

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 双通道加密自由空间光通信系统

王国庆, 闵锐, 李兴泉, 张海平, 赵方, 邵理阳, 沈平

#### 引用本文:

王国庆, 闵锐, 李兴泉, 等. 双通道加密自由空间光通信系统[J]. 光电工程, 2024, 51(9): 240106.

Wang G Q, Min R, Li X Q, et al. Dual channel encrypted free-space optical communication system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(9): 240106.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240106>

收稿日期: 2024-05-08; 修改日期: 2024-08-08; 录用日期: 2024-08-09

### 相关论文

#### 逆向调制无线光通信空间分集分析

王珂, 徐智勇, 李雪松, 汪井源, 李建华, 赵继勇, 韦毅梅, 吴传信  
光电工程 2020, 47(3): 190701 doi: 10.12086/oe.2020.190701

#### 预编码室内MIMO可见光通信系统空间相关性分析

张颖, 高悦, 柯熙政  
光电工程 2020, 47(3): 190666 doi: 10.12086/oe.2020.190666

#### 无线光通信系统捕获、瞄准和跟踪研究进展

梁静远, 陈瑞东, 姚海峰, 白勃, 曹明华, 赵黎, 王怡, 邓佳新  
光电工程 2022, 49(8): 210439 doi: 10.12086/oe.2022.210439

#### 基于OFDM的大气激光通信湍流抑制关键技术研究

郭倩, 宋鹏, 张周强, 周阿维, 屈萍鸽  
光电工程 2020, 47(3): 190619 doi: 10.12086/oe.2020.190619

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240106

CSTR: 32245.14.oe.2024.240106

## 双通道加密自由空间光通信系统

王国庆<sup>1\*</sup>, 闵锐<sup>2</sup>, 李兴泉<sup>1</sup>, 张海平<sup>1</sup>, 赵方<sup>3</sup>,  
邵理阳<sup>3</sup>, 沈平<sup>3</sup>

<sup>1</sup>深圳信息职业技术学院微电子学院, 广东深圳 518172;

<sup>2</sup>北京师范大学珠海校区认知神经科学与学习国家重点实验室

认知神经工效研究中心, 广东珠海 519087;

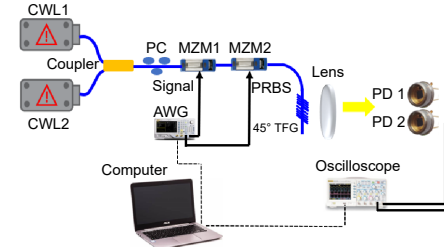
<sup>3</sup>南方科技大学电子与电气工程系, 广东深圳 518055

**摘要:** 本文提出了一种基于压缩感知和倾斜光纤光栅的双通道加密自由空间光通信系统, 不仅可以大量减少数据采集量, 还可以对自由空间传输的数据进行加密, 提高了系统的安全性。此外, 我们的方案可以采用低带宽和低成本的光电探测器和模数转换器, 降低了数据采集量和数据通信的成本。同时, 本方案采用了一种倾斜角度为 45° 的倾斜光纤光栅同时作为空间光发射器、空间光侧面衍射器件和偏振敏感器件, 加强了系统的集成度, 降低了系统体积, 同时提高了系统的能量利用效率。经实验表明, 利用频率为 1 GHz 和 3 GHz 的正弦射频信号进行 3.9 m 的数据传输, 在时域和频域的数据压缩比为 16% 和 8%。

**关键词:** 衍射光栅; 自由空间光通信; 调制; 光学安全和加密

**中图分类号:** O438

**文献标志码:** A



王国庆, 闵锐, 李兴泉, 等. 双通道加密自由空间光通信系统[J]. 光电工程, 2024, 51(9): 240106

Wang G Q, Min R, Li X Q, et al. Dual channel encrypted free-space optical communication system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(9): 240106

## Dual channel encrypted free-space optical communication system

Wang Guoqing<sup>1\*</sup>, Min Rui<sup>2</sup>, Li Xingquan<sup>1</sup>, Zhang Haiping<sup>1</sup>, Zhao Fang<sup>3</sup>, Shao Liyang<sup>3</sup>,  
Shen Ping<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Microelectronics, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen, Guangdong 518172, China;

<sup>2</sup>Center for Cognition and Neuroergonomics, State Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Learning, Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai, Guangdong 519087, China;

<sup>3</sup>Department of Electronic and Electrical Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China

**Abstract:** A dual channel encrypted free-space optical communication system based on compressive sensing and tilted fiber grating is proposed. This approach not only greatly reduces the data acquisition volume, but also enhances the security of the system since the data transmitted in the free-space is encrypted. Besides, our

收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-08-08; 录用日期: 2024-08-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFE0140400); 广东省科技计划项目 (2021A0505080002)

\*通信作者: 王国庆, wangggq@szit.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

proposal adopts low-bandwidth and low-cost photodetectors and analog-to-digital converters, decreasing the data acquisition volume and the cost of data transmission. Also, the approach utilizes the tilted fiber grating with a 45° tilted angle as the free-space light emitter, free-space light lateral diffraction device, and polarization-sensitive device, simultaneously. The utilization of 45° tilted fiber grating greatly enhances the systematic integration, reduces the volume of the system and improves the energy efficiency of the system. A demonstration shows that two 1 GHz and 3 GHz sinusoidal signals are employed for the 3.9 m free-space data transmission with data compression ratios of 16% and 8% achieved both in the time domain and frequency domain.

**Keywords:** diffraction gratings; free-space optical communication; modulation; optical security and encryption

## 1 引言

高速自由空间光 (FSO) 通信技术和高速传感网络技术以及物联网的快速发展正在逐步优化稳定、安全且低成本的新一代 FSO 通信系统。FSO 通信由于其点对点数据传输的特性而具有信道加密的特性<sup>[1-2]</sup>, 近几十年来引起了人们的广泛研究和关注。FSO 通信具有抗电磁干扰、物理安全性高、方向性好、成本低和载波带宽大等优点, 是室内通信和 underwater 通信的理想对象<sup>[3-6]</sup>。

就频谱而言, FSO 通信可分为可见光 FSO 通信和红外光 FSO 通信<sup>[7]</sup>。可见光 FSO 通信因具有低成本的优势被广泛应用。然而, 发光二极管 (LED) 的使用限制了它的高速数据传输 (通常低于 Gbps), 且其光束发散特性和强度波动大的缺陷制约了它的进一步应用。与之相对的是, 红外光 FSO 通信具有物理安全性高、稳定性高、高速、易实现、带宽大、频谱宽等优点, 在 FSO 通信的应用中极其广泛。此外, 红外光 FSO 通信采用的高速调制器、激光器和光电探测器 (PD) 等器件与传统的通信器件是兼容的, 具有易于实现且成本低廉的优势, 有着极其广泛而全面的应用。

与采用全向 LED 基于发散特性的可见光 FSO 通信相比, 红外光 FSO 通信采用了红外激光的光束控制方式<sup>[8]</sup>。在红外光 FSO 通信系统中, 为了跟踪移动目标且覆盖较大面积, 通常需要激光光束转向装置进行光束扫描控制。光束扫描控制的实现方式有主动扫描和被动扫描两种解决方案<sup>[9]</sup>。传统的机械式主动光束扫描控制方案以其成本低、扫描角度范围大、分辨率高、易于制造等优点得到了广泛的应用, 但转向速度低和体积大的缺陷制约了其发展。因此, 具有体积小、无机械活动部件、速度快等优点的被动光束扫描控制得到了广泛的研究和应用<sup>[10]</sup>。例如, 衍射光栅作

为被动光束扫描控制器件已成功应用于波长调谐和光学相控阵<sup>[11-12]</sup>。另外, 被动光束扫描控制器件的一个缺点是它们与光纤的耦合损耗高<sup>[13-14]</sup>。此外, 传统的 FSO 通信系统传输的信息没有经过加密, 仍然存在着被窃听的风险, 并且高速 FSO 通信数据量过大对后端接收器件造成了挑战。

克服被动光束扫描控制器件与光纤的耦合损耗高这一缺点的解决方案是采用基于光纤的被动光束扫描控制器件。该器件同时必须满足波长调谐速度快、体积小、成本低等要求。因此, 我们提出了一种采用倾斜角度为 45° 的倾斜光纤光栅 (45° TFG) 作为被动光束扫描控制器件的方案, 其具有高效、稳定、紧凑的优势<sup>[15-17]</sup>。45° TFG 已经被广泛应用于光纤信号传感<sup>[16]</sup>、超快光学成像<sup>[17-19]</sup>、FSO 通信<sup>[20]</sup>等领域。45° TFG 作为一种光纤侧面衍射光栅, 与光纤链路固有兼容, 消除了被动光束扫描控制器件和光纤链路之间的耦合损耗, 从而实现了高能量效率, 较大地降低了耦合损耗。45° TFG 的被动光束扫描控制是通过 45° TFG 的波长相关侧面衍射实现的, 该衍射是由其光纤芯内的强倾斜光栅结构产生的, 相关前期研究表明其可提供较高的衍射效率 (>93%)<sup>[15]</sup>。通过调节途经 45° TFG 的光信号波长, 进而实现被动光束扫描。相关前期研究报导了其作为被动光束扫描控制器件在高速无线光通信和高稳定性 FSO 通信系统的应用<sup>[1-2]</sup>。由于 45° TFG 的倾斜光栅结构破坏了光纤的圆对称性, 故而 45° TFG 具有偏振敏感特性。因此, 45° TFG 同时具有三种角色: 1) 作为具有光偏振敏感特性的光纤内偏振器; 2) 作为被动光束扫描控制器件实现了 FSO 被动光束扫描控制; 3) 作为侧面衍射的稳定性高、能量效率高的光纤紧凑型 FSO 发射器。因此, 作为高集成度的光纤器件, 45° TFG 在 FSO 通信系统中的应用可以较大的提高系统集成度和稳定性, 提高系统能量效率, 降低系统体积。

另外, 在高速 FSO 通信系统中, 同时存在着传输数据的保密性和数据规模过大的问题。因此, 我们提出了采用压缩感知 (CS) 的方法<sup>[21-29]</sup>, CS 是一种非常特殊的信号处理方法, 它基于原始信号在变换域 (如时域或频域) 具有可压缩性的特点, 可以对传输信号进行高效重构。通过采用 CS 的方式, 可以用较少的样本重构恢复出原始的稀疏信号。CS 已经成功应用于数字信号处理<sup>[21]</sup>, 单像素成像<sup>[22-25]</sup>, 射频信号测量<sup>[26]</sup>, 相干光层析成像<sup>[27-28]</sup>, 以及量子通信<sup>[29]</sup> 等。CS 方法的使用较大地降低了数据采集量。同时, 其采用的低带宽 PD 和低带宽数模转换器 (ADC) 可以显著地降低 FSO 通信系统的的天数据采集成本。在基于 CS 方法的 FSO 通信系统中, 被 PD 探测到的传输数据是在时域中由射频信号与伪随机二进制序列 (PRBS) 的混合而加密的数据。根据公钥密码理论, PRBS 可以作为公钥, CS 重建算法和 PRBS 的设置 (如周期或起点) 可以作为私钥<sup>[30]</sup>。与传统的 FSO 通信系统相比, 在数据传输前对数据进行加密, 较大地提高了通信系统的安全性。此外, CS 的使用缓解了数据规模过大的问题。因此, 可以利用低成本和低带宽的 PD 和低带宽的 ADC 来降低 FSO 通信系统的成本。

为了解决 FSO 通信系统中被动光束扫描控制器件与光纤链路的高耦合损耗问题、FSO 通信系统传输的信息未经加密问题以及高速 FSO 通信数据量过大的问题, 我们提出了采用 45° TFG 作为被动光束扫描控制器件以及采用 CS 方法来进行传输信息加密的同

时降低了数据采集量和数据采集成本。故而, 我们提出并实验演示了一种基于 CS 方法和 45° TFG 的加密 FSO 通信系统, 该系统具有安全、紧凑、高度稳定和高效的优点。在实验中采用了 1540 nm 和 1550 nm 两个红外波长的通道进行了验证, 利用频率为 1 GHz 和 3 GHz 的正弦射频信号作为原始信号进行加密 FSO 传输, 并获得了 16% 和 8% 的数据压缩比。本方案通过采用低成本的集成器件 45° TFG 和低带宽的 PD 和 ADC, 较大地提高了传统 FSO 通信系统的稳定性和安全性, 同时降低了 FSO 通信系统的成本。这种数据加密的 FSO 通信系统的概念在安全通信、室内和 underwater 数据通信等领域具有重要的实际意义和广阔的应用前景。

## 2 基本原理

与普通的光纤布拉格光栅 (FBG) 相比, 45° TFG 是一种特殊角度的倾斜光纤光栅, 光栅结构与光纤轴向的倾斜角度为 45°。45° TFG 的原理图如图 1 所示。图 1(a) 展示了当宽带光谱入射光通过 45° TFG 时, 其结构具有波长相关的侧面衍射特征。从图 1 中可以看出, 入射光至 45° TFG 后, 无后向反射光, 只有轴向传输光和侧面衍射光。相关的 45° TFG 的研究表明, 45° TFG 具有随波长变化的侧面衍射, 表征与波长相关的衍射角度变化的 45° TFG 的角度色散, 由文献 [15] 给出:

$$D = \frac{d\theta(\lambda)}{d\lambda} = \frac{\sin(2\theta)}{\lambda} = \frac{1}{\lambda},$$

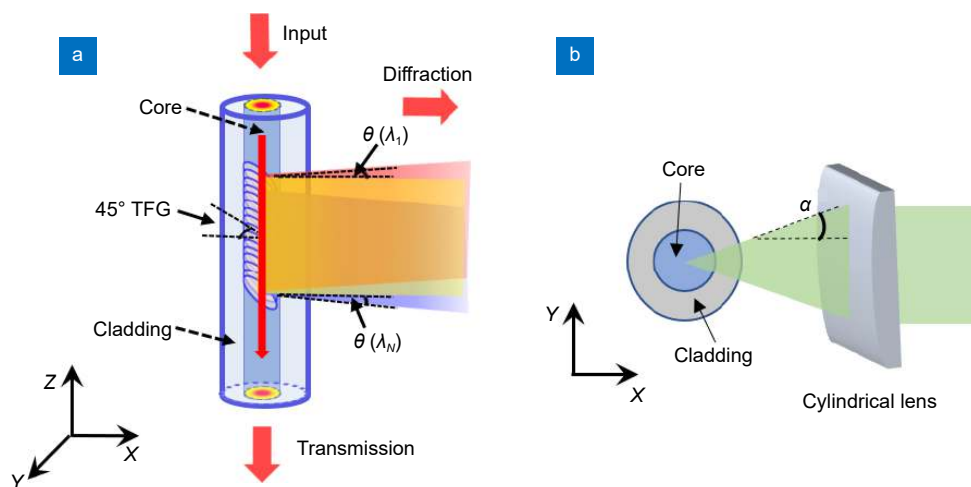


图 1 45° TFG 的原理图。(a) 45° TFG 侧面衍射结构图; (b) 径向发散输出特性

Fig. 1 Principle of a 45° TFG. (a) Structure of lateral diffraction from the 45° TFG; (b) Divergent output characteristics in radial plane

其中:  $\lambda$  为入射光的波长,  $\theta$  为倾斜光纤的倾斜角度。显然,  $45^\circ$  TFG 在相同波长范围内相比于其它角度的倾斜光纤光栅具有更大的光束角度覆盖范围, 即  $45^\circ$  的倾斜角度确保了给定光波长下的最大角度色散。例如, 当光波长为 1550 nm 时, 其角度色散的理论结果在纤芯中约为  $0.037^\circ/\text{nm}$ , 考虑到光纤纤芯到空气中的折射, 则  $45^\circ$  TFG 在自由空间的角度色散理论值为  $0.053^\circ/\text{nm}$ ,  $45^\circ$  TFG 在自由空间的角度色散的测量值为  $0.054^\circ/\text{nm}$ <sup>[15]</sup>, 可以看出,  $45^\circ$  TFG 在自由空间的角度色散的理论值与测量值非常相近。

图 1(b) 为其发散输出特性的径向平面视图, 即侧面衍射图。由于光纤所具有的圆柱形, 发出的光束在径向传输时产生发散现象。为了达到成像的目的, 需要在垂直 (Y) 方向采用一个柱面透镜来校准光束。

此外, 由于  $45^\circ$  TFG 的光纤纤芯的圆柱形对称结构被光栅的倾斜角度破坏, 即在光纤纤芯中产生圆柱形不对称, 倾斜角度为  $23.1^\circ \sim 66.9^\circ$  的倾斜光纤光栅能够将光从光纤纤芯经侧面衍射到自由空间。因此, 此类倾斜角度的倾斜光纤光栅具有极强的偏振敏感特性。另外,  $45^\circ$  TFG 具有一个独特的特征, 即“s 偏振光”可以自光纤纤芯经过光纤包层后侧面衍射进入自由空间和“p 偏振光”在光纤纤芯中进行轴向传输, 且几乎无传输损耗, 这使得  $45^\circ$  TFG 的偏振相关损耗 (PDL) 可以高达  $\sim 40 \text{ dB}$ <sup>[18]</sup>, 故而通过适当地控制入射光的偏振状态,  $45^\circ$  TFG 可以实现超过 93.5% 的侧面衍射效率<sup>[15]</sup>。由于这种特性, 可以将其作为集成度高的一种高效的侧面衍射光纤元件<sup>[15, 19-20]</sup> 和理想的光纤内偏振器, 并广泛地应用于在线光纤偏振器<sup>[31]</sup>。为了保证较高的衍射效率, 输入光束必须是线偏振光。

作为一种高效的侧面衍射光纤元件, 为制备长度为 10 mm, 周期为 748 nm 的  $45^\circ$  TFG, 可以采用标准扫描相位掩模技术, 使用 244 nm 的连续波长紫外光, 将  $45^\circ$  TFG 的周期结构直接写入标准通信单模光纤 (SMF-28)<sup>[32]</sup>。本文中采用的倾斜光栅的折射率调制深度为 0.0005。为了得到所需的  $45^\circ$  的倾斜光栅条纹, 需将相位掩模旋转  $33.3^\circ$ 。

### 3 实验及分析

双通道加密自由空间光通信原理图的原理图如图 2 所示。采用两个波长分别为 1540 nm 和 1550 nm、平均光功率均为 13 dBm 的连续波长激光器 (CWL) 作为激光源。两束来自 CWL 的激光 (波长分别为 1540 nm

和 1550 nm) 经过耦合器 (coupler) 耦合后进入偏振控制器 (PC), 此处的 PC 用于控制入射光的线偏振状态。波长分别为 1540 nm 和 1550 nm 的光载波的频谱如图 3 所示。1540 nm 和 1550 nm 的光载波的半峰全宽分别为 46.8 GHz, 47.5 GHz。当不考虑其它复用方式, 仅以 1540 nm 和 1550 nm 两个波长用于通信时, 其最大通信带宽为 94.3 GHz。然后光束通过马赫-泽德调制器 (MZM), 在此处光束被来自任意波形发生器 (AWG) 产生的一个中心频率分别为 1 GHz 和 3 GHz 叠加的正弦射频信号调制。被叠加的正弦射频信号调制后, 在图 2 中所示的 A 点时, 此时光信号的时域波形图如图 4(a) 所示。被叠加的正弦射频信号调制后的光束经过第二个 MZM, 此时采用 AWG 产生的 PRBSs 来调制经过第二个 MZM 的光束, 第二个 MZM 是压缩感知方案必备的一个步骤。被叠加的正弦射频信号调制和被 PRBSs 调制后, 在图 2 中所示的 B 点时, 此时光信号的时域波形图如图 4(b) 所示。这两个 MZM 均处于正交偏置点, 此时 MZM 的输出信号功率相对于调制信号的变化最敏感, 且线性度最好<sup>[33]</sup>。从 AWG 发出的叠加的正弦射频信号 (signal) 和 PRBS 同时被发送到计算机进行最终的数据处理。被调制的光束到达  $45^\circ$  TFG 经过侧面衍射进入自由空间进行 3.9 m 的自由空间数据传输。波长为 1540 nm 和 1550 nm 的光信号在入射  $45^\circ$  TFG 前分别具有 30.8 dB, 31.1 dB 的信噪比。此处的  $45^\circ$  TFG 有三个功能: 1) 作为稳定性高的光发射器, 将光束从光纤纤芯经过包层后侧面衍射至自由空间; 2) 作为光偏振敏感的光纤内偏振器, 实现高能量效率的偏振控制; 3) 作为侧面衍射器件, 由于其波长依赖特性, 可作为被动光束扫描控制器件实现被动光束扫描控制, 同时实现点对点的保密信道通信。 $45^\circ$  TFG 的使用可以较大地提高系统稳定性和能量效率, 降低系统体积, 提高系统集成度。

自由空间的传输细节如图 2 中的绿色方框所示。被调制后的光束经过  $45^\circ$  TFG 侧面衍射至自由空间后, 途经一个焦距为 20 mm 的圆柱形透镜 (CL), 此处的柱透镜用于在垂直方向准直光束。 $45^\circ$  TFG 同时作为光发射器、光纤内偏振器和侧面光衍射器件, 经过  $45^\circ$  TFG 侧面衍射后, 波长为 1540 nm 和 1550 nm 的光束作为两个通道进行不同方向的传输。在实验中, 由于空间限制, 采用一对银镜 (M1, M2) 来改变光束的方向, 从光束自  $45^\circ$  TFG 侧面衍射至自由空间到光

束被探测, 中间进行了 3.9 m 的自由空间数据传输。光束被银镜改变方向后, 进入一对焦距分别为 100 mm 和 25 mm 的平凸透镜 (L1, L2), 两个平凸透镜间隔为 125 mm。这一对平凸透镜被用来缩小光束尺寸, 以便后续的探测光束。波长相关的自由空间光束到达单模光纤准直器 (C1, C2), 其数值孔径为 0.49。两个带宽为 1 GHz 的光电探测器 (PD1, PD2) 用于探测来自单模光纤准直器的光束。一个具有可调谐带宽和采样率的示波器被用来显示待检测的波形。本实验中选用的带宽和采样率分别为 1 GHz、4 GS/s。最后, 利用示波器存储的波形数据和 AWG 的 PRBS 数据, 利用 CS 算法恢复射频信号 (signal)。

假设一维正弦射频信号  $S_{M \times 1}$  的长度为  $M$  (即  $M$  个数据)。正弦射频信号  $S_{M \times 1}$  混合了来自 AWG 的  $N$  个 PRBS 片段,  $N$  是测量的次数 ( $N \ll M$ ), 每次测量的长度与  $S_{M \times 1}$  相同, 即  $M$  个数据。待测的正弦射频信号  $S_{M \times 1}$  被定义为

$$S_{M \times 1} = \Phi_{M \times M} \times P_{M \times 1}, \quad (1)$$

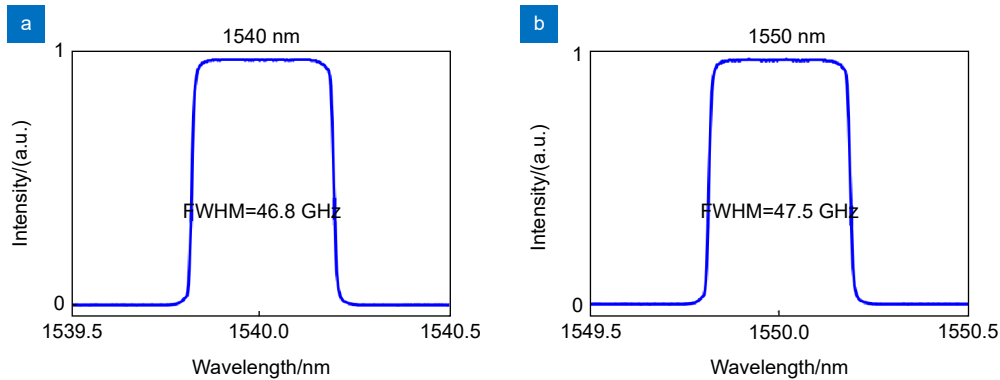


图 3 光载波的频谱图。(a) 1540 nm; (b) 1550 nm  
Fig. 3 Spectrum of the optical carrier. (a) 1540 nm; (b) 1550 nm

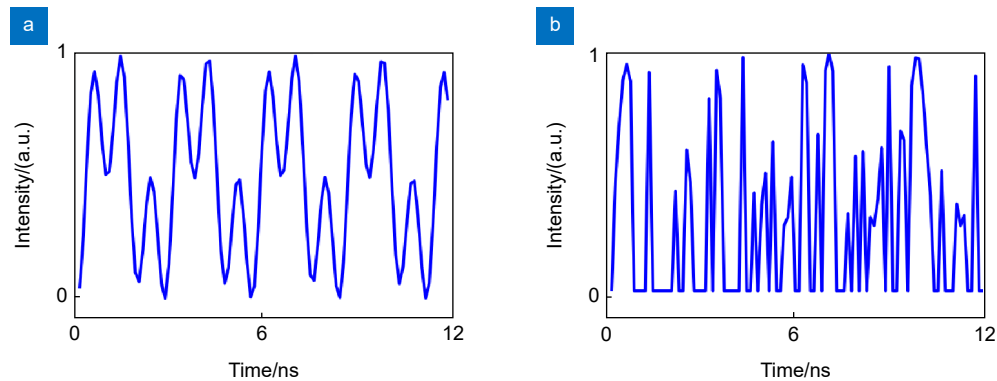


图 4 光信号的时域波形图。(a) A 点; (b) B 点  
Fig. 4 Temporal waveform of the optical signal. (a) Point A; (b) Point B

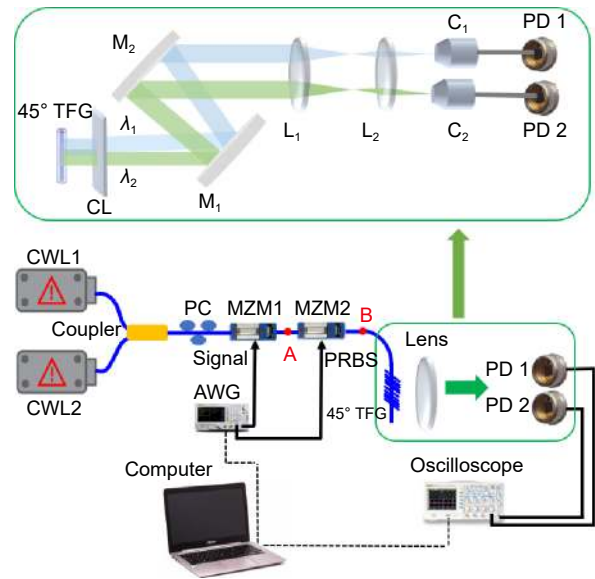


图 2 双通道加密自由空间光通信系统原理图  
Fig. 2 Schematic of the proposed dual channel encrypted FSO communication system

其中:  $\Phi_{M \times M}$  为傅里叶正交基函数矩阵, 它是一个大小为  $M \times M$  的数值矩阵; 矩阵  $P_{M \times 1}$  是正弦射频信号  $S_{M \times 1}$

的变换域, 它是一个大小为  $M \times 1$  的数值矩阵。一维正弦射频信号  $S_{M \times 1}$  在离散傅里叶变换 (DFT) 域必须服从稀疏性条件。测量矩阵  $R_{N \times M}$  表示对应 PRBS 片段长度的  $N$  次测量 (每个 PRBS 片段有  $M$  个数据)。则  $N$  次测量的测量结果矩阵  $Y_{N \times 1}$  表示为

$$Y_{N \times 1} = R_{N \times M} \times S_{M \times 1} = R_{N \times M} \times \Phi_{M \times M} \times P_{M \times 1} = \theta_{N \times M} \times P_{M \times 1}, \quad (2)$$

其中:  $\theta_{N \times M} = R_{N \times M} \times \Phi_{M \times M}$ , 为矩阵乘积, 它是一个大小为  $N \times M$  的数值矩阵。

基于凸优化的信号恢复过程是由测量结果矩阵  $Y_{N \times 1}$  重构待测正弦射频信号  $S_{M \times 1}$  的过程。测量结果矩阵  $Y_{N \times 1}$  是直接数据采集获取的测量数据, 测量矩阵  $R_{N \times M}$  (AWG 中的 PRBS 片段) 已经被计算机数据收集。测量结果矩阵  $Y_{N \times 1}$  和测量矩阵  $R_{N \times M}$  是 CS 程序算法中的输入量。因此, 采用基于最小  $l_1$  范数重构的总变分 (TV) 最小算法<sup>[30]</sup>, 可以实现  $P_{M \times 1}$  的优化, 即

$$P = \arg \min(TV_1) \quad \text{且} \quad \theta P = Y. \quad (3)$$

基于以上分析, 可以得到变换域矩阵  $P_{M \times 1}$ 。在  $S_{M \times 1} = \Phi_{M \times M} \times P_{M \times 1}$  的条件下, 最终重构出一维射频信

号  $S_{M \times 1}$ 。

为了验证提出的基于 CS 和  $45^\circ$  TFG 的双通道加密 FSO 通信系统, 我们演示了一个原理证明性实验。采用的待测射频信号为频率为 1 GHz 和 3 GHz 的正弦信号。使用波长分别为 1540 nm、1550 nm 的 2 个光载波段作为 2 个远程用户, 其分别代表不同的物理位置, 每个波长代表一个点对点加密通道。在本次 CS 实际算法中,  $M$  等于 400, 这意味着一段正弦射频信号有 400 个数据;  $N$  为测量次数, 分别为 64 次、32 次;  $Y_{N \times 1}$  为带宽为 1 GHz 的 PD 探测后采集的测量结果, 每次测量生成一个数据, 故而测量结果矩阵  $Y_{N \times 1}$  有  $N$  个数据。采用上述的基于最小  $l_1$  范数重构的 CS 算法, 在两种光载波段上分别实现了数据压缩比为 16%、8% 的重构信号 (最小压缩比定义为测量次数与信号长度的比例, 本文中, 信号长度 400, 测量次数分别为 64、32)。图 5 描述了原始射频信号 (1 GHz 和 3 GHz) 及其在时域和频域中数据压缩率分别为 16% 和 8% 的重构射频信号。时域和频域中的原始射频信号 (1 GHz 和 3 GHz) 分别如图 5(a)、

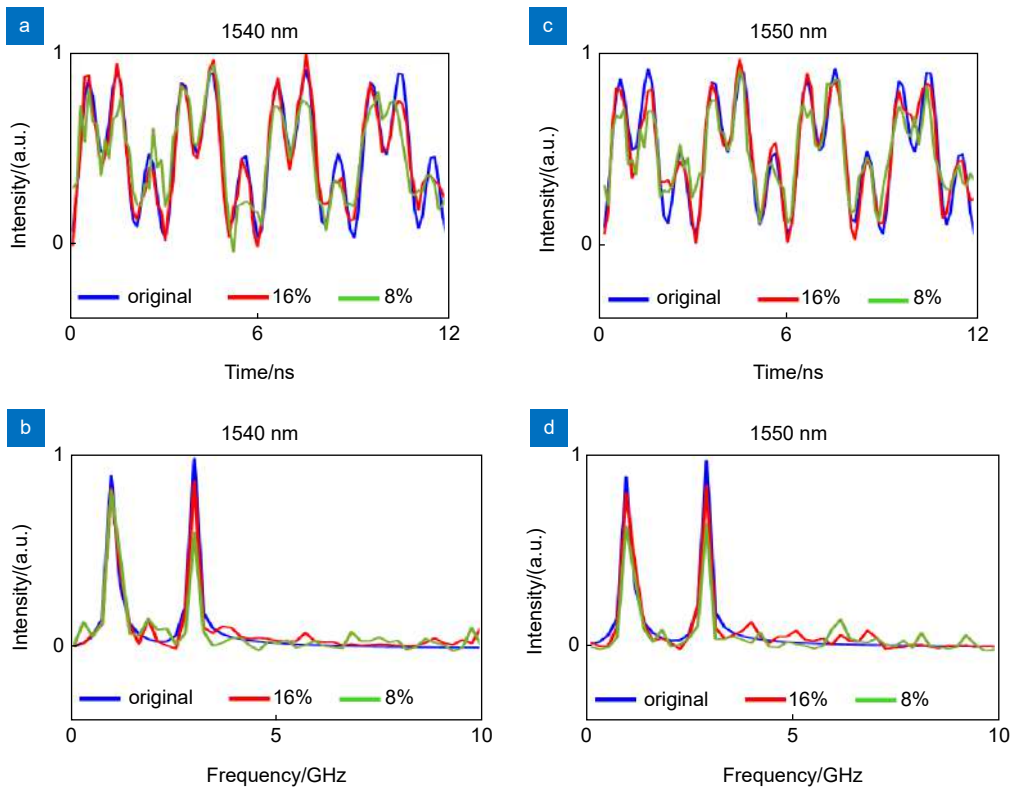


图 5 (a) 1540 nm 时域; (b) 1540 nm 频域; (c) 1550 nm 时域; (d) 1550 nm 频域的原始射频信号 (蓝线) 与数据压缩比为 16% (红线), 8% (绿线) 的重构射频信号结果图

Fig. 5 The original RF signals (blue lines) and their reconstruction results with data compression ratios of 16% (red lines) and 8% (green lines) in the 1540 nm temporal domain (a), and the 1540 nm spectral domain (b), and 1550 nm temporal domain (c), and 1550 nm spectral domain (d)

图 5(c) 的蓝线和图 5(b)、图 5(d) 的蓝线所示。1540 nm 通道的时域信号和频域信号的重构结果图如图 5(a)、图 5(b) 中的红线和绿线所示；1550 nm 通道的时域信号和频域信号的重构结果图如图 5(c)、图 5(d) 中的红线和绿线所示；在这里红线和绿线是数据压缩比分别为 16% 和 8% 的重构射频信号结果。从图 5 的结果可以看出，一定的数据压缩比的范围内，在测量的不同波长通道时，原始射频信号 (蓝线) 和重构射频信号 (红线和绿线) 在时域和频域均表现出良好的一致性。在数据压缩比为 8% 的情况下，重构射频信号仍然可以被识别，且重构射频信号与原始射频信号在时域和频域具有较高的一致性。

为了进一步验证提出的系统可以应用于不同类型信号的加密 FSO 通信系统，利用 1550 nm 波长作为光载波波长，采用随机射频信号 (PRBS 信号或者 OOK 信号) 作为原始射频信号。图 6 显示了时域上的原始随机射频信号以及在时域中数据压缩比分别为 30%、20% 和 10% 的重构射频信号。原始射频信号的时域如图 6(a) (蓝线) 所示。在时域中数据压缩比分别为 30%，20% 和 10% 的重构射频信号分别如

图 6(b) (红线)、图 6(c) (绿线) 和图 6(d) (黄线) 所示。从图 6 中的重构射频信号可以看出，不同压缩比的重构射频信号与原始射频信号在时域上具有很高的 consistency。在较低的数据压缩比 (10%) 的情况下，重构的射频信号与原始射频信号在时域上还原性较高、一致性高。图 5 和图 6 的实验结果成功地验证了本文提出的双通道加密 FSO 通信系统的有效性。

## 4 结 论

本文提出并实验证明了一种基于 CS 和 45° TFG 的双通道加密 FSO 通信系统。CS 方法的使用极大地降低了数据采集量，同时，其采用的低带宽 PD 和低带宽 ADC 可以显著地降低 FSO 通信系统的数据采集成本。采用的 45° TFG，具有集成度高、能量效率高、稳定性高，以及由于其与光纤耦合性好而产生的兼容性高、插入损耗低的优点。45° TFG 在文本中有三个功能：1) 作为具有光偏振敏感特性的光纤内偏振器，实现高能量效率的偏振控制；2) 作为具有侧面衍射特性的被动光束扫描控制器件，实现 FSO 被动光束扫描控制；3) 作为稳定性高、能量效率高的光发射器，将光束从光纤纤芯经过包层后侧面衍射至自由空间。

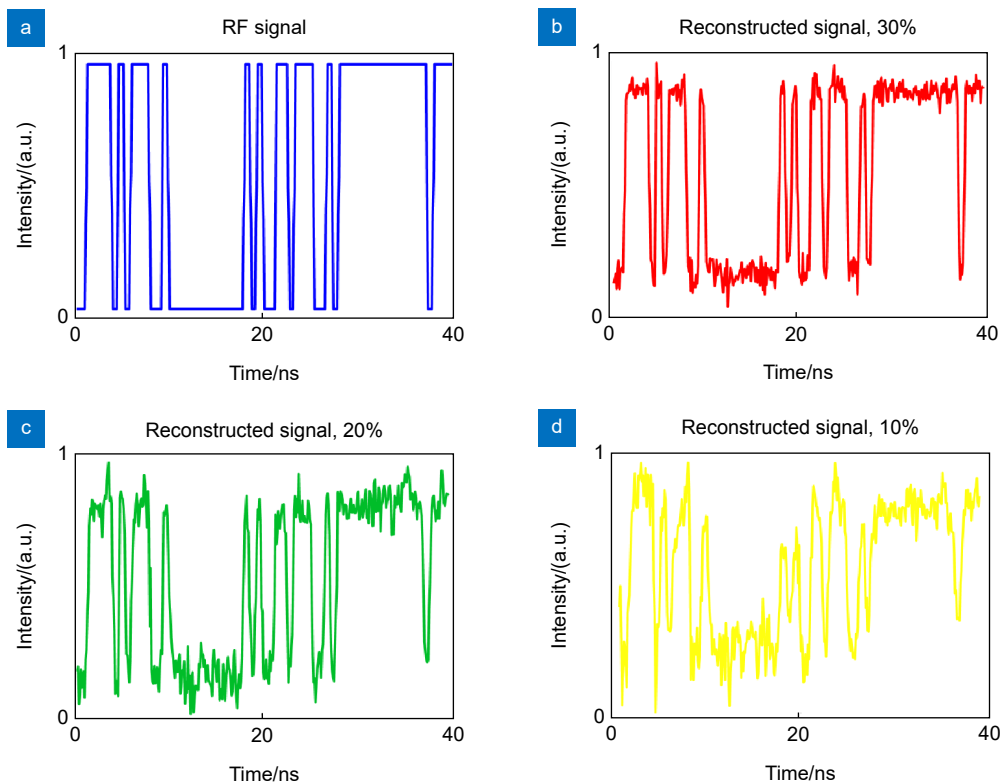


图 6 (a) 时域原始射频信号；在时域数据压缩比分别为 (b) 30%，(c) 20%，(d) 10% 的重构射频信号

Fig. 6 The input RF signal (a) and its reconstruction results with data compression ratios of 30% (b), 20% (c), and 10% (d) in the temporal domain



45° TFG 的使用可以较大地提高系统能量效率, 降低系统体积, 提高系统稳定性和集成度。本文实验中采用了一个频率分别为 1 GHz 和 3 GHz 叠加的正弦射频信号用于 3.9 m 的 FSO 加密数据传输。使用波长为 1540 nm、1550 nm 的两个光载波波长作为两个远程用户。实验结果表明, 该系统的数据压缩比分别为 16% 和 8%。重构射频信号与原始射频信号在时域和频域上均具有良好的一致性。此外, 采用随机射频信号 (PRBS 信号或者 OOK 信号) 进行 FSO 加密数据传输, 在时域上, 重构射频信号的数据压缩比分别达到 30%、20% 和 10%, 且重构射频信号和原始射频信号在时域上表现出很高的一致性。本方案为解决传统 FSO 通信系统的能量利用率和数据效率瓶颈奠定了基础。此外, 由于采用了 CS 的方法, 在自由空间传输的数据是加密的。因此, 该系统的安全性大大提高。本方案具有安全、稳定、节能、集成度高、数据高效等优点, 在室内和 underwater 数据通信安全方面具有广阔的应用前景。

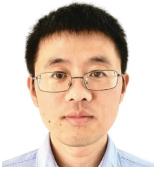
**利益冲突:** 沈平是期刊的编委, 除此之外, 所有作者声明无利益冲突。

## 参考文献

- [1] Wang G Q, Habib U, Yan Z J, et al. Highly efficient optical beam steering using an in-fiber diffraction grating for full duplex indoor optical wireless communication[J]. *J Lightw Technol*, 2018, **36**(19): 4618–4625.
- [2] Wang G Q, Shao L Y, Xiao D R, et al. Stable and highly efficient free-space optical wireless communication system based on polarization modulation and in-fiber diffraction[J]. *J Lightw Technol*, 2021, **39**(1): 83–90.
- [3] Wang K, Nirmalathas A, Lim C, et al. High-speed duplex optical wireless communication system for indoor personal area networks[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(24): 25199–25216.
- [4] Wang C, Yu H Y, Zhu Y J. A long distance underwater visible light communication system with single photon avalanche diode[J]. *IEEE Photonics J*, 2016, **8**(5): 7906311.
- [5] Wang B, Wu Q, Liu L Q, et al. Research progress on the underwater wireless optical communication system[J]. *Laser Technol*, 2022, **46**(1): 99–109.  
王博, 吴琼, 刘立奇, 等. 水下无线光通信系统研究进展[J]. *激光技术*, 2022, **46**(1): 99–109.
- [6] Hou D, Ren J W, Guo G K, et al. Progress on high-precision laser-based underwater frequency transfer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(2): 220149.  
侯冬, 任军委, 郭广坤, 等. 高精度水下激光频率传递研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(2): 220149.
- [7] Oh C W, Tangdionga E, Koonen A M J. Steerable pencil beams for multi-Gbps indoor optical wireless communication[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(18): 5427–5430.
- [8] Gomez A, Shi K, Quintana C, et al. Beyond 100-Gb/s indoor wide field-of-view optical wireless communications[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2015, **27**(4): 367–370.
- [9] Baba A A, Hashmi R M, Esselle K P, et al. A millimeter-wave antenna system for wideband 2-D beam steering[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2020, **68**(5): 3453–3464.
- [10] Wang G Q, Habib U, Wang C, et al. Wavelength-controlled beam steering for optical wireless transmission using an in-fiber diffraction grating[C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, CA, USA, 2017.
- [11] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. Nonmechanical laser beam steering based on polymer polarization gratings: design optimization and demonstration[J]. *J Lightw Technol*, 2015, **33**(10): 2068–2077.
- [12] Doylend J K, Heck M J R, Bovington J T, et al. Two-dimensional free-space beam steering with an optical phased array on silicon-on-insulator[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(22): 21595–21604.
- [13] Kang J S, Zhou Y P, Sun L R, et al. Design of alignment subsystem for laser wireless power transmission system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(7): 230109.  
康劲松, 周艳萍, 孙梁榕, 等. 激光无线电能传输系统对准环节设计[J]. *光电工程*, 2023, **50**(7): 230109.
- [14] Liang J Y, Chen R D, Yao H F, et al. Research progress of acquisition, pointing and tracking in optical wireless communication system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(8): 210439.  
梁静远, 陈瑞东, 姚海峰, 等. 无线光通信系统捕获、瞄准和跟踪研究进展[J]. *光电工程*, 2022, **49**(8): 210439.
- [15] Wang G Q, Wang C, Yan Z J, et al. Highly efficient spectrally encoded imaging using a 45° tilted fiber grating[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(11): 2398–2401.
- [16] Bandyopadhyay S, Shao L Y, Chao W, et al. Highly efficient free-space fiber coupler with 45° tilted fiber grating to access remotely placed optical fiber sensors[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(11): 16569–16578.
- [17] Wang G Q, Yan Z J, Yang L, et al. Improved resolution optical time stretch imaging based on high efficiency in-fiber diffraction[J]. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 600.
- [18] Wang G Q, Zhou Y, Zhao F, et al. A compact and highly efficient compressive sensing imaging system using in-fiber grating[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2023, **35**(4): 195–198.
- [19] Yan Z, Mou C, Zhou K, et al. UV-inscription, polarization-dependant loss characteristics and applications of 45° tilted fiber gratings[J]. *J Lightw Technol*, 2011, **29**(18): 2715–2724.
- [20] Wang G Q, Xiao D R, Shao L Y, et al. An undersampling communication system based on compressive sensing and in-fiber grating[J]. *IEEE Photonics J*, 2021, **13**(6): 7300507.
- [21] Jalali B, Asghari M H. The anamorphic stretch transform: putting the squeeze on 'Big data'[J]. *Opt Photonics News*, 2014, **25**(2): 24–31.
- [22] Wang G Q, Zhao F, Xiao D R, et al. Highly efficient single-pixel imaging system based on the STEAM structure[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(26): 43203–43211.
- [23] Shin J, Bosworth B T, Foster M A. Single-pixel imaging using compressed sensing and wavelength-dependent scattering[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(5): 886–889.
- [24] Guo Q, Chen H W, Weng Z L, et al. Compressive sensing based high-speed time-stretch optical microscopy for two-dimensional image acquisition[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(23): 29639–29646.
- [25] Wang G Q, Shao L Y, Liu Y B, et al. Low-cost compressive sensing imaging based on spectrum-encoded time-stretch structure[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(10): 14931–14940.
- [26] Valley G C, Seifler G A, Shaw T J. Compressive sensing of sparse radio frequency signals using optical mixing[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(22): 4675–4677.

- [27] Mididoddi C K, Bai F L, Wang G Q, et al. High-Throughput photonic time-stretch optical coherence tomography with data compression[J]. *IEEE Photonics J*, 2027, **9**(4): 3901015.
- [28] Mididoddi C K, Wang G Q, Wang C. Data compressed photonic time-stretch optical coherence tomography[C]//2016 *IEEE Photonics Conference*, Waikoloa, HI, USA, 2016: 13–14.
- [29] Rofrio C A, Gross D, Flammia S T, et al. Experimental quantum compressed sensing for a seven-qubit system[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**: 15305.
- [30] Tropp J A, Laska J N, Duarte M F, et al. Beyond Nyquist: efficient sampling of sparse bandlimited signals[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2010, **56**(1): 520–544.
- [31] Zhou K M, Simpson G, Chen X F, et al. High extinction ratio in-fiber polarizers based on 45° tilted fiber Bragg gratings[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(11): 1285–1287.
- [32] Zhao Y, Wang Q, Huang H. Characteristics and applications of tilted fiber Bragg gratings[J]. *J Optoelectron Adv Mater*, 2010, **12**(12): 2343–2354.
- [33] Ke X Z, Liang J Y, Xu D S, et al. Research progress of pulse position modulation technology in optical wireless communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(3): 210387. 柯熙政, 梁静远, 许东升, 等. 无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展[J]. *光电工程*, 2022, **49**(3): 210387.

## 作者简介



【通信作者】王国庆(1987-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为超快光通信、超快光学、光纤光学等, 中国光学学会(COS)会员, 美国光学学会(OPTICA)终身会员, 国际光学工程学会(SPIE)终身会员, IEEE会员, IEEE光子学会会员, 发表SCI、EI等科研学术文章50余篇。

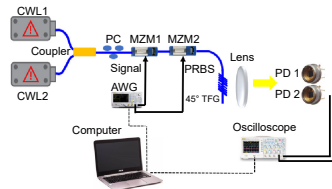
E-mail: [wangqq@szit.edu.cn](mailto:wangqq@szit.edu.cn)



扫描二维码, 获取PDF全文

# Dual channel encrypted free-space optical communication system

Wang Guoqing<sup>1\*</sup>, Min Rui<sup>2</sup>, Li Xingquan<sup>1</sup>, Zhang Haiping<sup>1</sup>, Zhao Fang<sup>3</sup>,  
Shao Liyang<sup>3</sup>, Shen Ping<sup>3</sup>



Schematic of the proposed dual channel encrypted FSO communication system

**Overview:** To achieve a data-efficient and high-efficiency free-space optical communication system, a dual channel encrypted free-space optical communication system based on compressive sensing and 45° tilted fiber grating is proposed. The utilization of compressive sensing not only greatly reduces the data acquisition volume, and mitigates the big data problem in the high throughput transmission system, but also enhances the security of the system thanks to the data transmitted in the free-space being encrypted. Besides, the application of compressive sensing also allows the employment of low-bandwidth and low-cost photodetectors and analog-to-digital converters in the high-speed optical communication system, which decreases the data acquisition volume and the cost of data transmission. What's more, the 45° tilted fiber grating has the benefits of high-efficiency, high stability, compactness, and low insert loss thanks to its feature of compatibility with fiber links. In the proposed optical communication system, the 45° tilted fiber grating acts as the key role of (a) lateral light emitter thanks to its special radiative structure, which allows incident light to radiate from the fiber core into free-space via the fiber cladding, (b) high efficient in-fiber polarizer due to its polarization-sensitive feature and thus obtaining polarization control, and (c) high-efficiency in-fiber diffraction grating resulting from its wavelength-dependent lateral diffraction characteristic, which realizes a point-to-point privacy channel for secure data transmission. The employment of 45° tilted fiber grating drastically augments the stability, efficiency, and integration of the system, and decreases the volume of the system. A demonstration of a 3.9 m dual channel encrypted free-space optical communication system is performed using an original sinusoidal RF signal with a frequency of 1 GHz and 3 GHz. A PD with a bandwidth of 1 GHz is utilized to detect the final received signal. The two optical carriers with wavelengths of 1540 nm and 1550 nm are employed to act as the remote two users. In the proposed system, the experimental results give the compression ratios of 16% and 8%, respectively. Also, the reconstructed RF signals and the original RF signal show good consistency whether in the spectral domain or in the temporal domain in varied wavelength carriers and varied compression ratios. Besides, a random RF signal with varied frequency components is utilized for free-space optical communication and data compression ratios of 30%, 20%, and 10% are obtained in the temporal domain. The reconstructed dual channel RF signals and random RF signals and their original RF signals have good consistency both in the temporal domain and the spectral domain. The employment of compressive sensing and 45° tilted fiber grating in the proposed system paves the way for overcoming the data efficiency, energy efficiency and compact issues in the traditional optical communication system. The proposal has the benefits of being compact, stable, secure, efficient, and data-efficient, which is particularly promising in underwater and secured indoor data communication.

Wang G Q, Min R, Li X Q, et al. Dual channel encrypted free-space optical communication system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(9): 240106; DOI: [10.12086/oe.2024.240106](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240106)

Foundation item: Project supported by National Key R&D Program of China (2022YFE0140400), and Department of Science and Technology of Guangdong Province (2021A0505080002)

<sup>1</sup>School of Microelectronics, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen, Guangdong 518172, China; <sup>2</sup>Center for Cognition and Neuroergonomics, State Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Learning, Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai, Guangdong 519087, China; <sup>3</sup>Department of Electronic and Electrical Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China

\* E-mail: wanggq@sziiit.edu.cn