

## W 波段 PS-PAM8 信号在太赫兹空芯光纤中的有线传输

丁俊杰<sup>1,2\*</sup>, 王演祎<sup>1,2</sup>, 张教<sup>3</sup>, 朱敏<sup>3</sup>, 石艺尉<sup>1</sup>, 何猛辉<sup>1</sup>, 赵峰<sup>4</sup>, 余建军<sup>1,2</sup><sup>1</sup>复旦大学通信科学与工程系电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433;<sup>2</sup>复旦大学上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200433;<sup>3</sup>网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111;<sup>4</sup>西安邮电大学, 陕西 西安 710121

**摘要** 在光子辅助的 W 波段通信系统中, 利用概率整形技术, 实验验证了概率整形的八进制脉冲幅度调制 (PS-PAM8) 信号在太赫兹空芯光纤中的有线传输。采用包络检测的方案, 在 97~105 GHz 的 W 波段上成功实现了 5.75 GBaud 的 PS-PAM8 信号在 1 m 空芯光纤上的传输。实验中的净传输速率可达 13.63 Gbit/s, 满足  $2.4 \times 10^{-2}$  的 20% 开销的软判决前向纠错码阈值。该实验结果证明了 THz 空芯光纤作为一种新型的 W 波段高速传输介质的潜力。

**关键词** 光通信; 脉冲幅度调制; 概率整形; 光载无线; 空芯光纤

中图分类号 TN928

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2406003

## Wired Transmission of PS-PAM8 Signal at W-Band over Terahertz Hollow-Core Fiber

Ding Junjie<sup>1,2\*</sup>, Wang Yanyi<sup>1,2</sup>, Zhang Jiao<sup>3</sup>, Zhu Min<sup>3</sup>,  
Shi Yiwei<sup>1</sup>, He Menghui<sup>1</sup>, Zhao Feng<sup>4</sup>, Yu Jianjun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of EMW Information, Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute for Advanced Communication & Data Science, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>3</sup>Purple Mountain Laboratories, Nanjing, Jiangsu 211111, China;

<sup>4</sup>Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China

**Abstract** We experimentally verified the wired transmission of the probabilistically shaped 8-level pulse amplitude modulation (PS-PAM8) signal over terahertz hollow-core fibers in a photonic-aided W-band communication system by using the probabilistic shaping technology. Via the envelope detection scheme, we carried out the transmission of the 5.75-GBaud PS-PAM8 signal over 1-m hollow-core fibers at the W-band from 97 GHz to 105 GHz. The net transmission rate in the experiment reaches 13.63 Gbit/s, which is within the soft-decision forward error correction threshold of  $2.4 \times 10^{-2}$  with a 20% overhead. The experimental results prove the potentiality of THz hollow-core fibers to be a new high-speed W-band transmission medium.

**Key words** optical communications; pulse amplitude modulation; probabilistic shaping; radio-over-fiber; hollow-core fiber

**OCIS codes** 060.4080; 060.5625; 060.4510

收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-06-23; 录用日期: 2021-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(61527801, 61675048, 61720106015)

通信作者: \*18110720017@fudan.edu.cn

# 1 引言

W 波段(75~110 GHz)或更高的频段,凭借其丰富的带宽资源,可以满足光纤无线融合通信系统大容量传输的需求,引起了越来越多的关注。在无线链路中传输 W 波段信号的光纤无线融合系统已被广泛报道<sup>[1-5]</sup>。其中,光子辅助的毫米波信号产生方法可以实现在高频段、宽带宽上的高速大容量通信,同时具备低损耗和低相位噪声等优点,有效解决了电子设备的带宽限制和电磁干扰问题<sup>[6-13]</sup>,验证了高达 400 Gbit/s 的 W 波段信号传输<sup>[14]</sup>。但是,点对点视线传输的限制以及由发散传播造成的高损耗都是无线链路的缺点。

太赫兹(THz)空芯光纤作为一种新型的高效传输介质,主要由中空基板以及沉积在中空基板内壁上的具有高反射率的金属层组成<sup>[15-19]</sup>。对于有线传输介质,同轴电缆能够支持高速电信号,但是传输损耗很高。而 THz 空芯光纤在从可见光到远红外甚至 THz 的宽波长范围内均具有低损耗特性<sup>[15-16]</sup>。THz 空芯光纤的包层结构可以将毫米波信号很好地限制在空芯中,因此,THz 空芯光纤的低损耗窗口在某种程度上类似于空气空间<sup>[3]</sup>。当 THz 空芯光纤的内径远大于毫米波波长时,空芯光纤会导致多模传输。但是,如果 THz 空芯光纤的内径较小,则毫米波信号会在光纤的内壁上反射并衰减,高阶模式的能量将迅速损失,大多数的输出能量保持在基模上。因此,内径小的 THz 空芯光纤可以支持单模传输,但衰减较大。

本课题组在之前的工作中已经通过实验验证了 W 波段的 128 Gbit/s 双极化 16 进制正交调幅(DP-16QAM)信号在空分复用的两个并行跨度为 1.5 m 的电介质涂覆金属空芯光纤(DMHF)上的传输<sup>[3]</sup>。本文实现了在 W 波段上超 100 Gbit/s 的空芯光纤有线传输。

由于数字信号处理(DSP)的低复杂度和低功耗,脉冲幅度调制(PAM)被认为是强度调制直接检测(IM/DD)通信系统中实现高速传输的低成本解决方案<sup>[20-24]</sup>。考虑到光电器件的带宽限制和非线性损伤,将概率整形(PS)技术与高阶 PAM 格式相结合,可以有效地缓解信号受到光电器件的非线性影响,并且可以灵活地调整传输速率,以提高通信系统容量<sup>[25-26]</sup>。对毫米波信号的检测可分为外差相干检测和包络检测。尽管外差相干检测可以实现更高的传输速率,但是其成本高,系统结构复杂,且需要恢

复频偏。而包络检测作为一种配置简单、易于实现的方案,可以满足降低系统成本的需求。

在本文中,发射端采用光子辅助的方案生成 W 波段信号,将 PS 技术与 PAM 相结合以提升通信容量,同时将 THz 空芯光纤用作有线传输媒介,接收端采用包络检波器恢复基带信号,低成本、低功耗、配置简单的 W 波段有线传输系统得以实现。本文成功验证了 97~105 GHz 的 W 波段频率上的 5.75 GBaud PS-PAM8 信号在 1 m 的 THz 空芯光纤上的可靠传输,在 20%开销的软判决前向纠错码(SD-FEC)阈值下实现了 13.63 Gbit/s 的传输净速率。

## 2 系统原理

### 2.1 PS-PAM8 信号的产生

本文将 PS 技术应用于 PAM 格式中,使得每个星座点的概率分布服从 Maxwell-Boltzmann 分布,即

$$P_X(x_i) = \frac{1}{\sum_{k=1}^M \exp(-vx_k^2)} \exp(-vx_i^2), \quad (1)$$

式中: $v$  是缩放因子,用于调整概率整形的深度; $x_k$  为第  $k$  个 PAM 符号。本文采用文献[27]中提出的概率幅度整形(PAS)方案来生成 PS-PAM8 符号。图 1 为产生 PS-PAM8 信号的系统框图。首先,将原始比特流分为两个分支。上面分支的比特流进入固定成分分布匹配器(CCDM)模块,用于映射,根据给定的概率整形深度获得在映射的 4 个脉冲幅度上满足 Maxwell-Boltzmann 分布的符号序列。对下面分支的比特流不做任何处理,其被用作折叠索引比特序列的一部分。随后,将在分布匹配器之后获得的不同概率的符号转换成比特序列并且将其与来自另一分支的原始比特序列组合在一起,使组合序列进入低密度奇偶校验(LDPC)编码器,进行编码,在编码器之后可以获得等概率分布的奇偶校验比特序列。奇偶校验比特序列与之前未进入分布匹配器的原始比特序列组合在一起,被用作折叠索引比特序列,以提供符号映射的对称性。同时,将从分布匹配器得到的 4 种不同概率的符号序列转换成幅度比特序列。将折叠索引比特序列和幅度比特序列进行重组和符号映射,将其映射为具有 Maxwell-Boltzmann 分布的 PS-PAM8 符号序列。产生的 PS-PAM8 信号的信息熵是 2.87 bit/symbol。图 1 给出了它各个星座点的概率分布。

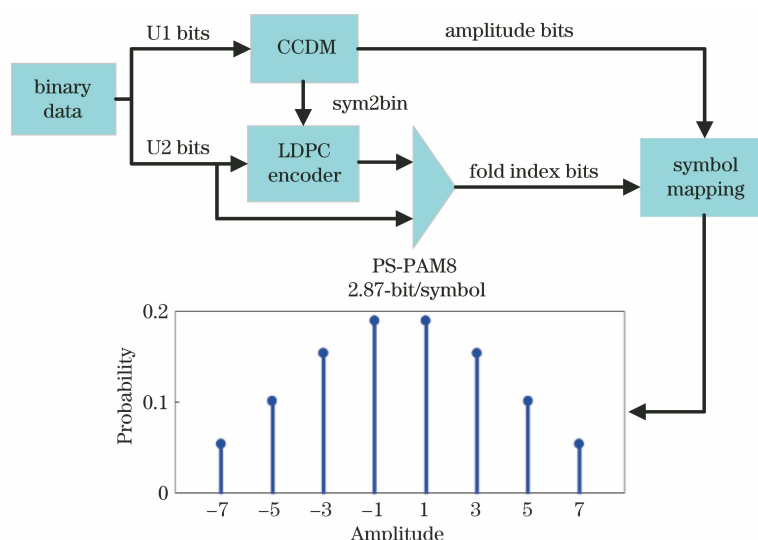


图 1 生成 PS-PAM8 信号的系统框图

Fig. 1 Block diagram of PS-PAM8 signal generation

同时,PS-PAM8 每符号的理论传输速率  $R$  可表示为

$$R = H - m \cdot (1 - r), \quad (2)$$

式中: $H$  是信息熵; $m$  是每个 PAM 符号的比特数; $r$  是前向纠错码(FEC)的码率。当 FEC 的码率为  $5/6$ (开销为 20%)时,计算出的 PS-PAM8 每符号的传输速率为 2.37 bit/s。

## 2.2 实验装置

图 2 显示了在光子辅助的 W 波段无线通信系统中,在 1 m 的 THz 空芯光纤中传输 PS-PAM8 信号的实验装置图。其中,两个具有 100 kHz 线宽的可调谐外腔激光器(ECL)被用作光载波源,输出的光功率都为 8 dBm。两束激光由保偏光耦合器(PM-OC)耦合,它们之间的频率间隔范围被设置为 97~105 GHz。采样率为 92 GSa/s 的任意波形发生器(AWG)产生的基带电信号经过电放大器(EA)的放大,然后被馈送到带宽为 30 GHz 的马赫-曾德尔调制器(MZM)中。接着,调制后的光信号经过掺

铒光纤放大器(EDFA)的放大以补偿调制器的插入损耗,在发射端利用可调谐光衰减器(VOA)调节进入光电探测器(PD)的输入光功率,进行灵敏度测量。随后,PD 对两个不同波长的光信号进行拍频,得到 W 波段信号。输出的 W 波段信号通过低噪放大器(LNA)的放大后,由一个喇叭天线发射,并在 1 m 的 THz 空芯光纤中传输。该 THz 空芯光纤采用聚碳酸酯(PC)管作为中空基板来获得柔韧性,可以弯曲甚至盘绕。内镀金属层为银膜,金属镀层厚度为  $0.3 \mu\text{m}$ ,在 300 GHz 处的直线传输损耗为  $1.33 \text{ dB/m}^{[28-30]}$ 。该 THz 空芯光纤的内直径为 3.6 mm,接近 100 GHz 毫米波的波长,这意味着在传输 W 波段毫米波信号时,THz 空芯光纤中不会发生多模传播。经过空芯光纤传输的 W 波段信号由另一个喇叭天线接收。如图 3 的实验系统示意图所示,发射端和接收端的两个喇叭天线平行且同向放置,将空芯光纤插在两个喇叭天线之间,以确保 W 波段信号无泄漏地在空芯光纤中传输。

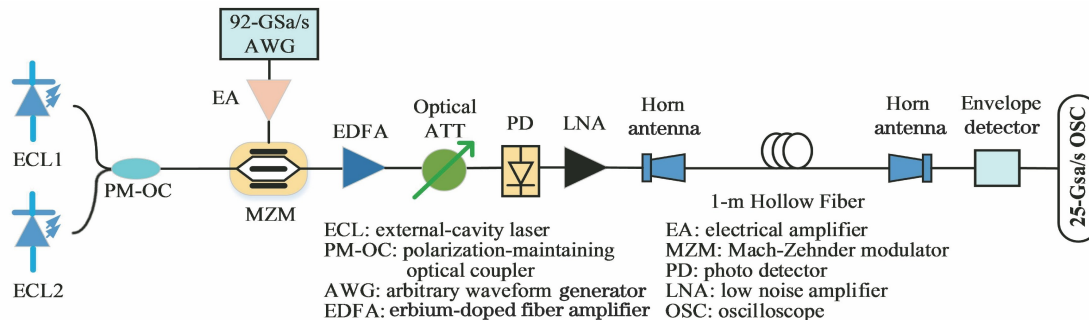


图 2 THz 空芯光纤中信号传输实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for signal transmission over terahertz hollow-core fiber

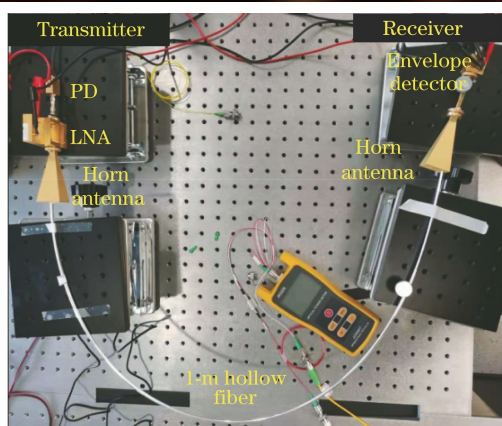


图 3 THz 空芯光纤中信号传输实验系统照片

Fig. 3 Photo of experimental setup for signal transmission over terahertz hollow-core fiber

接收端采用一个包络检波器,对 W 波段信号进行

包络检波,得到基带信号。最后,基带信号由 33 GHz 电带宽、25 GSa/s 采样率的实时示波器进行采样。接收端的离线 DSP 包括重采样、21 抽头的恒模算法(CMA)和 181 抽头的直接检测最小均方算法(DD-LMS)。

### 3 分析与讨论

本文在实验中通过改变一个 ECL 的工作频率调整两个光载波之间的频率间隔。图 4(a)、(c)分别显示了当两光载波频率间隔为 97 GHz 和 105 GHz 时,进入 PD 之前的光信号在 0.03 nm 分辨率下的光谱图。图 4(b)和(d)分别显示了这两种频率间隔下,接收端接收到的 5.75 GBaud 的 PS-PAM8 信号的电谱图。

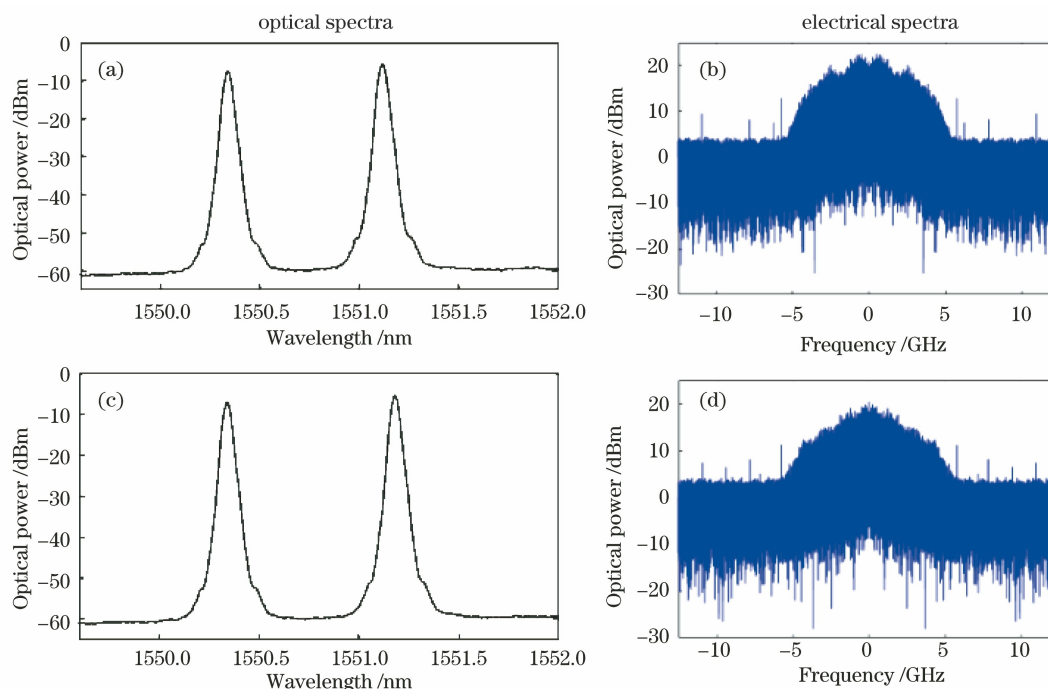


图 4 5.75 GBaud 的 PS-PAM8 信号进入 PD 的光谱图和接收信号的电谱图。(a)(b)频率间隔为 97 GHz; (c)(d)频率间隔为 105 GHz

Fig. 4 Optical spectra of 5.75 GBaud PS-PAM8 signal in PD and electrical spectra of received signal. (a)(b) Frequency spacing of 97 GHz; (c)(d) frequency spacing of 105 GHz

当两光载波的频率间隔为 97~105 GHz,且进入 PD 的接收光功率为 2 dBm 时,5.75 GBaud 的 PS-PAM8 信号的误码率(BER)测试结果如图 5 所示。本文设定了码率为 5/6 的 SD-FEC(开销为 20%),解码前的 BER 阈值为  $2.4 \times 10^{-2}$ [4]。结果表明,不同频率间隔下测试出的 BER 均低于  $2.4 \times 10^{-2}$  的阈值。因此,在该光子辅助 W 波段通信系统中,毫米波频率在 97~105 GHz 的 5.75 GBaud PS-PAM8 信号都可以实现 1 m 空芯光纤的可靠

传输。

图 6 给出了当两光载波的频率间隔为 105 GHz 且进入 PD 的接收光功率为 2 dBm 时,PS-PAM8 信号在不同波特率下的 BER 曲线。传输信号的 BER 性能随波特率的增加而降低。考虑到  $2.4 \times 10^{-2}$  的 SD-FEC 阈值,实现 SD-FEC 解码后无差错传输所要求的最高波特率为 5.75 GBaud。由于 PS-PAM8 每符号的传输速率为 2.37 bit/s,因此可以实现的最高净传输速率为 13.63 Gbit/s。

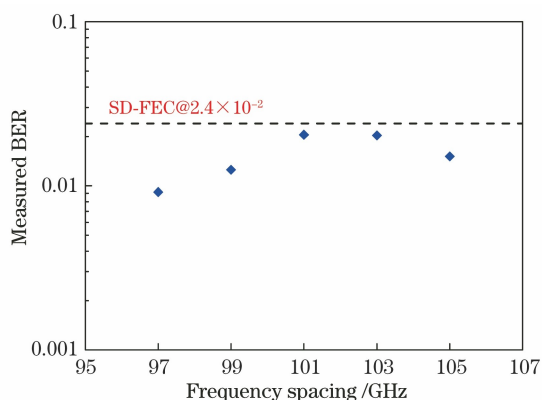


图 5 5.75 GBaud 的 PS-PAM8 信号在不同频率间隔下的 BER 性能

Fig. 5 BER versus frequency spacing for 5.75 GBaud PS-PAM8 signal

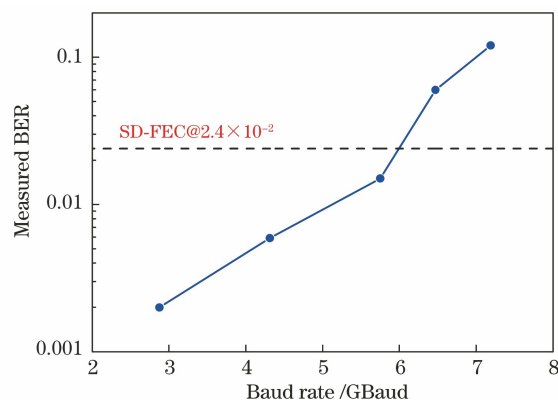


图 6 在 105 GHz 频率间隔下, PS-PAM8 信号的 BER 与波特率的关系曲线图

Fig. 6 BER versus baud rate for PS-PAM8 signal at frequency spacing of 105 GHz

图 7 给出了当两光载波频率间隔为 105 GHz 时, 5.75 GBaud 的 PS-PAM8 和 PAM4 信号的 BER 性能与进入 PD 的接收光功率的关系曲线。对于 5.75 GBaud 的 PAM4 信号, 实现 SD-FEC 解码后无差错传输所要求的最小接收光功率约为 -1.4 dBm。而当进入 PD 的光功率不小于 1.3 dBm 时, 5.75 GBaud 的 PS-PAM8 可以实现 SD-FEC 解码后的无差错传输。同时, 插图 I 和 II 分别显示了 5.75 GBaud 的 PAM4 信号在接收光功率为 1 dBm

时和 5.75 GBaud 的 PS-PAM8 信号在接收光功率为 2 dBm 时恢复的符号星座图、眼图和概率分布直方图。可以观察到恢复出的这两种信号的星座点都是均匀分开的, 眼图清晰且具有较大的开口。另外, 如概率分布直方图所示, 接收到的 PAM4 信号在每个星座点上的符号数大致相等且在每个星座点上近似为高斯分布。而接收到的 PS-PAM8 信号映射到中间星座点的符号数多, 而边缘星座点的符号数少。

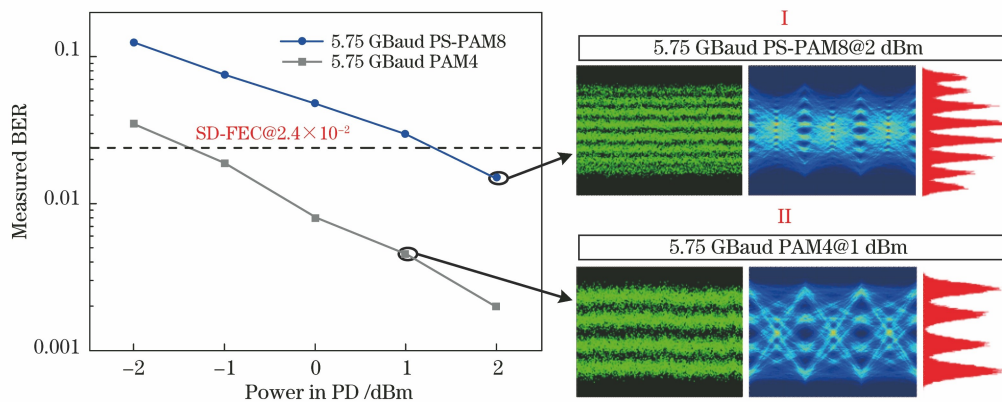


图 7 在 105 GHz 频率间隔下, 5.75 GBaud 的 PS-PAM8 和 PAM4 信号的 BER 与进入 PD 的光功率的关系曲线

(图 I 和 II 分别是 PS-PAM8 信号在接收功率为 2 dBm 时和 PAM4 信号在接收功率为 1 dBm 时恢复的符号、眼图和直方图)

Fig. 7 BER versus optical power for 5.75 GBaud PS-PAM8 and PAM4 signals in PD at frequency spacing of 105 GHz (insets I and II are recovered symbols, eye diagrams, and histograms for PS-PAM8 signal at 2-dBm received power and PAM4 signal at 1-dBm received power, respectively)

## 4 结 论

在 W 波段毫米波通信系统中, 使用 1 m 的 THz 空芯光纤作为传输媒介, 并采用包络检测的方式, 通过实验验证了 5.75 GBaud 的 PS-PAM8 和 PAM4 信号的有线传输。在  $2.4 \times 10^{-2}$  的 SD-FEC

阈值下, 当进入 PD 的光功率达到 2 dBm 时, 可以实现 PS-PAM8 信号在 97~105 GHz 的 W 波段频率的可靠传输, 净传输速率达 13.63 Gbit/s。该实验结果证实了 THz 空芯光纤可以作为一种高效的传输介质被应用于 W 波段通信系统中, 以实现高速有线传输。

## 参 考 文 献

- [1] Li X Y, Yu J J, Zhang J W, et al. Fiber-wireless-fiber link for 100-Gb/s PDM-QPSK signal transmission at W-band [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(18): 1825-1828.
- [2] Li X Y, Xu Y M, Xiao J N, et al. W-band millimeter-wave vector signal generation based on precoding-assisted random photonic frequency tripling scheme enabled by phase modulator [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 5500410.
- [3] Yu J J, Li X Y, Tang X L, et al. High-speed signal transmission at W-band over dielectric-coated metallic hollow fiber [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(6): 1836-1842.
- [4] Wang K H, Zhao L, Yu J J. 200 Gbit/s photonics-aided MMW PS-OFDM signals transmission at W-band enabled by hybrid time-frequency domain equalization [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(10): 3137-3144.
- [5] Yu J J, Li X Y, Chi N. Faster than fiber: over 100-Gb/s signal delivery in fiber wireless integration system [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22885-22904.
- [6] Li J L, Zhao F, Yu J J. D-band millimeter wave generation and transmission through radio-over-fiber system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 5500708.
- [7] Li Y T, Chen Y W, Zhou W, et al. D-band mm-wave SSB vector signal generation based on cascaded intensity modulators [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 7201111.
- [8] Lim C, Nirmalathas A, Bakaul M, et al. Fiber-wireless networks and subsystem technologies [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 390-405.
- [9] Zhang Y, Liu B, Ji S. Generation of multiple-frequency optical millimeter-wave signal with optical carrier suppression and no optical filter [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 5500607.
- [10] Li W P, Kong M, Shi J T, et al. Multiple radio frequency operation based on a modulator in a radio-over-fiber system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106002.  
李韦萍, 孔森, 石俊婷, 等. ROF 系统中基于单个调制器的多射频操作 [J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106002.
- [11] Liu A L, Yin H X, Wu B, et al. Phase-shift characteristics of radio frequency signals for radio over fiber transmission systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0506003.  
刘安良, 殷洪玺, 吴宾, 等. 光载无线通信系统射频信号相移特性研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0506003.
- [12] Li W P, Kong M, Shi J T, et al. Generation of multiple path wireless and wireline signals based on a single optical modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1906001.  
李韦萍, 孔森, 石俊婷, 等. 基于单个光调制器产生多路无线和有线信号 [J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1906001.
- [13] Zhao M M, Yu J J. Terahertz communication system: present and outlook [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018, 16(6): 931-937.  
赵明明, 余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018, 16(6): 931-937.
- [14] Li X Y, Yu J J, Zhang J W, et al. A 400G optical wireless integration delivery system [J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18812-18819.
- [15] Sharif V, Pakarzadeh H. Terahertz hollow-core optical fibers for efficient transmission of orbital angular momentum modes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(13): 4462-4468.
- [16] Tang X L, Sun B S, Shi Y W. Design and optimization of low-loss high-birefringence hollow fiber at terahertz frequency [J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 24967-24979.
- [17] Mendis R, Grischkowsky D. Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(11): 846-848.
- [18] Mendis R. Nature of subpicosecond terahertz pulse propagation in practical dielectric-filled parallel-plate waveguides [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2643-2645.
- [19] Hou Y, Fan F, Zhang H, et al. Terahertz single-polarization single-mode hollow-core fiber based on index-matching coupling [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(8): 637-639.
- [20] Gao F, Zhou S W, Li X, et al.  $2 \times 64$  Gb/s PAM-4 transmission over 70 km SSMF using O-band 18G-class directly modulated lasers (DMLs) [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7230-7237.
- [21] Fu Y, Kong D M, Bi M H, et al. Computationally efficient 104 Gb/s PWL-Volterra equalized 2D-TCM-PAM8 in dispersion unmanaged DML-DD system [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7070-7079.
- [22] Li D, Deng L, Ye Y, et al. Amplifier-free  $4 \times 96$  Gb/s PAM8 transmission enabled by modified Volterra equalizer for short-reach applications using directly modulated lasers [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17927-17939.

- [23] Wang K H, Zhao M M, Kong M, et al. Demonstration of  $4 \times 100$  Gbit/s PAM-4 transmission over 40 km in an IM/DD system based on narrow band DMLs[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 7201908.
- [24] Deniel L, Gay M, Pérez Galacho D, et al. DAC-less PAM-4 generation in the O-band using a silicon Mach-Zehnder modulator[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 9740-9748.
- [25] Wang K H, Zhang J, Zhao M M, et al. High-speed PS-PAM8 transmission in a four-lane IM/DD system using SOA at O-band for 800G DCI [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(6): 293-296.
- [26] Yamazaki H, Nakamura M, Kobayashi T, et al. Net-400-Gbps PS-PAM transmission using integrated AMUX-MZM[J]. Optics Express, 2019, 27(18): 25544-25550.
- [27] Buchali F, Steiner F, Böcherer G, et al. Rate adaptation and reach increase by probabilistically shaped 64-QAM: an experimental demonstration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(7): 1599-1609.
- [28] Chen K W, Zhao Z Q, Zhang X W, et al. Characterization of gas absorption modules based on flexible mid-infrared hollow waveguides[J]. Sensors, 2019, 19(7): 1698.
- [29] Peng C D, Zheng J Z, He M H, et al. Development of flexible mid-infrared light delivery system with bioprobe for beam control[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 134: 106261.
- [30] He M H, Zeng J F, Zhang X, et al. Transmission and imaging characteristics of flexible gradually tapered waveguide at 0.3 THz[J]. Optics Express, 2021, 29(6): 8430-8440.