

基于概率整形的离散傅里叶变换扩展的 300 GHz OFDM 太赫兹无线传输系统

姜璐涵, 马晗松, 张沁旖, 田鹏, 韩扬, 王明旭, 谭景文, 徐思聪, 张冰,
Rehim Uddim, 魏怡, 杨雄伟, 李韦萍, 余建军

(专用集成电路与系统国家重点实验室, 复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室, 复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要: 为了适应高速大容量的通信需求, 提出了采用基于概率整形(PS, Probabilistic Shaping), 离散多音调制(DMT, Discrete Multi-tone Modulation)和离散傅里叶变换扩展技术(DFT, Discrete Fourier Transform)实现 300GHz 太赫兹信号无线传输。概率整形通过增加星座点距离提升信号接收机灵敏度, 可最多降低 55% 的误码率, 可延长传输距离。离散傅里叶变换扩展技术在系统中降低 1.68 dB 正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing)信号的峰均比, 提升抗非线性效应能力。通过结合这些先进的数字信号处理技术, 分别实现了 12GBaud PS-16QAM 的 OFDM-DMT 信号及 10GBaud PS-64QAM 的 DFT-S-OFDM-DMT 信号 1 m 无线传输。基于 300GHz 的太赫兹无线传输系统, 比较了采用这些数字信号处理技术的性能优势。

关键词: 概率整形; 正交频分复用技术; 离散多音调制; 离散傅里叶变换扩展技术; 太赫兹通信
中图分类号: TN92 **文献标识码:** A

300 GHz OFDM electronic terahertz wireless transmission based on PS and DFT-S

JIANG Lu-Han, MA Han-Song, ZHANG Qin-Yi, TIAN Peng, HAN Yang, WANG Ming-Xu,
TAN Jing-Wen, XU Si-Cong, ZHANG Bing, Uddim Rehim, WEI Yi, YANG Xiong-Wei,
LI Wei-Ping, YU Jian-Jun

(State Key Laboratory of ASIC and System, Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE), School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: To meet the high-speed and high-capacity demands of communication, a 300GHz electronic wireless transmission system for terahertz frequencies is proposed, which incorporates Probability Shaping (PS), Discrete Multi-tone Modulation (DMT) and DFT-Spread (DFT-S) techniques. PS increases the Euclidean distance between constellation points, thereby enhancing the receiver sensitivity. In the system at most 55% bit error rate is decreased, enabling to extend transmission range. DFT-S technique reduces 1.68 dB peak-to-average power ratio of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) signals in the system, thus improving their resistance to nonlinear effects. By integrating these advanced digital signal processing techniques, 12GBaud PS-16QAM OFDM-DMT signals and 10GBaud PS-64QAM DFT-S-OFDM-DMT signals were successfully implemented in 1 m wireless transmission. Finally, the performance advantages of these digital signal processing techniques were compared.

Key words: probabilistic shaping, OFDM, DMT, DFT-S, terahertz communication

引言

近年来, 随着全球互联网用户数量和数据流量

的飞速增长, 通信网络向宽带高速的发展要求愈发迫切。目前, 5G 通信技术使用的频段已经进入毫米波(30~300 GHz)范围。由于商用设备的频带限制,

收稿日期: 2023-12-18, 修回日期: 2024-06-20

Received date: 2023-12-18, Revised date: 2024-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62305067, 61935005, 61835002, 62375219, 62331004)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62305067, 61935005, 61835002, 62375219, 62331004)

作者简介(Biography): 姜璐涵(2000—), 女, 江苏苏州人, 硕士生, 主要研究领域为光通信、太赫兹通信. E-mail: jianglh23@m.fudan.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: jianjun@fudan.edu.cn

研究重心主要落在 60 GHz 以下的频段^[1]。此外,毫米波通信已在大容量和高速率方面取得了一系列的进展^[2-4]。然而,对数据传输更高速率和更低延迟的要求使太赫兹通信成为未来主流通信手段。太赫兹波段为 0.1~10 THz,具有较高的传输速率和频谱带宽,吞吐量,方向性好,且由于其特殊的频谱特性和大气不透明具有一定的安全性,保密性较高^[5]。

目前,主要有三种手段产生太赫兹信号,分别是基于纯电子方式、基于半导体激光器(THz-QCL)和基于光子辅助方式产生太赫兹源^[6]。其中,利用纯电子器件产生太赫兹信号的方式具有系统结构简单、操作简便和功耗较小的优势,得到了广泛的应用。

为了进一步满足人们对传输容量和通信效率日益增长的需求,高阶调制技术以及多种复用技术成为众多学者的研究重点。高阶调制技术,如正交幅度调制(QAM, Quadrature Amplitude Modulation),能够支持在给定带宽下传输更多比特信息,具有更高的数据传输速率。2023年,Junting Shi等人实现了调制格式为 65536-QAM 的传输信号,并利用正交频分复用技术(OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing)实现了 320 GHz 的光纤-太赫兹通信系统^[7]。然而,在无线传输情况下,大气对太赫兹信号的高衰减往往会导致信道较低的信噪比,极大影响传输性能。概率整形技术(PS, Probabilistic Shaping)可通过改变发送信号星座点概率,改善信号的传输性能^[8]。PS 技术常应用于光纤通信和无线通信场景中,如在光子辅助产生的 335 GHz 系统中实现 PS-64QAM 信号的 200 m 无线传输^[9],以及通过信息熵最优化的 PS-36QAM 实现了速率为 120 GBaud、传输距离为 2400 km 标准单模光纤的通信系统^[10]。

常见的复用技术有空分复用、偏振复用、天线极化复用和多载波调制等。2020年,Shi Jia等人利用 OFDM 技术实现了速率高达 612.65 Gbit/s 的偏振

复用 PS-64QAM 传输^[11]。2022年,Miao Kong等人实现了基于空分复用的每载波 800 Gb/s 的速率 PS-64QAM 2 000 km 传输^[12]。同年,Lu Zhang等人通过 Delta-sigma 调制实现了调制阶数高达 16384-QAM 的 OFDM 信号传输,实现了混合光纤-太赫兹移动通信前传系统^[13]。此外,B. A. Sawadogo等人利用基于多芯光纤和光电二极管阵列的空间复用技术,实现了速率达到 100 Gbit/s 的 16QAM 信号传输^[14]。OFDM 技术具有抗符号间干扰的特性和较高的频谱利用率^[15],在宽带有线和无线传输中均有广泛运用^[16-17]。然而,传统 OFDM 技术具有 PAPR 较高的弊端,而离散傅里叶变换扩展(DFT-S, DFT-Spread)技术可有效降低峰均比,从而抑制信号在通过功率放大器和数模转换器时受到不理想因素的限制^[18]。在光纤通信和无线通信中,DFT-S 均展现出了优于传统 OFDM 系统的性能^[19-20]。

近年来,国内众多研究人员采用了不同的产生太赫兹信号的方式,分别在太赫兹频段上实现了不同调制格式的信号传输,如表 1 所示。总体而言,本文实现的 300 GHz 纯电子太赫兹系统与国内已报道的基于光子辅助产生的太赫兹系统在工作频段上基本到达了相同水平,且相对于其他纯电子方式的太赫兹通信系统在工作频段上具有较大的优势。此外,本文采用的多载波调制等技术,能使实现的太赫兹系统能够具有更高的频谱利用率和净传输速率。

本文主要的研究工作如下:

1)介绍了基于纯电子方式产生太赫兹源的主要结构和研究现状,并提出将基于 PS、DFT-S 以及离散多音调制(DMT, Discrete Multi-tone Modulation)的 OFDM 技术创造性地运用于基于纯电子器件的 300 GHz 太赫兹通信系统中。

2)采用上述技术,在基于纯电子方式的 300 GHz 太赫兹系统上实现了速率为 12 GBaud 的 PS-16QAM OFDM-DMT 信号的 1 m 无线传输,并验证了概率整形技术的 QAM 调制信号在 OFDM-DMT 系统

表 1 国内太赫兹频段通信系统研究进展

Table 1 Research progress of terahertz communication systems in China

年份	实现功能	太赫兹源产生方式	工作频段	调制手段	信道传输
2022	太赫兹频段的感知通信一体化系统设计与实现 ^[21]	纯电子方式	97 GHz	OFDM 调制	<3 m 无线传输
2023	1.485 GBaud 强度调制信号的 1 m 太赫兹光纤实时视频传输 ^[22]	基于光子辅助方式	350 GHz	强度调制	1 m 太赫兹光纤传输
2020	60 Gbit/s 双边带信号的 3 m 无线传输 THz 通信系统 ^[23]	基于光子辅助方式	310 GHz	16QAM DMT 调制	3 m 无线传输

中的性能优势。从而首次将 PS 和 DFT-S 等编码技术应用在超高频的太赫兹传输系统上。

3) 实现了速率为 10 GBaud 的 PS-DFT-S-64QAM 的 OFDM-DMT 信号的 1 m 无线传输距离。通过在 OFDM 系统中添加 DFT-S 技术, 比较添加 DFT-S 技术前后的 PS-64QAM 信号的传输性能差异, 验证 DFT-S 技术在基于纯电子方式的太赫兹通信系统中的性能优势。

1 纯电子方式产生太赫兹源

相对于其他两种产生太赫兹信号的方式, 如光子辅助产生太赫兹波的方式依赖于精密的光学器件平台, 全电子学方式的太赫兹系统结构简单, 并且能支持大功率太赫兹信号的辐射, 为长距离的无线通信提供了可能^[24]。然而, 电子器件增益和带宽的限制成为影响系统性能的主要因素^[25]。因此, 需要通过数字信号处理算法进行补偿。

纯电子方式产生太赫兹信号大致分为两种类型。一种是利用电子器件直接产生太赫兹信号, 另一种是间接利用倍频使信号频率达到太赫兹频段。其中, 利用倍频方式产生太赫兹信号的发射端架构如图 1 所示。首先, 射频信号源(RF source)产生射频信号, 其频率通常为几十 GHz。该信号经过倍频器进行上变频后, 频率被转换至太赫兹频段。随后, 通过混频器与电信号混频产生调制信号, 利用放大器放大后, 由天线将信号发射至无线信道。

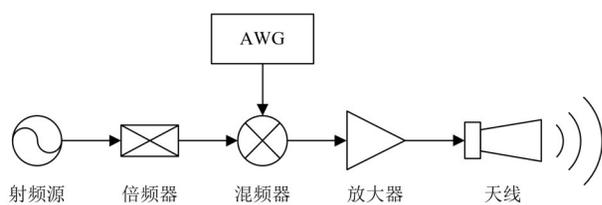


图 1 纯电子器件产生太赫兹信号的发射端结构

Fig. 1 Structure of terahertz signal transmitter based on electronic components

近年来, 纯电子方式产生太赫兹信号的技术不断成熟, 载波频谱不断提高。2004~2006 年, 日本 NTT 公司利用 InP mHEMT TMIC 技术实现了全电子学 0.12 THz 的通信系统^[26], 太赫兹信号由 15.625 GHz 信号源经 8 倍频实现。2008 年奥运期间, NTT 公司利用该系统完成了赛事的直播演示。2011 年, 德国固态物理研究所 (IAF) 实现了在 InP mHEMT TMIC 上的纯电子学 0.22 THz 通信系统^[27], 将发射

端集成在 TMIC 芯片上, 并实现了 OOK 和 QAM 两种调制格式信号的传输。此外, 美国贝尔实验室于 2011 年使用全电子学方式实现了载频高达 625 GHz 的太赫兹通信系统^[28]。目前已知的纯电子太赫兹通信系统常用手段主要为强度调制和低阶 QAM 调制, 频谱利用率较低。

2 OFDM 技术及概率整形技术

2.1 概率整形技术

星座整形 (CS, Constellation Shaping) 技术是一种在通信领域的先进技术。通过优化发射信号的信号星座结构, 可以提高通信系统容量, 使其逼近香农信道容量。星座整形技术可大致分为概率整形和几何整形 (GS, Geometric Shaping) 两种^[29]。几何整形技术保持各星座点的概率相等, 并改变星座点间的间距。相反地, 概率整形技术在保持星座点位置不变的基础上, 改变星座点出现的概率, 使其满足非均匀分布, 从而提高通信性能。概率整形通常减小外圈星座点出现的概率, 导致平均发射功率的减小。因此, 在给定固定发射功率的情况下, 经过概率整形后的星座点间最小欧氏距离增大, 从而有效地延长传输距离。

通常地, 在加性高斯白噪声信道中, Maxwell-Boltzmann 分布能够使 QAM 调制信号一定功率限制下的传输互信息达到最大, 并逼近信道容量^[30]。Maxwell-Boltzmann 分布方程如式 (1) 所示:

$$P_X(x_i) = \frac{e^{-v|x_i|^2}}{\sum_{x_j \in \mathcal{X}} e^{-v|x_j|^2}}, x_i \in \mathcal{X}, \quad (1)$$

其中, $\mathcal{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ 是 M 阶 QAM 的 M 个星座点构成的集合, v 为 Maxwell-Boltzmann 分布参数。 v 越大, 则整形增益越大。通常, 分布匹配器 (DM, Distribution Matcher) 将均匀分布的二进制比特序列映射成具有一定概率分布的信号。2015 年, P. Schulte 和 G. Böcherer 提出了固定组成分布匹配器 (CCDM, Constant Composition Distribution Matcher) 编码技术, 利用算数编码的方法, 使发射信号更能适应信道特性^[31]。

2.2 OFDM-DMT 技术

OFDM 技术可经过串并转换, 将一个高速数据流拆分成多个并行的低速数据流, 使其在不同的子载波上传输。这些子载波在频率上彼此重叠, 但相互正交, 彼此之间不会产生干扰。相对于单载波调制, OFDM 技术具有较高的频带利用率和抗干扰特

性。DMT技术通常可运用于OFDM技术中。DMT的原理图如图2所示。通过在子载波中加入有效子载波数据的共轭对称信号,并做傅里叶逆变换(IFT, Inversed Fast Discrete Fourier Transform),可以将I/Q两路的OFDM信号转换得到实数信号,因此支持强度调制直接检测(IM/DD, Intensity Modulation with Direct Detection),无需进行I/Q两路的调制和相干接收。DMT技术具有较高的实用性。



图2 DMT原理图

Fig. 2 Schematic diagram of DMT

DMT技术在保留OFDM自身优势的情况下,可独立且灵活调制各个子载波,并可结合高阶调制技术提升系统容量^[32]。OFDM-DMT的原理图如图3(a)所示。

2.3 DFT-S技术

DFT-S技术可有效抑制OFDM信号的包络起伏,相比于传统的OFDM通信具有更低的峰均比(PAPR, Peak to Average Power Ratio),可有效降低平均发射功率,对于非线性效应的容忍度更高^[33-34]。这些优点使其可以有效降低终端设备的成本和实现复杂度。DFT-S DMT的OFDM结构原理如图3(b)所示。DFT-S技术在IFFT变换前对信号进行离散傅里叶变换(DFT, Discrete Fourier Transform)将时域的调制信号转换至频域,再通过IFFT转换为时域信号。因此,DFT-S-OFDM系统具有单载波信号的特性。

3 PS-16QAM OFDM-DMT信号传输

本文通过基于纯电子的300 GHz太赫兹通信系

统实现了16QAM和PS-16QAM的OFDM-DMT的1 m无线传输,其原理和实验系统如图4所示。射频信号源发射频率为12.5 GHz的6.70 dBm射频信号,通过24倍频后,转换成频率为300 GHz的太赫兹频段信号。随后,太赫兹信号将经过混频器与波形发生器(AWG, Arbitrary Waveform Generator)产生的OFDM数字信号进行混频,随后由天线发射至无线信道。对角天线增益为25 dBi,输出的太赫兹最大信号为-8 dBm。无线信道长度为1 m,其中放置两个15 dBi增益的10 cm平凸透镜并对准太赫兹信号,使接收端接收到的信号功率最大化。

接收端通过25 dBi的标准喇叭天线接收无线信号,接收方式为外差式相干接收。本振信号源产生频率为12.21 GHz的4.00 dBm信号,通过24倍频转换为频率约为293.04 GHz的电信号,并与接收信号进行混频。混频后信号经过电放大器(EA, Electric Amplifier)放大,最后被采样率为40 GSa/s的示波器捕获,并进行离线数字信号处理和性能分析。

OFDM-DMT信号的数字信号处理首先进行下变频操作。以12 GBaud的PS-16QAM接收信号为例,其频谱如图5所示。信号有效带宽约为5 GHz,其中,傅里叶变换点数为1024,共有400个有效子载波。由于器件的不理想性,信号在有效带宽高频处约有10 dB的衰减。因此,需要通过数字信号处理算法进行信号恢复。根据中频频率进行下变频后,进行下采样和信号同步。在完成串并转换、去循环前缀和FFT变换后,采用最小二乘法(LS, Least Square)将误差估计转换为简单的最小二乘问题进行信道估计^[35]。OFDM-DMT信号共有15帧,其中3帧为训练序列。最后对信号进行判决,计算误码率和归一化广义互信息量(NGMI, Normalized Generalized Mutual Information)特性。

本文研究了不同传输速率下PS-16QAM和

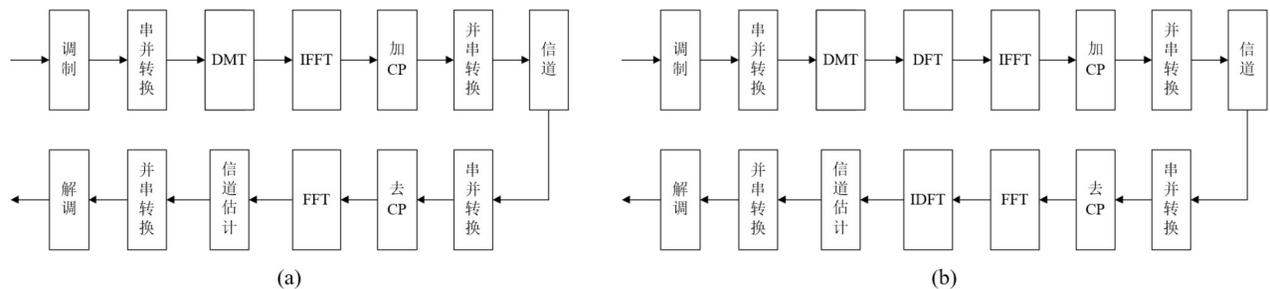


图3 OFDM系统原理图:(a) OFDM-DMT原理图;(b) DFT-S OFDM-DMT原理图;

Fig. 3 Schematic diagram of OFDM system: (a) schematic diagram of OFDM-DMT system; (b) schematic diagram of DFT-S OFDM-DMT system

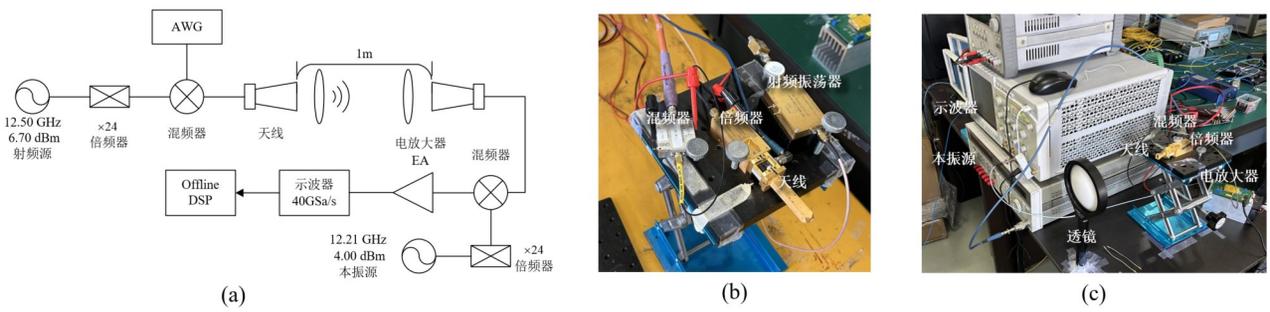


图 4 300 GHz OFDM-DMT 信号的太赫兹无线 1 m 传输装置:(a) 300 GHz 太赫兹传输系统原理图;(b) 300 GHz 太赫兹发射端装置;(c) 300 GHz 太赫兹接收端装置;

Fig. 4 300 GHz terahertz transmission structure of OFDM-DMT wireless signals with a distance of 1 m: (a) schematic diagram of 300 GHz terahertz transmission system; (b) transmitter devices of the 300 GHz terahertz system; (c) receiver devices of the 300 GHz terahertz system

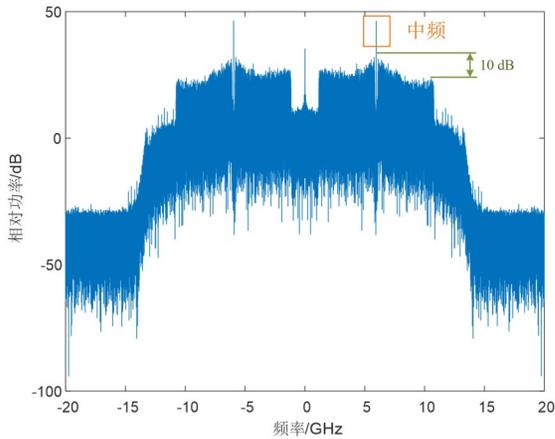


图 5 PS-16QAM OFDM-DMT 接收频谱

Fig. 5 Spectrum of a PS-16QAM OFDM-DMT signal at the receiving end

16QAM 的 OFDM-DMT 信号的 BER 和 NGMI 特性。系统采用的 PS-16QAM 的概率整形增益满足 $v = 0.2$ 的 Maxwell-Boltzmann 分布参数。信源熵计算公式如式(2)所示:

$$H(A) = \sum_{i=1}^M -P_X(x_i) \cdot \log_2(P_X(x_i)) \quad , \quad (2)$$

相较于传统均匀分布 16QAM 信号的 4 bit 信源熵, PS-16QAM 信源熵为 3.306 bit, 其概率分布图如图 6 所示。图 7 为 PS-16QAM 和 16QAM 的误码率特性曲线。当传输速率增大时, PS-16QAM 和 16QAM 误码率均随之升高, 但 PS-16QAM 在相同波特率下所需较小的净比特速率, 具有较好的传输性能。

PS-16QAM 和 16QAM 的 NGMI 特性曲线如图 8 所示。在传输速率小于 5 GBaud 且信号长度为 19200 bit 时, 调制格式为 16QAM 和 PS-16QAM 的 OFDM-DMT 信号误码个数均为 0, 而由于 16QAM 信

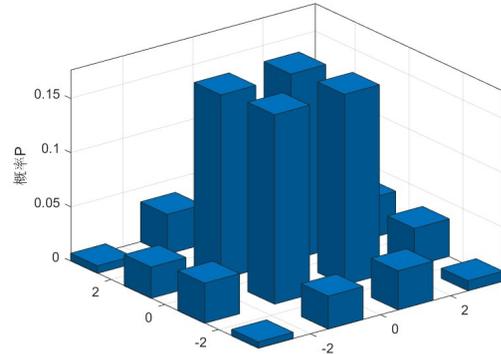


图 6 PS-16QAM 概率分布图

Fig. 6 Probability distribution of PS-16QAM signals

号信息量大于 PS-16QAM 信号, 因此在低速时, 16QAM 信号的 NGMI 略高。当传输速率高于 5 GBaud 时, PS 技术在 16QAM 调制格式的 OFDM-DMT 信号上具有明显的性能优势。

4 PS-64QAM DFT-S-OFDM-DMT 信号传输

PS-64QAM DFT-S-OFDM-DMT 传输装置同如图 4 所示。该 OFDM 系统中, 傅里叶变换点数为 1024, 有效子载波数为 400。OFDM 有效帧数为 11 帧, 训练符号共 3 帧。DFT-S 技术体现为在 IFFT 变换前添加了点数为 400 的 DFT 变换, 并在接收端的 FFT 变换后相应地增加点数为 400 的 IDFT 变换。PS-64QAM 的概率整形增益满足参数 $v = 0.0314$, 即信源熵为 5.642 bit, 其概率分布如图 9 所示。

图 10 给出了在不同传输速率下 PS-64QAM 在添加 DFT-S 技术和未添加两种情况下的误码率特性曲线。当通信速率提高时, 添加 DFT-S 技术的 PS-64QAM 的 OFDM-DMT 信号传输优势愈发明显。

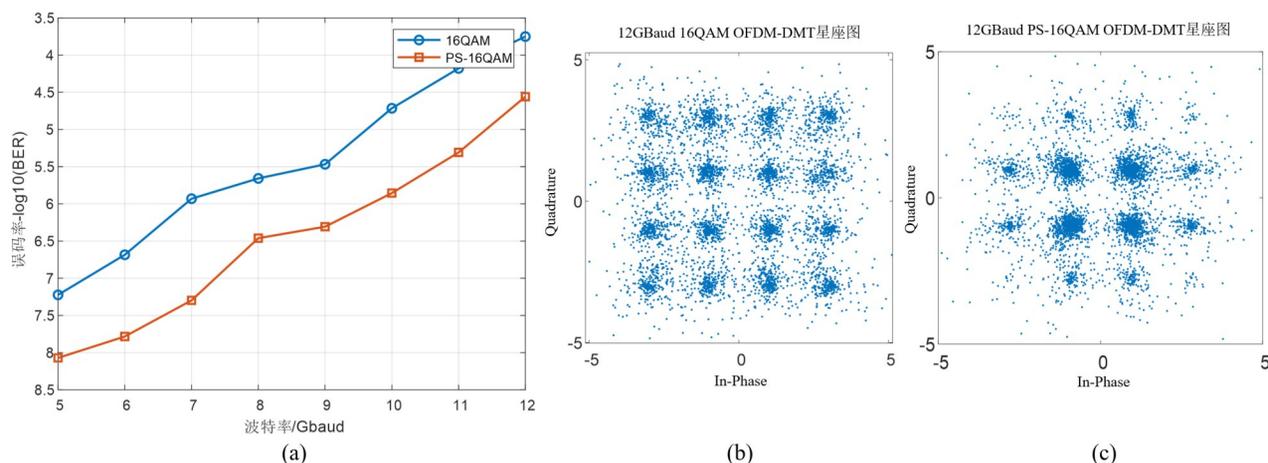


图 7 PS-16QAM 和 16QAM 误码率特性曲线及星座图: (a) PS-16QAM 和 16QAM 误码率特性曲线; (b) 12 GBaud 16QAM OFDM-DMT 信号经数字信号处理后的星座图; (c) 12 GBaud PS-16QAM OFDM-DMT 信号经数字信号处理后的星座图;
Fig. 7 Constellation and BER versus data rate of PS-16QAM and 16QAM signals: (a) BER versus data rate of PS-16QAM and 16QAM signals; (b) constellation of 12 GBaud 16QAM OFDM-DMT signal after DSP; (c) constellation of 12 GBaud PS-16QAM OFDM-DMT signal after DSP

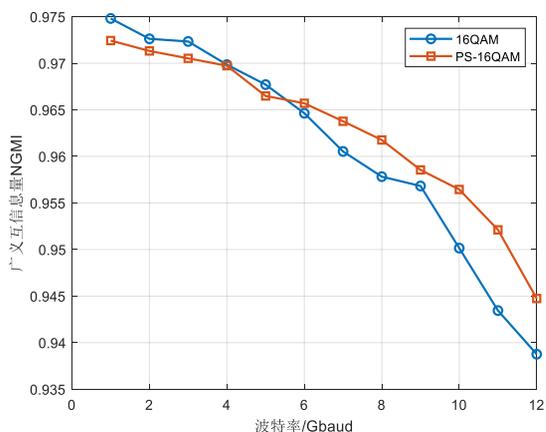


图 8 PS-16QAM 和 16QAM 信号的 NGMI 特性曲线
Fig. 8 NGMI versus data rate of PS-16QAM and 16QAM signals

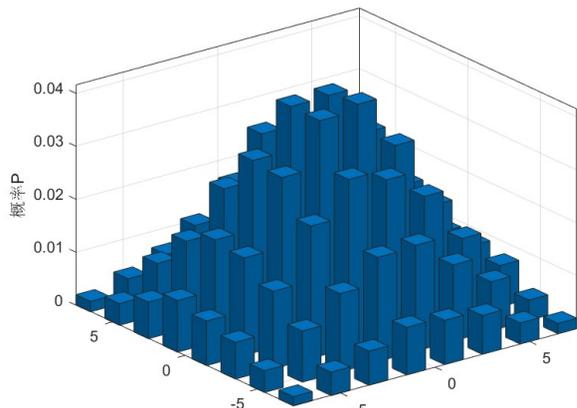


图 9 PS-64QAM 概率分布图
Fig. 9 Probability distribution of PS-64QAM signals

此外,两种信号的 NGMI 特性曲线如图 11 所示。总体而言,当传输速率高于 2 GBaud 时,添加 DFT-S 技术的 PS-64QAM 调制格式信号在 OFDM-DMT 系统中的 NGMI 特性优于未加 DFT-S 技术的信号。

5 结语

本文通过基于纯电子器件的 300 GHz 太赫兹通信系统实现了高阶调制格式的 OFDM-DMT 的无线 1 m 传输,并创造性地将 PS 和 DFT-S 技术运用于纯电学太赫兹系统中。结合多载波数字信号处理技术,分别实现了波特率达到 12 GBaud、净速率为 12.022 Gbit/s、频谱效率为 2.645 bit/(s·Hz) 的 PS-16QAM 的 OFDM-DMT 信号传输,以及波特率为 10 GBaud、净速率为 16.792 Gbit/s、频谱效率为 4.433 bit/(s·Hz)、调制格式为 PS-64QAM 的 DFT-S OFDM-DMT 信号 1 m 无线传输,并验证了在该太赫兹系统中 PS 和 DFT-S 技术的性能优势。

References

[1] YU J J. Broadband terahertz communication technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018. (余建军. 宽带太赫兹通信技术)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
[2] PENG Z Y, LI W. AUKF-based beam tracking algorithm in Millimeter-Wave mobile communication [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, **40**(3): 334-340. (彭章友, 李文. 毫米波移动通信中基于 AUKF 的波束跟踪算法[J]. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(3): 334-340.
[3] HAN K W, YANG M H, Sun Y, et al. Millimeter-wave

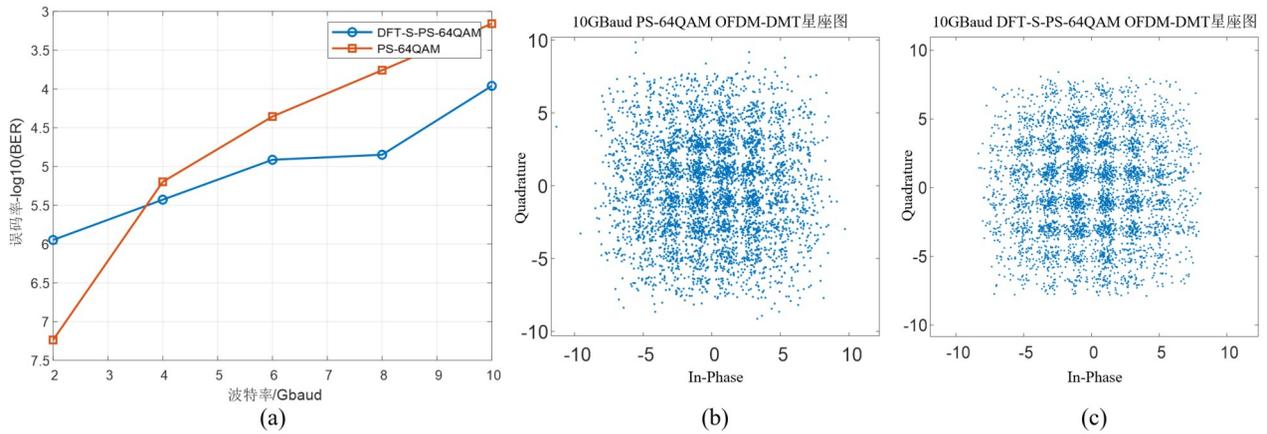


图 10 DFT-S PS-64QAM 和 PS-64QAM 误码率特性曲线及星座图:(a) DFT-S PS-64QAM 和 PS-64QAM 误码率特性曲线;(b) 10 GBaud PS-64QAM OFDM-DMT 信号经数字信号处理后的星座图;(c) 10 GBaud DFT-S PS-64QAM OFDM-DMT 信号经数字信号处理后的星座图;

Fig. 10 Constellation and BER versus data rate of DFT-S PS-64QAM and PS-64QAM signals; (a) BER versus data rate of DFT-S PS-64QAM and PS-64QAM signals; (b) constellation of 10 GBaud PS-64QAM OFDM-DMT signal after DSP; (c) constellation of 10 GBaud DFT-S PS-64QAM OFDM-DMT signal after DSP

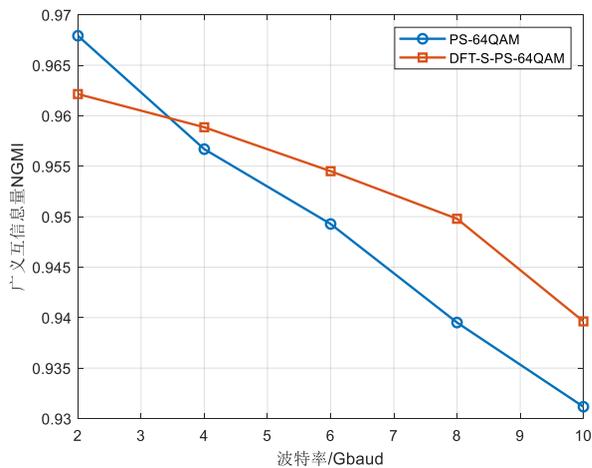


图 11 DFT-S PS-64QAM 和 PS-64QAM NGMI 特性曲线

Fig. 11 NGMI versus data rate of DFT-S PS-64QAM and PS-64QAM signals

vector modulator and its application in active phased array antenna[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (韩克武, 杨明辉, 孙芸, 等. 毫米波矢量调制器及其在有源相控阵天线中的应用[J]. *红外与毫米波学报*), 2011, **30** (5): 425-428.

- [4] CHEN X, YANG Q, ZENG Y, *et al.* A millimeter-wave fast imaging algorithm with range compensation for one-stationary bistatic SAR [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (陈旭, 杨琪, 曾咏, 等. 一端固定的双站 SAR 体制下基于距离补偿的毫米波快速成像算法[J]. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(1): 294-298.
- [5] YU J J, ZHOU W, WANG X Y, *et al.* Photonics-aided broadband terahertz communication technology [J]. *Journal on Communications* (余建军, 周雯, 王心怡, 等. 光子辅助的宽带太赫兹通信技术[J]. *通信学报*), 2022, **43**

(1): 11-23.

- [6] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 97-105.
- [7] SHI J T, YU J J, ZHANG J, *et al.* 65, 536-QAM OFDM signal transmission over a fiber-THz system at 320 GHz with delta-sigma modulation [J]. *Optics Letters*, 2023, **48** (8): 2098-2101.
- [8] CHO J, CHANDRASEKHAR S, RAYBON G, *et al.* High Spectral Efficiency Optical Transmission with Probabilistic Constellation Shaping: 2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), 2018 [C]. Jeju Island: [s.n.], 2018: 1-2.
- [9] XIE T Y, YU J G, ZHOU W. Photonics-aided 335 GHz PS-64QAM wireless transmission over 200 m employing complex-valued NN classification and random sampling techniques [J]. *Optics Express*, 2023, **31** (6): 10333-10347.
- [10] NAKAMURA M, KOBAYASHI T, YAMAZAKI H, *et al.* Entropy and Symbol-rate Optimized 120 GBaud PS-36QAM Signal Transmission over 2 400 km at Net-rate of 800 Gbps/λ: Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, 2020 [C]. San Diego: OSA Technical Digest, 2020: M4K.3.
- [11] JIA S, ZHANG L, WANG S W, *et al.* 2×300 Gbit/s Line Rate PS-64QAM-OFDM THz Photonic-Wireless Transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, **38** (17): 4715-4721.
- [12] KONG M, SHI J T, SANG B H, *et al.* 800-Gb/s/carrier WDM Coherent Transmission Over 2 000 km Based on Truncated PS-64QAM Utilizing MIMO Volterra Equalizer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, **40** (9): 2830-2839.
- [13] ZHANG L, CHEN Z F, ZHANG H Q, *et al.* Hybrid fiber-THz fronthaul supporting up to 16384-QAM-OFDM with the delta-sigma modulation [J]. *Optics Letters*, 2022,

- 47(17): 4307–4310.
- [14] SAWADOGO B A, BANDYOPADHYAY A, ZEGAOUI M, *et al.* 100 Gbit/s THz Data Transmission and Beyond using Multicore Fiber Combined with UTC Photodiode Array: Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, 2022 [C]. San Diego: Technical Digest Series, 2022; Th2A.26.
- [15] ARMSTRONG J. OFDM for Optical Communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27** (3): 189–204.
- [16] 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.
- [17] REN J X, LIU B, ZHAO D L, *et al.* Chaotic constant composition distribution matching for physical layer security in a PS-OFDM-PON [J]. *Optics Express*, 2020, **28** (26): 39266–39276.
- [18] TAO L, YU J J, YANG Q, *et al.* Spectrally efficient localized carrier distribution scheme for multiple-user DFT-S OFDM RoF-PON wireless access systems [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(28): 29665–29672.
- [19] SHI J Y, ZHANG J W, ZHOU Y J, *et al.* Transmission Performance Comparison for 100-Gb/s PAM-4, CAP-16, and DFT-S OFDM With Direct Detection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(23): 5127–5133.
- [20] ZHAO L, WANG K H, ZHOU W. Transmission of 4096-QAM OFDM at D-band [J]. *Optics Express*, 2023, **31** (2): 2270–2281.
- [21] YU X B, LYU Z D, LI L Y, *et al.* Waveform design and signal processing for terahertz integrated sensing and communication [J]. *Journal on Communications* (余显斌, 吕治东, 李涟漪, 等. 太赫兹感知通信一体化波形设计与信号处理 [J]. *通信学报*), 2022, **43**(2): 76–88.
- [22] ZHANG J, TONG W D, ZHU M, *et al.* Research and prospect of terahertz wireless and wired fusion communication technology [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology* (张教, 童伟东, 朱敏等. 太赫兹无线和有线融合通信技术的研究与展望 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*), 2023, **21**(01): 22–29.
- [23] ZHANG L, QIAO M, WANG S, *et al.* Nonlinearity-aware optoelectronic terahertz discrete multitone signal transmission with a zero-bias diode [J]. *Optics Letters*, 2020, **45**(18): 5045–5048.
- [24] DENG H Z, ZHANG H Q, ZHANG L, *et al.* Terahertz photonic communication technologies [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology* (邓秋卓, 张红旗, 张鹿, 等. 光子太赫兹通信技术 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*), 2022, **20**(08): 790–803.
- [25] ZHAO M M, YU J J. Terahertz communication system: present and outlook [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology* (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**(06): 4–10.
- [26] HIRATA A, KOSUGI T, TAKAHASHI H, *et al.* 5.8 km 10 Gbps data transmission over a 120 GHz-band wireless link: 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, 2010 [C]. Honolulu: [s.n.], 2010: 1–4.
- [27] KALLFASS I, ANTES J, SCHNEIDER T, *et al.* All Active MMIC-Based Wireless Communication at 220 GHz [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2011, **1**(2): 477–487.
- [28] MOELLER L, FEDERICI J, SU K. 2.5 Gbit/s duobinary signalling with narrow bandwidth 0.625 terahertz source [J]. *Electronics Letters*, 2011, **47**(15): 856–858.
- [29] ZHANG Y C, CHEN J, ZHAO M X, *et al.* Geometric Probability Shaping in Coherent Optical Communication System [J]. *Acta Optica Sinica* (张一尘, 陈健, 赵梦鑫, 等. 相干光通信系统中的几何概率整形研究 [J]. *光学学报*), 2023, **43**(19): 67–73.
- [30] KSCHISCHANG F R, PASUPATHY S. Optimal nonuniform signaling for gaussian channels [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1993, **39**(3): 913–929.
- [31] SCHULTE P, BÖCHERER G. Constant Composition Distribution Matching [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, **62**(1): 430–434.
- [32] LI F, YU J J, CAO Z Z, *et al.* Experimental Demonstration of Four-Channel WDM 560 Gbit/s 128QAM-DMT Using IM/DD for 2-km Optical Interconnect [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(4): 941–948.
- [33] LU G Y, SHAO C, ZHOU Q. Novel distortionless PAPR reduction scheme for OFDM system [J]. *Journal on Communications* (卢光跃, 邵朝, 周詮. OFDM系统新的无损峰均值比降低方案 [J]. *通信学报*), 2005, **26**(8): 51–56.
- [34] CHEN X, LI A, GAO G J, *et al.* Experimental demonstration of improved fiber nonlinearity tolerance for unique-word DFT-spread OFDM systems [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(27): 26198–26207.
- [35] QI L, SU W B, SHI Z L. Exact maximum likelihood error estimation algorithm in MMW/IR imaging system [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (亓琳, 苏文博, 史泽林. 毫米波/红外成像系统中的精确极大似然误差估计算法 [J]. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(5): 372–377.