部分相干光源,作为光通信载波源,其不仅可以利用部分相干特性抑制大气湍流的干扰,而且由于高重复频率特点,还可以实现对光源的高速调制。Zhang 等^[10]报道了采用超连续谱部分相干光源载波的大气高速传输实验,速率在 4 Gbit/s 条件下,闪烁因子降低了 30%。然而,该部分相干光源的最高重复频率仅为 4 GHz,无法实现高速调制。基于光谱的非线性展宽相比于超连续谱,不仅可以保证光源的部分相干性,而且脉冲能量还能更高。

本文介绍了一种高速部分相干光源载波的大气激光信息传输方法,采用 10 GHz 高重复频率皮秒光纤激光激发 800 m 长高非线性光纤,获得 10 GHz 重复频率的非线性光谱展宽,实现了 10 Gbit/s 的高速调制。在模拟大气湍流信道中,实验研究了单通道闪烁因子、眼图、信噪比和误码率等传输特性。

2 实验结构

部分相干光理论以光场的统计特性为基础。设 r_1 、 r_2 为光场中任意两点,则两点间的空间-时间光场可以用互相干函数来描述,即

$$\Gamma(r_1, r_2, \tau) = \langle U(r_1, t + \tau) U^*(r_2, t) \rangle \quad (1)$$

其中, $\langle \rangle$ 表示求平均, $*$ 表示复共轭, $U(r_1, t + \tau)$ 和 $U(r_2, t)$ 分别表示 $t + \tau$ 时刻和 t 时刻的复变光场。

归一化的互相干函数被称为复相干度,即

$$\mu(r_1, r_2, \tau) = \frac{\Gamma(r_1, r_2, \tau)}{\sqrt{\Gamma(r_1, r_1, \tau)} \sqrt{\Gamma(r_2, r_2, \tau)}} = \frac{\Gamma(r_1, r_2, \tau)}{\sqrt{I(r_1)} \sqrt{I(r_2)}} \quad (2)$$

其中, $I(r_1)$ 和 $I(r_2)$ 分别为 r_1 和 r_2 处的平均光强; $\Gamma(r_1, r_2, \tau)$ 为互相干函数。当 $|\mu(r_1, r_2, \tau)| = 1$ 时,光束为完全相干光;当 $|\mu(r_1, r_2, \tau)| = 0$ 时,光束为完全非相干光;当 $0 < |\mu(r_1, r_2, \tau)| < 1$ 时,光束为部分相干光。复相干度描述了光场的空间-时间域相干性,其空间相干性用 $\mu(r_1, r_2, 0)$ 描述^[11]。

部分相干光载波和相干光载波在大气湍流中的传输对比如图 1 所示。基于非线性光谱展宽,部分相干光载波在大气湍流中传输时,由于本身的多色性,即便受到大气吸收或散射的影响,不同于单一频率的传输,多波长传输时总会有一部分到达接收端。由于受到大气湍流的影响,相干光载波在大气湍流中传输时会发生不同方向的折射,只有少部分到达接收端^[12]。

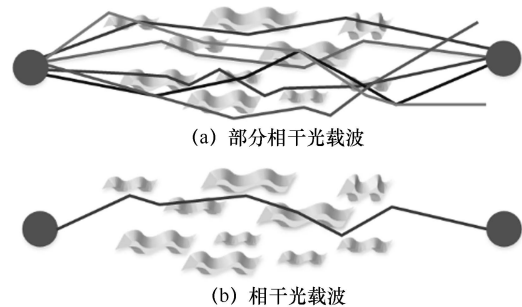
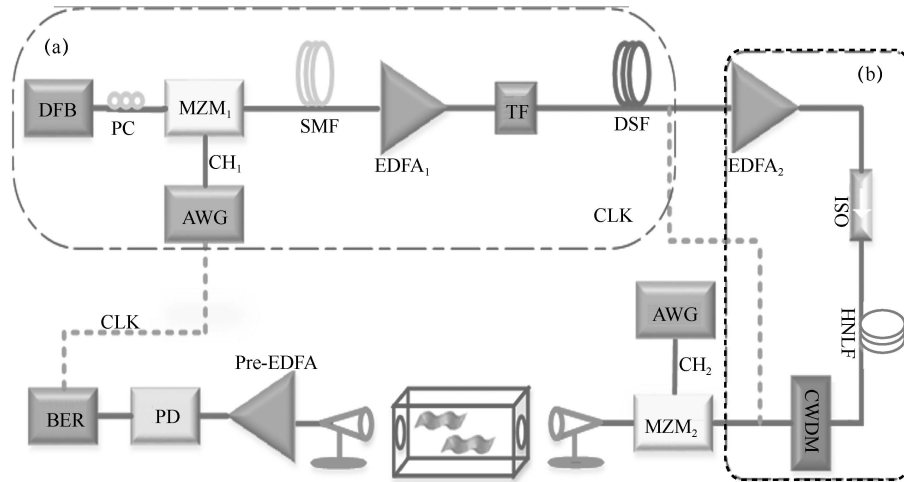


图 1 部分相干光载波和相干光载波在大气湍流中的传输对比

非线性光谱展宽载波的空间传输实验结构如图 2(a)所示,实验中将 1 550 nm 分布式反馈 (DFB, distributed feedback) 半导体激光器作为种子光源,通过偏振控制器 (PC, polarization controller) 调整光束偏振状态,采用马赫-曾德尔电光调制器 (MZM, Mach-Zehnder modulator) 1 将光源调制成重复频率为 10 GHz 的脉冲光,调制信号由任意波形发生器 (AWG, arbitrary waveform generator) Keysight M8195A 的通道 1 产生。为了获得功率较高的非线性光谱展宽,首先对脉冲进行压缩,使脉冲获得更高的峰值功率。脉冲压缩系统中,利用 8 km 单模光纤 (SMF, single mode fiber) 补偿光纤中的正啁啾,可将脉冲宽度从 38 ps 压缩至 23 ps。压缩后的窄脉冲注入掺铒光纤放大器 (EDFA, erbium-doped fiber amplifier) 1 放大,输出峰值功率为 23 dBm,再利用可调谐滤波器 (TF, tunable filter)



ISO: 隔离器; PD: 光电探测器; BERT: 误码率测试仪; CLK: 相干光链路
图 2 基于光谱非线性展宽的高重复率部分相干光束在模拟大气中的传输

来滤除放大器中的自发辐射噪声。将放大后的脉冲注入 3 km 色散位移光纤 (DSF, dispersion-shifted fiber), 利用高阶孤子效应, 将脉冲宽度从 23 ps 进一步压缩至 8.4 ps^[13]。

如图 2(b)所示, 通过另一个掺铒光纤放大器 (EDFA₂) 将峰值功率脉冲平均功率放大到 27 dBm 后, 再泵浦 800 m 高非线性光纤 (HNLF, highly nonlinear fiber) 获得非线性光谱展宽。文献[10]表明, 由于泵浦光为相干光源, 故距泵浦波长较远的光谱相干度较低。实验中, 采用粗波分复用器 (CWDMM, coarse wavelength division multiplexer) 过滤出 1 560~1 580 nm 范围内的展宽光谱 (20 nm), 作为高速载波光源。

AWG 通道 2 产生的 10 Gbit/s 二进制伪随机序列通过另一个马赫-曾德尔电光调制器 (MZM₂) 对载波光源进行数字调制, 高重频脉冲激光的调制与高速数字调制采用时钟同步, 以实现较好的调制效果。高速调制激光通过一对光学准直器在大气湍流模拟信道中进行传输, 接收端采用低噪声前置放大器来补偿信道损耗和耦合损耗引起的功率衰减, 通过高速光电探测器进行信号检测, 并通过误码分析仪检测误码率。

大气湍流模拟系统利用热空气对流原理建立, 为中弱大气湍流模拟系统, 与基于空间光调制器和旋转相位板模拟的大气湍流相比, 该系统属于物理环境模拟, 更接近真实湍流环境, 具有结构简单、易于控制的优点。如图 3 所示, 大气湍流模拟系统包括一个模拟大气箱和一个自动控制器。该大气湍流模拟系统可以通过调整大气的相干长度参数来

模拟湍流变化, 以模拟弱湍流和强湍流。相干长度参数是利用热对流原理调节的, 大气箱内部上面板为冷却板, 下面板为加热板, 控制器控制两面板的温度差来实现空气对流。

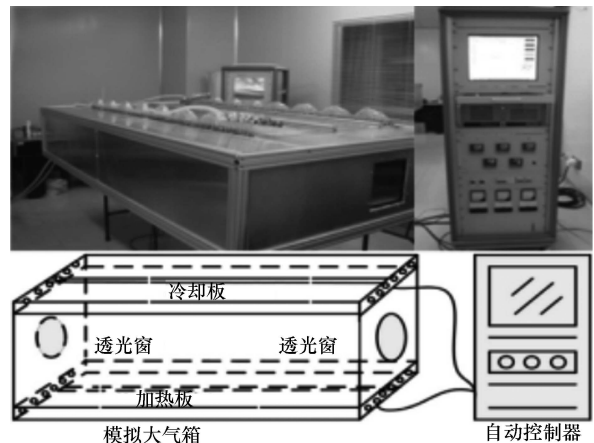


图 3 大气湍流模拟系统

模拟大气箱上的冷热板可通过循环水保持稳定的室温。底板上有 3 个相同的加热板, 箱体内的温度逐渐升高。冷却板和加热板的长度和宽度分别为 2 m 和 1 m, 它们之间的间距为 0.35 m。加热板和冷却板均可通过自动控制器进行控制。箱体内部有一些温度检测器, 用于实时测量湍流模拟系统的温度。自动控制器可以通过检测器适当改变模拟大气箱的温度, 以形成闭环控制过程。模拟大气箱的每一侧都有 2 个窗口, 可以用作模拟大气通道的输入和输出端口^[14-15]。

相干长度(r_0)是描述湍流强度的参数, 当湍流强度增加时, 相干长度减小。通过在不同的 ΔT 条件下测量 r_0 可知, $r_0 = 48\Delta T^{-0.81}$ 。高速电荷耦合器件

通过式(3)测量闪烁因子。

$$\sigma^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad (3)$$

其中, σ^2 表示闪烁指数, I 表示瞬时光强度^[16]。

通过减小湍流区域和外部区域之间的温度差 (ΔT), 温度缓冲区域在湍流区域周围以保持湍流稳定。大气湍流强度可以通过 ΔT 来调节。模拟系统的折射率结构常数范围为 $10^{-17} \sim 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, 在弱湍流条件 (接近 $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$) 下, 1 550 nm 非调制激光的闪烁因子分别为 0.012 3、0.005 42 和 0.002 17, 分别对应于 ΔT 的 230°C、150°C 和 80°C^[17]。使用公式 $\sigma^2 = 1.24 k_0^7 c_n^2 z^{11/6}$, 等效传输距离大约为 1 km, 其中, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是波数, c_n 是大气折射率结构常数。

3 结果及分析

图 4(a)为 10 GHz 的高重频脉冲序列, 脉冲间隔为 100 ps, 这意味着在强度调制下, 最高传输速率可以达到 10 Gbit/s。通过光谱分析仪观测到的光谱非线性展宽如图 4(b)所示, 并通过 20 nm 光谱滤波获得光谱非线性展宽载波光源。

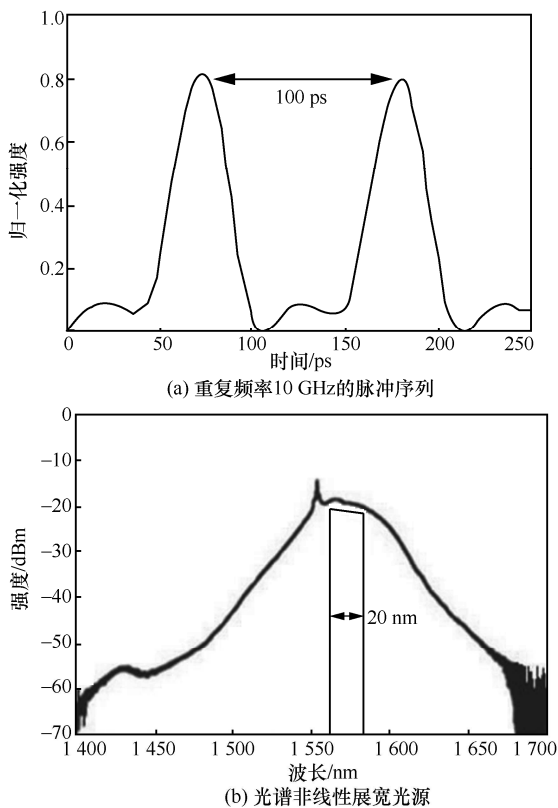


图 4 重复频率 10 GHz 的脉冲序列及光谱非线性展宽光源

当上下面板温差 $\Delta T = 230^\circ\text{C}$ 时, 相干光载波和部分相干光载波的闪烁因子如图 5 所示, 平均值分别为 0.014 4 和 0.009 61。显然, 与相干光载波相比, 光谱非线性展宽光源载波可以减少由大气湍流引起的闪烁, 从而减少由大气湍流引起的功率波动。

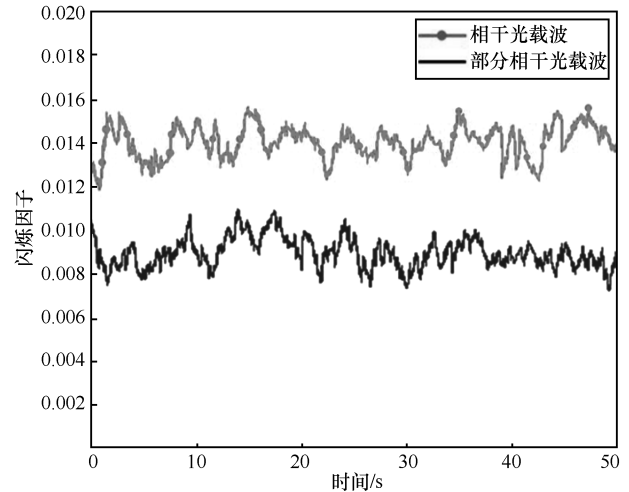


图 5 相干光载波和部分相干光载波的闪烁因子

实验中, 相干光源和光谱非线性展宽光源的传输速率均为 10 Gbit/s, 经过湍流信道前后的信号眼图及信噪比如图 6 所示。如图 6(a)和图 6(c)所示, 对载波光源进行数字调制后的背靠背信噪比分别为 16.83 dB 和 11.83 dB, 相干光载波的信噪比高于部分相干光载波。然而, 通过 $\Delta T = 230^\circ\text{C}$ 模拟大气湍流通道后, 如图 6(b)和图 6(d)所示, 相干光载波和光谱非线性展宽光载波的信噪比分别从 16.83 dB 和 11.83 dB 降低至 4.31 dB 和 5.64 dB, 分别恶化了 12.52 dB 和 6.19 dB, 显然大气湍流对光谱非线性展宽载波光源通信链路的影响较小。

如图 7 所示, 在不同湍流强度下部分相干光载波和相干光载波的单通道 10 Gbit/s 传输链路的误码率。当误码率为 3.8×10^{-3} 时, 10 Gbit/s 的部分相干光载波和相干光载波经 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ (无湍流条件下), 部分相干光载波和相干光载波接收灵敏度分别为 -30.9 dBm 和 -32.3 dBm 。这表明, 在无湍流条件下, 部分相干光载波链路的灵敏度高于相干光链路, 因为部分相干光载波较低信噪比导致灵敏度较低。经 $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ 大气湍流模拟装置后的接收灵敏度分别为 -30 dBm 和 -29.5 dBm ; 经 $\Delta T = 150^\circ\text{C}$ 大气湍流模拟装置后部分相干光载波和相干光载波接收灵敏度分别为 -29.2 dBm 和 -28.2 dBm ; 经 $\Delta T = 230^\circ\text{C}$ 大气湍流模拟装置后, 部分相干光载波

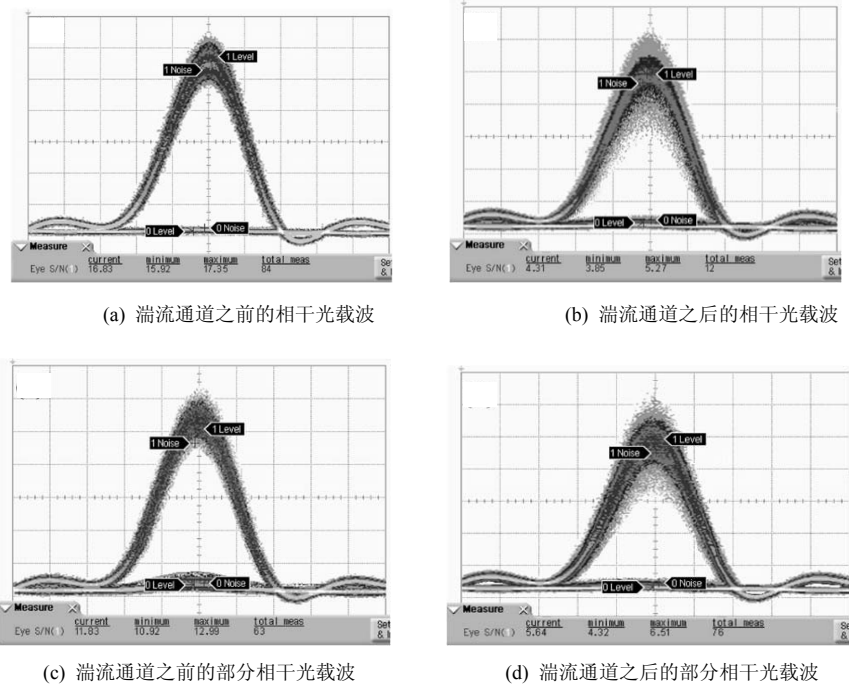


图 6 湍流通道 ($\Delta T = 230^\circ\text{C}$) 前后的相干光载波和部分相干光载波的眼图和信噪比

和相干光载波接收灵敏度分别为 -27.8 dBm 和 -26.2 dBm 。在通过大气湍流之后，部分相干光载波链路的灵敏度高于相干光载波链路，可见，部分相干光载波具有更好抑制大气湍流影响的能力。

波的湍流前后的信噪比，经湍流通道后，信噪比分别恶化了 12.52 dB 和 6.19 dB ，在 $\Delta T = 230^\circ\text{C}$ 的模拟大气湍流通道中，部分相干光载波链路灵敏度提高了 1.6 dB 。实验验证了部分相干光载波在大气湍流中实现高速调制传输的可行性。

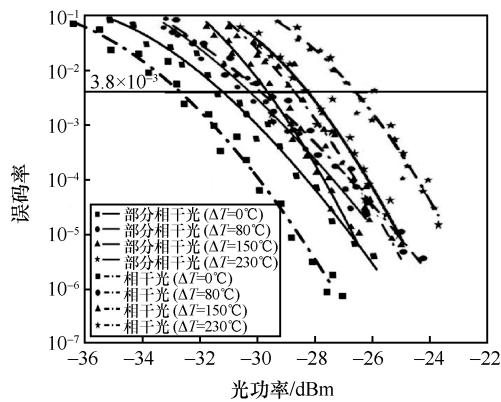


图 7 基于部分光谱非线性展宽部分相干光和相干光在不同湍流强度下的 10 Gbit/s 传输链路的误码率

4 结束语

本文提出了基于非线性光谱展宽的高重复频率部分相干光载波光源的产生。将部分相干光载波光源的重复频率从 4 GHz 提高到 10 GHz ，实现了在模拟大气湍流通道中的部分相干光光载波单通道 10 Gbit/s 传输，并研究了其模拟大气通道中的传输特性。实验对比了相干光载波和部分相干光载

参考文献:

- [1] CHAN V W S. Free-space optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4750-4762.
- [2] KEDAR D, AMON S. Urban optical wireless communication networks: the main challenges and possible solutions[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(5): 2-7.
- [3] SALEM M, SHIRAI T, DOGARIU A, et al. Long-distance propagation partially coherent beams through atmospheric turbulence[J]. Optics Communications, 2003, 216(4): 261-265.
- [4] SHIRAI T, DOGARIU A, WOLF E, et al. Directionality of Gaussian Schell-model beams propagating in atmospheric turbulence[J]. Optics Letters, 2003, 28(8): 610-612.
- [5] LIU X, WANG F, WEI C, et al. Experimental study of turbulence-induced beam wander and deformation of a partially coherent beam[J]. Optics Letters, 2014, 39 (11): 3336-3339.
- [6] DESCHAMPS J, COURJON D, BULABOIS J, et al. Gaussian Schell-model sources: an example and some perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, 73(3): 256-261.
- [7] DOGARIU A, AMARANDE S. Propagation of partially coherent beams: turbulence-induced degradation[J]. Optics Letters. 2003, 28(1): 10-12.
- [8] SHIRAI T, KOROTKOVA O, WOLF E, et al. A method of generating

electromagnetic Gaussian Schell-model beams[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2005, 7(5): 232-237.

- [9] XIAO X, VOELZ D. Analysis and simulation of a fiber bundle method for creating a partially spatially coherent beam[J]. Applied Optics, 2013, 52(23): 5794-5802.
- [10] ZHANG X, WANG T, CHEN J, et al. Scintillation index reducing based on wide-spectral mode-locking fiber laser carriers in a simulated atmospheric turbulent channel[J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3421-3424.
- [11] ANATILY E. Effects of residual coherence on the scintillation of a partially coherent beam [J]. Optics Express, 2019, 27(19): 26874-26881.
- [12] SUCHIT A, VIJAYA R. Temporal coherence of a low-power erbium-doped fiber laser with spectrally broadened output[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2017, 34(6): 1004.
- [13] MURPHY T E. 10-GHz 1.3-ps pulse generation using chirped soliton compression in a Raman gain medium[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(10): 1424-1426.
- [14] HENRIKSSON M. Scintillation index measurement using time-correlated single-photon counting laser radar[J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 1-8.
- [15] LIU X, WANG T, ZHANG X, et al. 128Gbit/s free-space laser transmission performance in a simulated atmosphere channel with adjusted turbulence[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10 (2): 1-10.
- [16] 朱锦顺, 马啸. 户外无线光通信中湍流信道下的分组马尔可夫叠加传输研究[J]. 通信学报, 2017, 38(7): 1-10.
- ZHU J S, MA X. Block Markov superposition transmission over turbulence channels in outdoor optical wireless communication[J]. Journal on Communications, 2017, 38(7): 1-10.
- [17] CHEN J, WANG T, ZHANG X, et al. Free-space transmission system in a tunable simulated atmospheric turbulence channel using a high-repetition-rate broadband fiber laser[J]. Applied Optics, 2019, 58(10): 2635-2640.

[作者简介]



王天枢（1975-），男，吉林长春人，博士，长春理工大学教授，主要研究方向为高速空间激光通信、光纤通信技术、超快激光技术等。



张莹（1995-），女，吉林长春人，长春理工大学硕士生，主要研究方向为空间激光通信技术。



于策（1994-），男，吉林长春人，长春理工大学硕士生，主要研究方向为空间激光通信技术。



董芳（1995-），男，山东淄博人，长春理工大学硕士生，主要研究方向为光纤通信技术。



马万卓（1989-），男，吉林长春人，博士，长春理工大学讲师，主要研究方向为光纤通信技术、超快激光技术、全光信号处理等。



刘显著（1989-），男，吉林长春人，博士，长春理工大学讲师，主要研究方向为空间激光通信技术等。

《通信学报》第十届编辑委员会

顾问： 邬江兴 刘韵洁 方滨兴 于全 郑建华 何友

尹浩 陆建华 沈学民 王怀民 王金龙

主任委员：张平

副主任委员：张延川 马建峰 杨震

沈连丰 陶小峰 刘华鲁

委员：

丁群 王汝言 王良民 龙军 卢建民 田辉 田有亮

田俊峰 朱洪波 仲红 任保全 刘西蒙 许文俊 李俨

李少谦 李风华 李玉峰 李建东 李陶深 杨亮 吴怡

吴巍 吴启晖 吴晓平 沙学军 沈玉龙 宋令阳 宋铁成

张士兵 张云勇 张玉清 张钦宇 张朝阳 陈巍 陈山枝

陈后金 范九伦 林金朝 欧阳缮 易东山 周一青 周武旻

周亮 桂冠 贾焰 夏银水 袁东风 钱志鸿 倪国新

徐立中 郭庆 郭磊 郭渊博 黄韬 黄建伟 黄梦醒

崔琪楣 隆克平 普园媛 裴庆祺 谭晓衡

Shuguang Cui (美国) Yi Qian (美国) Shiping He (美国)

Jiangzhou Wang (英国) Wen Tong (加拿大)

收录声明

本刊对发表的文章,拥有出版电子版、网络版版权,并拥有和其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬中已经包含上述费用。

Journal on Communications has the copyright to publish electronic edition, online edition of the published articles, and has the right to exchange information with other sites. The expenses have been included in the fee paid by editorial department.

道德声明

本刊发表的论文是作者独立取得的原创性研究成果,无一稿多投;论文内容不涉及国家机密;未曾以任何形式用任何文种在国内外公开发表过;论文内容不侵犯他人著作权和其他权利。若发生一稿多投、侵权、泄密等问题,论文作者将承担全部责任。

The authors of *Journal on Communications* guarantee that their submitted articles are original and contain nothing confidential. The said article is only submitted to *Journal on Communications*. The said article has not been published before and has not been submitted elsewhere for print or electronic publication consideration. The said article is no way whatever a violation or an infringement of any existing copyright or license from the third party. Otherwise, the authors of the said article shall take the blame for the violation or infringement of the related copyright and the leakage of secrets.

通信学报

Journal on Communications



发行代号：
国内2-676
国外M395

2021年1月25日出版 定价：98.00元

ISSN 1000-436X



9 771000 436212