

双信道 WDM 光纤无线集成太赫兹传输系统

李韦萍^{1,2}, 王凯辉^{1,2}, 桑博涵^{1,2}, 余建军^{1,2}

(1. 复旦大学通信科学与工程系和电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433;
2. 复旦大学上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200433)

摘要: 为了进一步提升当前主流太赫兹系统的通信容量, 本文基于光子辅助太赫兹生成技术、波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM)、多输入多输出技术 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 以及先进的数字信号处理, 提出一种 $N \times N$ MIMO 光纤-无线-光纤融合太赫兹传输系统模型, 搭建双信道 WDM 的 2×2 MIMO 实验系统, 并成功实现两路 3 Gbaud 四频相移键控 (Quad-frequency Phase Shift Keying, QPSK) 信号先后在 10 km 单模光纤 (SMF-28)、3.8 m 无线链路、2.2 km SMF-28 上的传输, 且误码率低于硬判决前向纠错 (Hard-Decision Forward Error Correction, HD-FEC) 的阈值 3.8×10^{-3} 。

关键词: 太赫兹; 波分复用; 多输入多输出技术; 光子辅助

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2022)10-2311-07
电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> DOI: 10.12263/DZXB.20200973

Two Channel WDM Wireless and Optical Integration THz Transmission System

LI Wei-ping^{1,2}, WANG Kai-hui^{1,2}, SANG Bo-han^{1,2}, YU Jian-jun^{1,2}

(1. Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE), Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: In order to further improve the communication capacity of the current mainstream terahertz system, based on photon-assisted terahertz generation technology, wavelength division multiplexing (WDM), multiple input multiple output technology (MIMO) and advanced digital signal processing, a model of $N \times N$ MIMO fiber-wireless-fiber fusion terahertz transmission system is proposed. We built a dual-channel WDM 2×2 MIMO experimental system, and successfully implemented two 3 Gbaud quad-frequency phase shift keying (QPSK) signal transmission over 10 km single-mode fiber (SMF-28), 3.8 m wireless link, 2.2 km SMF-28. The measured system error rate is lower than the hard-decision forward error correction (HD-FEC) threshold of 3.8×10^{-3} .

Key words: terahertz; wavelength division multiplexing; multiple-input multiple-output technique; photonics-aid

1 引言

随着 5G 通信技术的推广和演进, 各种新兴业务的快速增长带来的数据流量需求与日俱增, 传统频段已经逐渐不能满足人们的通信需求, 通信频率向更高频段扩展更是不可逆转的趋势和行业共识^[1-3]。太赫兹频段 (0.3~10 THz) 由于其巨大的可用带宽^[4,5], 可提供数千兆的移动数据容量, 并具有非常简单的调制格式和系统架构。而且 THz 天线体积小, 拥有便于与其他前

端链路器件集成等优势^[6]。研究人员越来越关注于其在室内短距离无线个人局域网 (Wireless Personal Area Network communication technologies, WPAN) 和无线局域网 (Wireless Local Area Networks, WLAN) 中的应用^[7-11]。

目前 THz 通信系统的产生方案主要有以下 3 种: 基于半导体激光器^[12-14]、基于纯电子器件^[15-17]以及光子辅助方案^[7-11, 18-22]。在 1 THz 以上频段, 通常只能采用量

收稿日期: 2020-09-03; 修回日期: 2021-12-06; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61935005, No.61922025, No.61527801, No.61675048, No.61720106015, No.61835002, No.61805043); 国家重点研发计划 (No.2018YFB1800900)

子级联激光器、自由电子激光器以及气体激光器等基于半导体激光器的方案来产生 THz 信号. 这种方案虽能产生超高频 THz, 但是对发射源的要求却非常严格, 往往需要超低温条件下工作, 这也就限制了该方案的可用性和普遍性. 而基于纯电子器件的方案, 发射机通常由射频源、倍频器、电混频器以及电放大器等组成, 结构虽然简单, 然而系统对于电子设备的增益和带宽有着较高要求, 并且需要上下变频以及多种调制混频技术, 导致传输速率较低, 无线传输距离较近, 调制解调时转换损失较大, 且该方案下当前的主要调制格式为二进制振幅键控 (On-Off Keying, OOK)^[15,16], 频谱效率有待提升. 与此对比, 光子辅助 THz 生成方案避开了电子器件带宽等限制, 显得更加实用. 该方案下发射机频率调节较为容易, 能够方便灵活地得到不同频率的 THz 信号. 在已报道的光子辅助太赫兹波通信系统中多采用单输入单输出 (Single Input Single Output, SISO) 无线传输链路^[7-11], 而且部分系统中并没有考虑光纤传输^[8-11]. 文献^[18~20]证明了在系统中采用多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技术可以有效提升无线传输容量. 而在无线 MIMO 系统中引入波

分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 技术, 通过利用多个载波进行多路传输和多路接收从而降低信号的传输波特率并增加无线传输容量^[21,22].

根据以上分析, 本文创新性地提出了一种基于 WDM 的光子辅助 $N \times N$ MIMO 光纤-无线-光纤融合 THz 传输系统. 通过结合光子辅助 THz 生成技术、WDM、无线 MIMO 以及先进的数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP), 搭建双信道 WDM 的 2×2 MIMO 实验系统, 成功实现两路 3 Gbaud 四频相移键控 (Quadrature Frequency Phase Shift Keying, QPSK) 信号先后在 10 km 单模光纤 (SMF-28)、3.8 m 自由空间无线链路、2.2 km SMF-28 上的无缝融合传输, 且误码率 (Bit Error Rate, BER) 低于硬判决前向纠错 (Hard-Decision Forward Error Correction, HD-FEC) 的阈值 3.8×10^{-3} .

2 系统原理

图 1 展示了基于 WDM 的光子辅助 $N \times N$ MIMO 光纤-无线-光纤融合 THz 传输系统原理. 该系统主要由 6 部分组成, 分别为光发射端、无线发射端、 $N \times N$ MIMO 无线链路、无线接收端、接收终端以及离线 DSP 模块.

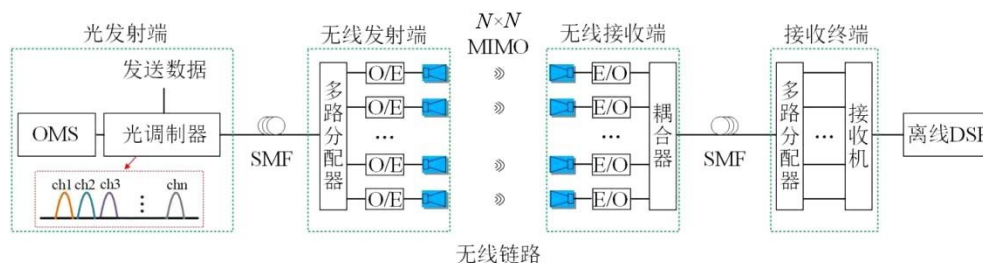


图1 基于WDM的光子辅助 $N \times N$ MIMO 光纤-无线-光纤融合 THz 传输系统原理

在光发射端, 多频段光信号由多载波源 (Optical Multiplexing Section, OMS) 产生, 载波间具有固定频率, 随后多载波进入光调制器中并由需要发送的数据进行调制, 以生成多频段光基带信号. 图 2 显示了信号经光调制器后的示意性光谱. 发送数据可以采用高级矢量调制格式, 如 QPSK、高阶正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 等. 而 OMS 可使用多个自由运行激光器或多载波光学梳方案. 在本文第 3 部分的实验中, 采用多个自由运行激光器的方案, 该方案不仅可以相对容易地产生任意频率的 THz, 而且输出信号具有较高信噪比. 虽然用于拍频的独立激光器难以锁频、锁相, 从而出现“漂移”现象^[23], 但是可以利用接收终端之后的离线 DSP 模块对信号进行补偿.

光发射端的多频段光基带信号经过一定长度的 SMF 传输后达到无线发射端. 在无线发射端, 信号首先经过多路分配器分为多路分别进入各自链路的光电转换器 (O/E) 中上变频为多频段 THz 电信号, 最后通过

THz 天线发射到自由空间. 在自由空间中, 无线链路为 $N \times N$ MIMO 结构, 同时传输来自 THz 发射天线的多信道 THz 信号. 这里需要注意的是, $N \times N$ MIMO 无线链路与传统 MIMO 含义有所不同, 它代表点对点直接传输, 既不会带来增益也不会带来干扰.

在无线接收端, 多频段电信号被 THz 天线接收, 然后经过光电转换器 (E/O) 变频为光信号. 随后多路光信号经耦合器耦合输出为一路信号, 经过一定长度的 SMF 传输后到达接收终端, 之后又经多路分配器后分为 N 路, 同时进入接收机中完成光电转换并进行数据的采集和记录, 最后离线 DSP 处理数据.

3 实验装置及结果

如图 3 所示, 本文利用光子远程外差技术生成二频段 QPSK 调制 THz 信号. 由于实验所用混频器的工作频段为 325~500 GHz, 所以为了获得更好的响应, 本文选择 450 GHz, 437.5 GHz 作为 THz 信号频率. 在光发射

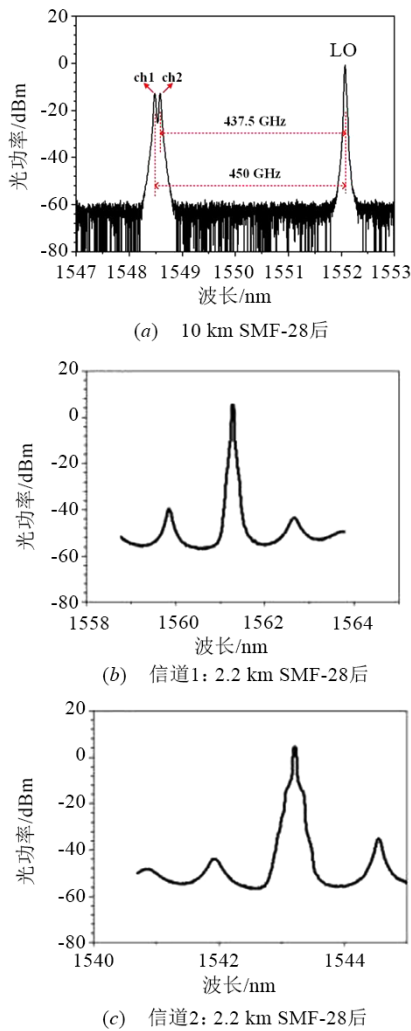


图 2 光谱图

端,两个频率间隔为 12.5 GHz 的外腔激光器 (ECL1-ECL2) 用于生成二频段光信号,而 ECL3 作为本振光 (LO),ECL1 和 ECL3 的频率间隔为 450 GHz, ECL2 和 ECL3 的频率间隔为 437.5 GHz. ECL1-ECL3 均由 Alnair-Labs 公司生产,型号 TLG-300M,自由运行且线宽低于 100 kHz. 从 ECL1 和 ECL2 产生的两个连续光波分别经过 I/Q 调制器 (I/Q MOD1, I/Q MOD2) 然后由 QPSK 信号进行调

制. 其中, QPSK 信号由 Matlab 离线生成, 加载到任意波形发生器 (Arbitrary Waveform Generator, AWG), 随后分为 I 路和 Q 路驱动 I/Q 调制器. AWG 的采样率为 12 GSa/s, 3 dB 带宽 4 GHz. 每个 I/Q 调制器 1 GHz 时的半波电压为 2.3 V, 3 dB 带宽 32 GHz, 上下支相位差为 $\pi/2$. 组成 I/Q 调制器的两个马赫增德尔调制器均在零点偏置并全幅驱动. 两个 I/Q 调制器输出信号光功率均为 5 dBm, ECL3 输出光功率为 13 dBm, 三者通过保偏光耦合器 (Polarization-Maintaining Optical Coupler, PM-OC) 耦合进入 10 km SMF-28 中传输, 该光纤在 1 550 nm 处的色散单位值为 $17/(\text{ps}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1})$. 图 2(a) 给出了信号经过 10 km SMF-28 传输后测量所得的光谱图 (分辨率为 0.1 nm).

在无线发射端, 10 km SMF-28 的输出光信号首先经过反向光耦合器 (Optical Coupler, OC) 分为两路, 然后利用两个并行偏振控制器 (Polarization Controller, PC) 控制偏振方向, 并通过掺铒光纤放大器 (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) 来提升信号功率, 最后通过天线集成光混频模块 (AIPM, 型号 IOD-PMAN-13001, NTT Electronics 公司生产) 完成光电转换, 以产生 450 GHz 和 437.5 GHz 的 THz 电信号. 每个 AIPM 由光电二极管 (Uni-Traveling-Carrier PhotoDiode, UTC-PD) 和非对称蝶形天线单片集成, 典型输出功率为 -28 dBm, 工作频率范围为 300~2 500 GHz. 因为实验中所使用的 AIPM 尾纤具有保偏特性, 对光信号偏振敏感, 所以本文在 EDFA 之前各加入了一个 PC, 以调整进入 AIPM 的偏振方向, 便于从 AIPM 中获得最大输出.

在自由空间中, 3.8 m 的 2×2 MIMO 链路从无线发射端到无线接收端传递二频段 THz 信号. 本文在无线发射端和无线接收端之间放入了 3 对透镜 (lens1-6). 其中, 透镜 1~4 相同, 均为直径 10 cm、焦距 20 cm 的 Plano-Convex Teflon 透镜, 用于汇聚无线 THz 信号, 以实现无线接收端的接收功率最大化. 因为接收端的 THz 天线尺寸非常小, 所以本文使用了一对较小的透镜 (lens5, lens6), 型号 PTL-2-100BW, 直径 5 cm, 焦距 10 cm, 对汇聚 THz 束的位置进行微调. 透镜 1、透镜 3、透镜 5 的中

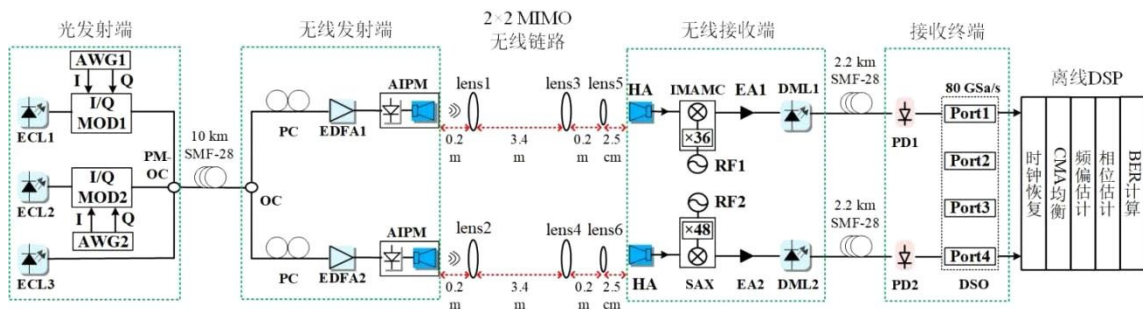


图 3 基于 2-WDM 的光子辅助 2×2 MIMO 光纤-无线-光纤融合 THz 传输实验装置

心与信道 1 无线链路对齐,而透镜 2、透镜 4、透镜 6 的中心和信道 2 无线链路对齐.以信道 1 无线传输链路为例,AIPM 与透镜 1,透镜 1 与透镜 3,透镜 3 与透镜 5,透镜 5 与无线接收机喇叭天线(Horn Antenna, HA)的距离分别为 0.2 m, 3.4 m, 0.2 m 和 2.5 cm. 信道 2 无线传输链路内的透镜安放位置与信道 1 相同.

在无线接收端,利用两个并行 HA 对信道 1、信道 2 的无线 THz 信号进行接收.每个 HA 的接收增益为 26 dBi,工作频率范围为 330~500 GHz.信道 1 中,本文利用由 12.308 GHz 射频源(RF1)驱动的 VDI 集成混频器/放大器/乘法器链(Integrated Mixer/Amplifier/Multiplier Chain, IMAMC)实现 THz 信号的下变频.该 IMAMC 由混频器、放大器以及 $\times 36$ 倍频器集成,工作的频率范围为 330~500 GHz.因此驱动混频器的正弦波频率为 $12.308 \times 36 = 443$ GHz,经过相干接收后 THz 信号转换为频率为 $450 - 443 = 7$ GHz 的中频(Intermediate Frequency, IF)信号,然后通过增益为 50 dB、工作频率范围为 5~20 GHz 的电放大器(EA1)放大.由于缺少可用的组件,所以本文对于信道 1、信道 2 的 THz 信号使用了不同的下变频器.在信道 2 中,本文利用 8.9583 GHz 的 RF2 驱动 VDI 频谱分析仪扩展器(SAX, WR2. 2SAX)以实现下变频.SAX 由混频器(单边带转换损耗曲线如图 4 所示,性能参数如表 1 所示)和 $\times 36$ 倍频器集成,因此驱动混频器的正弦波频率为 $8.9583 \times 48 = 430$ GHz,经过相干接收后,THz 信号转换为频率为 $437.5 - 430 = 7.5$ GHz 的 IF 信号,然后通过 EA2(参数与 EA1 相同)放大.随后两路 IF 信号经直接调制激光器 DML(型号 NLK1551SSC,带宽 15 GHz)调制后进入 2.2 km SMF-28 中传输,最后到达接收终端.这里,通过 DML 实现了无线接收端的电光转换,相比于强度调制器或相位调制器的使用,DML 具有体积小、成本低、输出功率大等优势,很好地解决了光纤-无线-光纤的无缝融合传输问题.图 2(b)给出了信道 1 中信号经过 2.2 km SMF-28 传输后的光谱图.图 2(c)给出了信道 2 中信号经过 2.2 km SMF-28 传输后的光谱图.

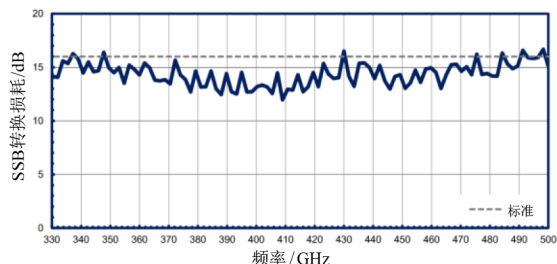


图 4 SAX 混频器的单边带转换损耗曲线

在接收终端,2.2 km SMF-28 传输而来的光信号首先经过光电探测器(Photoelectric Detector, PD)完成光电转换,随后本文使用采样率为 80 GSa/s 的数字采样示

表 1 SAX 混频器性能参数

| 特性 | 参数 |
|-----------------------|----------------|
| 工作射频频段/GHz | 325~500 |
| 射频输出法兰(UG-387/U-M) | WR-2.2 |
| 倍频倍数(最高/最低) | 48/12 |
| 本振源输入功率/GHz | 6.77~10.42(低) |
| | 27.08~41.67(高) |
| 射频功率限制: Compr./Damage | -20/-10 |
| 混频器转换损耗/dB | 16 |
| 最大可用中频信号带宽/GHz | 40 |
| 显示平均噪声水平(noise level) | -150 |

波器(Digital Sampling Oscilloscope, DSO)的两个模数转换通道来捕获 IF 信号,最后进入后续的 DSP 模块,以恢复出原始数据并进行 BER 测量.离线 DSP 主要包括下变频、恒模算法(Constant Modulus Algorithm, CMA)均衡、频率偏置估计、载波相位估计以及 BER 计算^[24].图 5 为本文的实验装置照片.

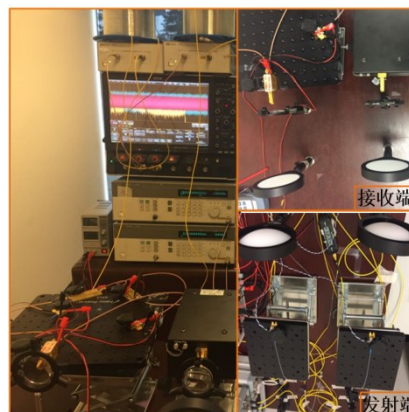


图 5 实验装置

图 6 展示了本文测量得到的信道 1 中 7 GHz IF 信号以及信道 2 中 7.5 GHz IF 信号的电谱.图 7(a)~(e)分别给出了 3 Gbaud QPSK 信号依次经过 10 km SMF-28、3.8 m 2×2 MIMO 无线链路、DML+10 km SMF-28 传输,在接收端接收到的时钟恢复前、时钟恢复后、CMA 均衡后、频偏估计后以及相位估计后信道 1 中的信号星座图,而图 7(f)~(j)给出了对应于信道 2 中的信号星座图.值得注意的是,图 6 中电谱的测量和图 7 中星座图的解调都是在 UTC-PD 的输入功率为 13 dBm、QPSK 速率为 3 Gbaud 情形下进行的,而且图 7 所对应的 CMA 抽头数为 81.

图 8 展示了 UTC-PD 的输入光功率为 13 dBm 时,3 种不同情形下 QPSK 矢量射频信号 BER 与波特率的关系曲线:① QPSK 信号依次经过 10 km SMF-28、3.8 m 无线传输,信道 1、信道 2 BER 的算术平均值;② QPSK 信号依次经过 10 km SMF-28、3.8 m 无线传输、DML 传输,信道 1、信道 2 BER 的算术平均值;③ QPSK 信号依次经

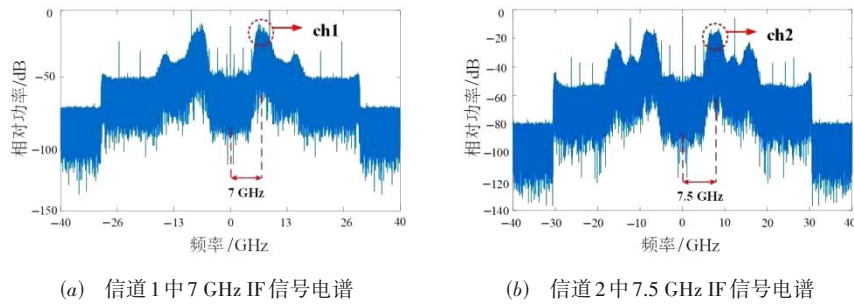


图6 信号光谱

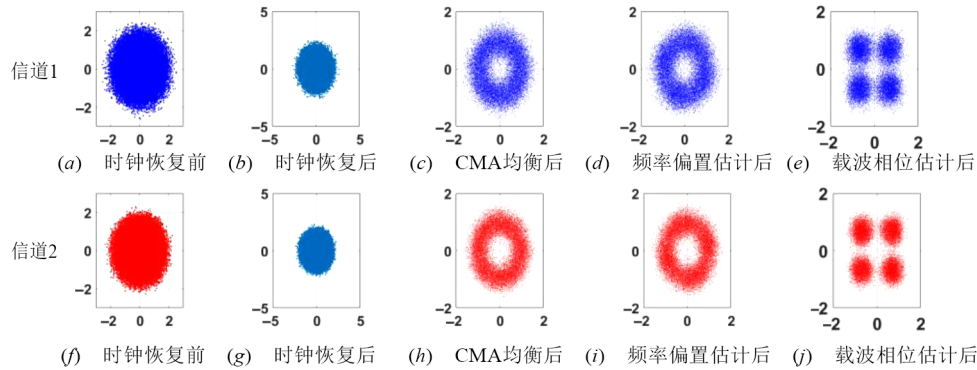


图7 10 km SMF-28、3.8 m 2×2 MIMO无线链路、DML+10 km SMF-28 传输后接收到的对应于 3 Gbaud QPSK 星座图

过 10 km SMF-28、3.8 m 无线、DML+2.2 km SMF-28 传输,信道 1、信道 2 BER 的算术平均值. 本文在光发射端设置 AWG, 观察离线 DSP 模块的 BER 变化情况. 从 2 Gbaud 开始,以 0.5 Gbaud 间隔依次增加信号波特率,由于有限的光信噪比以及 DML、EA 等光电器件的带宽限制,系统 BER 随着信号波特率的提高而逐渐恶化. 从图中可以看到 10 km SMF-28 之后无论是否加入 DML, QPSK 信号的最大传输速率几乎没有明显的差异,均处于 4.5 Gbaud 附近. 但是在 DML 之后加入一段 2.2 km SMF-28 传输,其最大传输速率下降到了 3 Gbaud 附近. 这主要是因为 DML 在直接调制过程中伴随着啁啾效应^[25],从而使得信号脉冲更易受到光纤色散的影响而展宽,同时 DML 调制输出的双边带信号在 2.2 km SMF-28 传输时受到走离效应的影响^[26],所以也就导致了情形 3 下的最高波特率低于情形 1、情形 2. 同时本文相信,如果在无线发射端或无线接收端增加一个 THz 放大器提高 THz 的功率,则可以实现更高的波特率和更优异的误码性能.

最后,图 9 展示了 4 Gbaud QPSK 信号经过 10 km SMF-28、3.8 m 无线传输后测得信道 1、信道 2 BER 与 CMA 抽头数的关系曲线. 在 65~89 范围内调整 CMA 抽头数,随着抽头数目的增加,BER 呈现下降趋势,并且当抽头数大于 81 后,本文可以得到良好的 BER 性能.

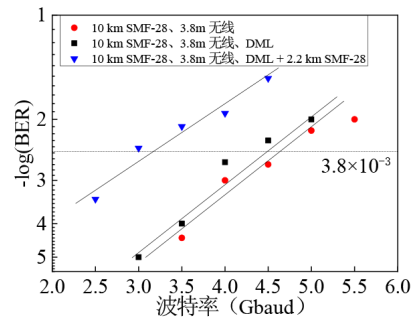


图8 BER 与波特率的关系曲线

这是因为较大的 CMA 抽头对信道 1、信道 2 传输路径的距离差异 (EDFA1 和 EDFA2 的光纤长度不同) 所引起的光纤延迟进行了更好的补偿.

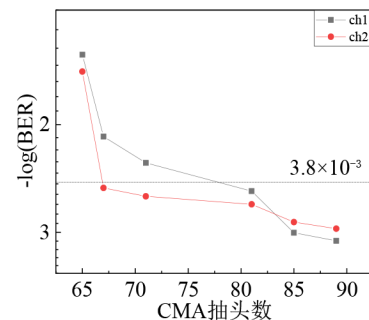


图9 信道 1、信道 2 BER 和 CMA 算法抽头数的关系

4 结论

为了进一步提升当前主流太赫兹系统的通信容量,增大传输距离,同时解决光纤-无线-光纤的融合传输问题,本文提出了一种基于 WDM 的光子辅助 $N \times N$ MIMO 光纤-无线-光纤融合 THz 传输系统,并对其系统原理进行了介绍,然后搭建双信道 WDM 的 2×2 MIMO 实验系统,成功实现两路 3 Gbaud QPSK 信号先后在 10 km SMF-28、3.8 m 自由空间无线链路、2.2 km SMF-28 上的无缝融合传输.同时,本文比较了 3 种不同情形下 BER 与波特率之间的关系,以及 CMA 抽头数对 BER 性能的影响.据悉,这是在基于 WDM 的 2×2 MIMO 无线光纤集成 THz 系统中,实现的最大传输距离和单信道最高传输速率.

参考文献

- [1] LI W P, LIU J X, ZOU P, et al. Geometrically shaped 16-APSK modulations in Internet of vehicles system based on automotive headlight[C]//International Photonics and Opto-Electronics Meeting 2019. Washington: OSA, 2019: OF-Tu2A.4.
- [2] 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.
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. (in Chinese)
- [3] 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.
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. (in Chinese)
- [4] 胡林林,曾造金,陈洪斌,等.毫米波/太赫兹扩展相互作用速调管放大器的应用及研究进展[J].电子学报,2019,47(1):211-219.
HU L L, ZENG Z J, CHEN H B, et al. Application and development of extended interaction klystrons in millimeter-wave and terahertz band[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(1): 211-219. (in Chinese)
- [5] MOELLER L, FEDERICI J, SU K. THz wireless communications: 2.5 Gb/s error-free transmission at 625 GHz using a narrow-bandwidth 1 mW THz source[C]//2011 URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul: IEEE, 2011: 1-4.
- [6] DUCOURNAU G, SZRIFTGISER P, BACQUET D, et al. Optically power supplied Gbit/s wireless hotspot using 1.55 μm THz photomixer and heterodyne detection at 200 GHz[J]. Electronics Letters, 2010, 46(19): 1349-1351.
- [7] WANG C, YU J J, LI X Y, et al. Fiber-THz-fiber link for THz signal transmission[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1-6.
- [8] HERMELO M F, SHIH P B, STEEG M, et al. Spectral efficient 64-QAM-OFDM terahertz communication link[J]. Optics Express, 2017, 25(16): 19360-19370.
- [9] PANG X D, JIA S, OZOLINS O, et al. Single channel 106 gbit/s 16QAM wireless transmission in the 0.4 THz band [C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington: OSA, 2017: Tu3B.5.
- [10] JIA S, YU X B, HU H, et al. 120 gb/s multi-channel THz wireless transmission and THz receiver performance analysis[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(3): 310-313.
- [11] LIU K X, JIA S, WANG S W, et al. 100 gbit/s THz photonic wireless transmission in the 350-GHz band with extended reach[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(11): 1064-1067.
- [12] BARBIERI S, MAINEULT W, DHILLON S S, et al. 13GHz direct modulation of terahertz quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(14): 143510.
- [13] LEE E S, MOON K, LEE I M, et al. Semiconductor-based terahertz photonics for industrial applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 274-283.
- [14] TAN Z Y, CHEN Z, CAO J C, et al. Wireless terahertz light transmission based on digitally-modulated terahertz quantum-cascade laser[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 31403-31405.
- [15] KALLFASS I, ANTES J, SCHNEIDER T, et al. All active MMIC-based wireless communication at 220 GHz [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(2): 477-487.
- [16] KALLFASS I, ANTES J, LOPEZ-DIAZ D, et al. Broadband Active integrated circuits for Terahertz communication[C]//European Wireless 2012; 18th European Wireless Conference. Poznan: IEEE, 2012: 1-5.
- [17] WANG C, LU B, LIN C X, et al. 0.34-THz wireless link based on high-order modulation for future wireless local area network applications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(1): 75-85.
- [18] LI X Y, DONG Z, YU J J, et al. Fiber-wireless transmission system of 108 Gb/s data over 80 km fiber and 2×2 multiple-input multiple-output wireless links at 100 GHz W-band frequency[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5106-5108.
- [19] YU J J, LI X Y, CHI N. Faster than fiber: Over 100-Gb/s signal delivery in fiber wireless integration system[J]. Op-

tics Express, 2013, 21(19): 22885-22904.

- [20] PUERTA R, YU J J, LI X Y, et al. Demonstration of 352 gbit/s photonic-enabled D-band wireless delivery in one 2×2 MIMO system[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington: OSA, 2017: Tu3B.3.
- [21] YU J J. Photonics-assisted millimeter-wave wireless communication[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(6): 1-17.
- [22] CAO Z Z, SHEN L F, JIAO Y Q, et al. 200 gbps OOK transmission over an indoor optical wireless link enabled by an integrated cascaded aperture optical receiver[C]//Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers. Washington: OSA, 2017: 1-3.
- [23] LI X Y, YU J J, XIAO J N, et al. Fiber-wireless-fiber link for 128-gb/s PDM-16QAM signal transmission at $\backslash(W)$ -band[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(19): 1948-1951.
- [24] YU J J, ZHOU X. Ultra-High-Capacity DWDM transmission system for 100G and beyond[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(3): S56-S64.
- [25] MATSUI Y, MAHGEREFTEH D, ZHENG X Y, et al. Chirp-managed directly modulated laser(CML) [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(2): 385-387.
- [26] JIA Z S, YU J J, CHOWDHURY A, et al. Simultaneous generation of independent wired and wireless services using a single modulator in millimeter-wave-band radio-over-fiber systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(20): 1691-1693.



桑博涵 男, 1998 年出生, 河北石家庄人. 本科毕业于湖南大学, 现为复旦大学直博生. 主要从事光子辅助毫米波通信技术方面的研究工作.

E-mail: 20110720064@fudan.edu.cn



余建军 男, 1968 年出生, 湖南益阳人. 复旦大学教授, 博士生导师, OSA Fellow, IEEE Fellow. 主要从事高速光纤通信技术、光子辅助毫米波通信技术、太赫兹通信等方面的研究工作.

E-mail: jianjun@fudan.edu.cn

作者简介



李韦萍 男, 1994 年出生, 河南泌阳人. 本科毕业于国防科技大学, 现为复旦大学直博生. 主要从事太赫兹通信和光载无线方面的研究工作.

E-mail: lwping@fudan.edu.cn



王凯辉 男, 1994 年出生, 浙江嘉兴人. 本科毕业于复旦大学, 现为复旦大学博士后. 主要从事高速光传输和光载无线方面的研究工作.

E-mail: 16110720021@fudan.edu.cn