

文章编号: 2095-4980(2024)12-1313-07

直接检测的全电子 THz 无线系统中混合 PGS 设计

韩 扬^{a,b,c}, 田 鹏^{a,b,c}, 王明旭^{a,b,c}, 谭景文^{a,b,c}, 徐思聪^{a,b,c}
张 冰^{a,b,c}, 魏 怡^{a,b,c}, 杨雄伟^{a,b,c}, 余建军^{a,b,c}

(复旦大学 a. 信息科学与工程学院; b. 电磁波信息科学教育部重点实验室; c. 集成电路与系统全国重点实验室, 上海 200433)

摘要: 太赫兹通信由于具有极大的带宽已成为当前的研究热点, 在太赫兹系统中进一步提升系统容量也成为了值得探究的问题。本文利用混合概率和几何整形(PGS)的方案对全电子元件构成的太赫兹系统进行优化, 使用成对优化(PO)算法对完成概率整形(PS)后的 16 阶正交幅度调制(PS-16QAM)的星座点进行位置调整, 获得所需的混合概率和几何整形的 16 阶正交振幅调制(PGS-16QAM)信号。通过测试 PS-16QAM、几何整形后的 16 阶正交幅度调制(GS-16QAM)和 PGS-16QAM 在不同净速率下对 16QAM 的优化, 验证了混合 PGS 具有最佳的优化效果。实验证明, 当无线传输距离设置为 2 m、NGMI 阈值设置为 0.92 时, PGS-16QAM 相较于传统的 16QAM、PS-16QAM 和 GS-16QAM, 净传输速率分别提升了 15.6%、11.8% 和 3.8%。

关键词: 太赫兹; 概率整形; 几何整形; 混合概率和几何整形; 成对优化; 归一化广义互信息

中图分类号: TN928

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024364

Design of hybrid probabilistic and geometric shaping in all-electronic THz wireless system with direct detection

HAN Yang^{a,b,c}, TIAN Peng^{a,b,c}, WANG Mingxu^{a,b,c}, TAN Jinwen^{a,b,c}, XU Sicong^{a,b,c}
ZHANG Bing^{a,b,c}, WEI Yi^{a,b,c}, YANG Xiongwei^{a,b,c}, YU Jianjun^{a,b,c}

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

Abstract: Terahertz communication has become a current research hotspot due to its extremely large bandwidth, and further improving the system capacity in terahertz systems has also become a problem worth exploring. This paper optimizes the terahertz system composed of all-electronic components using a hybrid Probability and Geometric Shaping(PGS) scheme. The Pairwise Optimization (PO) algorithm is employed to adjust the Probabilistically Shaped 16-ary Quadrature Amplitude Modulation(PS-16QAM) signal after probabilistic shaping to obtain the desired hybrid PGS-16QAM signal. By testing the optimization effects of PS-16QAM, Geometric Shaping(GS)-16QAM and PGS-16QAM on uniform 16QAM at different net rates, it is verified that the hybrid shaping has the best optimization effect. When the wireless transmission distance is set to 2 meters and the Normalized Generalized Mutual Information(NGMI) experiments have shown that threshold is set to 0.92, PGS-16QAM achieves a net transmission rate increase of 15.6%, 11.8%, and 3.8% compared to traditional 16QAM, PS-16QAM, and GS-16QAM, respectively.

Keywords: terahertz; Probabilistic Shaping(PS); Geometric Shaping(GS); Pairwise Optimization; hybrid Probability and Geometric Shaping(PGS); Normalized Generalized Mutual Information(NGMI)

随着通信技术的不断进步, 传统使用的频段已经饱和, 因此需要探索和开发更高的频段, 特别是太赫兹频段。太赫兹的频率范围为 0.1~10 THz, 巨大的带宽为未来的通信技术带来了新的希望。利用太赫兹通信可将数

收稿日期: 2024-07-24; 修回日期: 2024-10-29

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

据传输速率提高至数百 Gbps, 这一速率将大大超过当前一代无线通信技术所能实现的速率^[1-3]。目前产生太赫兹信号的方法基本上可分为两类: 基于电子系统和基于光子系统。光子太赫兹无线通信系统基于微波光子学, 将需要传输的电信号通过直接或间接调制传输到光域, 经光纤传输和补偿后输入光探测器, 通过光学像差产生太赫兹波, 再通过太赫兹天线将信号辐射到自由空间进行传输^[4-6]。单行载流子光电二极管(Uni-Traveling Carrier Photodiode, UTC-PD)是常用的太赫兹信号辐射源^[7], 但 UTC-PD 能量损失大, 转换效率低, 限制了太赫兹信号的长距离传输。采用电子元件的太赫兹系统可以产生更高功率的太赫兹信号, 实现更长距离的太赫兹无线传输, 并在单片可集成性和量产的潜力方面比基于光子的方法更成熟^[8]。对于基于电子学的方法, 太赫兹信号可通过一些电子设备直接产生, 如集成电路振荡器、谐振隧道二极管, 或通过倍增器对低频毫米波信号进行倍频等。2024 年, 复旦大学在 300 GHz 的纯电子元件的太赫兹系统中实现了 100 m 的信号传输^[9]。

近年来, 星座整形技术作为一种可接近香农极限的技术受到了广泛关注。P Schulte 提出的恒定分量分布匹配器(Constant Component Distribution Matcher, CCDM)可将随机序列转换为符合特定概率分布的序列, 并以可逆的方式实现这种转换^[10]。相应地, 还有多种几何整形方案可按照几何图案或通过算法优化移动星座点^[11-13]。将概率整形(PS)和几何整形(GS)技术相结合可进一步缩小传输系统容量与香农极限的差距^[14], 目前已提出的方案有使用标签标注和菱形调制的混合整形方法^[15]和使用 PS 与广义成对优化(PO)算法相结合的混合整形方法^[16]等。

本实验采用纯电子元件的太赫兹系统, 对比搭载 16QAM、PS-16QAM、GS-16QAM 和 PGS-16QAM 的离散傅里叶变换扩展离散多音(Discrete Fourier Transform-Spread Discrete Multi-Tone, DFTs-DMT)调制信号, 验证 PGS 技术对传输速率的优化效果。

1 理论分析

1.1 DFTs-DMT

DFTs-DMT 的算法流程图如图 1 所示, 其中图 1(a)为发送端的数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)算法, 图 1(b)为接收端的 DSP 算法, N 为传输的符号数。

在发射机处, 数据被映射到生成的标准 16QAM、PS-16QAM、GS-16QAM 和 PGS-16QAM 星座图上。离散傅里叶变换(DFTs)扩展算法用于抑制离散多音调制(DMT)中过高的峰均功率比。每个 DMT 符号通过 400 个有效子载波进行信号传输, 另有 4 个子载波专用于导频信号传输。为满足直流偏移和过采样的要求, 其余 108 个子载波被设定为零。整个系统采用共轭对称处理, 最终形成 1 024 个子载波。为防止码间干扰, 在数据串的开头附加一个 16 位循环前缀(Cyclic Prefix, CP)。因此, 在 5 GBaud 速率下传输 DMT-16QAM 和 DMT-GS-16QAM, 当软判决开销为 10% 时, 计算得出的净传输码率为 $5 \times 4 \times 90\% \times 400 / (1\ 024 \times 1\ 024 / (1\ 024 + 16)) = 6.923$ Gb/s。

接收端的 DSP 算法包括 CP 去除、DFTs 解调、信道估计、 N 点快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)、决策导向的最小均方(Decision-Directed Least Mean Square, DD-LMS)算法均衡、解映射, 最后计算 NGMI 评估接收信号的性能。本文的信道估计采用计算复杂度低、实用性强的迫零均衡算法。

1.2 概率整形

PS 信号的概率分布通常按照麦克斯韦-玻尔兹曼分布设定, 表示为:

$$P_X(x) = \frac{e^{-vx^2}}{\sum_{k=1}^M e^{-vx_k^2}} \quad (1)$$

式中: X 为星座图上可能的点集合; x 为具体的符号值; M 为 16QAM 星座图中的符号总数; v 为整形因子。通过 CCDM 得到具有概率分布性质的序列, 出于对优化性能与传输效率的折中考虑, 本文将 PS 的整形因子 v 设置为 0.1, 此时 PS-16QAM 的概率分布如图 2 所示。当整形因子 v 取 0.1 时, PS-16QAM 对应的信息熵为 3.786 4 比特每符号, 而 16QAM 的信息熵为 4 比特每符号。这意味着在相同波特率下, PS-16QAM 的净速率会低于 16QAM。因

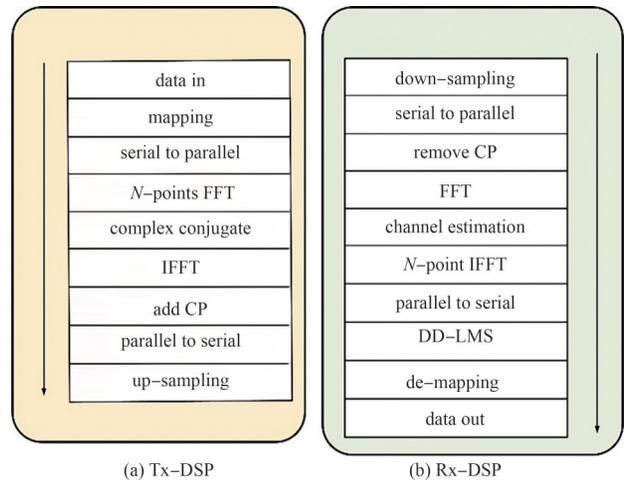


Fig.1 Flowchart of offline DSP algorithm

图1 离线 DSP 算法流程图

此，在实验中对比 PS-16QAM 与其他调制格式的性能时，应将 PS-16QAM 的传输波特率乘以二者信息熵的比值(1.056 4)，使净速率相等。

1.3 几何整形

在几何整形中，采用 PO 算法迭代最优星座点，以 NGMI 为优化目标。在该算法中，保持所有星座点的能量总和为常数，并保持各点的向量总和为 0。表达式如下：

$$\sum_{k=1}^M S_k = 0 \text{ and } \sum_{k=1}^M \|S_k\|^2 = E \quad (2)$$

式中： S_k 为星座点的复数表达式； E 为符号能量和。NGMI 为归一化的广义互信息 (Generalized Mutual Information, GMI)，GMI 计算公式为：

$$I_{GM} = H + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \log_2 \frac{\sum_{x \in \chi_{b_{k,i}}} q_{Y|X}(y_k|x) P_X(x)}{\sum_{x \in \chi} q_{Y|X}(y_k|x) P_X(x)} \quad (3)$$

式中： H 为发射信号的信息熵； x 、 y 分别为发射和接收信号， y_k 为第 k 个接收信号； N 为信号总数， m 为每个波特可包含的比特数； χ 为 QAM 星座点集合； $b_{k,i}$ 为第 k 个发射符号的第 i 位比特； $\chi_{b_{k,i}}$ 为 QAM 星座图中第 i 位置上映射的比特为 $b_{k,i}$ 的所有星座点的集合；发射信号 x 时，接收信号 y 的条件概率为：

$$q_{Y|X}(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|y-x|^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

式中： σ^2 为噪声的方差； $Y|X$ 为当发送信号为 x 时，接收到信号 y 的条件概率密度的合集。

NGMI 可用 GMI 表示，对于均匀 QAM， $I_{NGM} = I_{GM}/m$ ；但对于概率整形信号，由于每一位数据所携带的信息发生了变化，因此计算 NGMI 时，计算公式也需做相应调整：

$$I_{NGM} = 1 - \frac{E(H) - E(I_{GM})}{E(m)} \quad (5)$$

由于在 Matlab 中使用优化函数寻找最小值，将最大化 NGMI 修改为最小化 -NGMI 即可。由此上述完整的优化算法可表示为：

$$\begin{cases} \text{minimize } -\text{NGMI} \\ \text{subject to } \sum_{k=1}^M S_k = 0 \text{ and } \sum_{k=1}^M \|S_k\|^2 = E \end{cases} \quad (6)$$

本算法中随机选取 2 个不同的星座点，在 2 个条件的约束下，通过调整星座点的位置使 NGMI 最大化，然后再选取 2 个随机点重复优化过程。在这个迭代过程中，NGMI 的值会缓慢波动上升，直至趋近于一个稳定值，选取稳定值处的星座图作为迭代后的星座图。通过 PO 算法得到的 GS-16QAM 最终星座图如图 3 所示。

1.4 混合 PGS

混合 PGS 技术结合了 PS 和 GS 两种算法的优点，即先进行概率整形，后进行几何整形。PGS 使用 PO 算法基于 PS 星座图迭代改进星座点，产生具有唯一概率分布的几何形状星座图。将数据输入 CCDM，使数据具有设定的概率分布，然后根据零和限制、能量不变限制调整此几何形状的星座图。由于已执行了概率整形，因此应相应地调整零和条件和平均能量不变条件。

$$\sum_{k=1}^M S_k P_X = 0 \text{ and } \sum_{k=1}^M \|S_k\|^2 P_X = E_{\text{avg}} \quad (7)$$

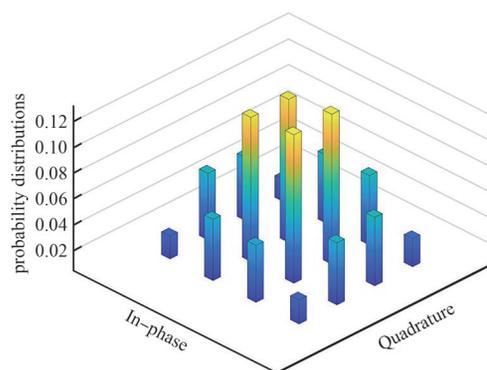


Fig.2 Probability distribution of the PS-16QAM
图2 PS-16QAM 的概率分布图

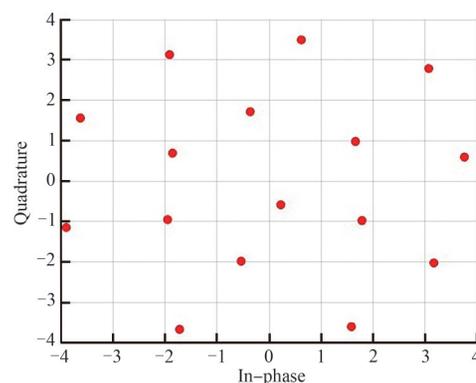


Fig.3 Constellation diagram of the GS-16QAM
图3 GS-16QAM 的星座图

混合 PGS 的完整优化算法可表示为：

$$\begin{cases} \text{minimize } -\text{NGMI} \\ \text{subject to } \sum_{k=1}^M S_k = 0 \text{ and } \sum_{k=1}^M \|S_k\|^2 = E_{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

当整形因子 ν 取 0.1 时，迭代得到的星座图如图 4 所示，对应的概率分布如图 5 所示。同样，由于 PS 的存在，信息熵有所下降，因此在计算 PGS-16QAM 的净速率时，也需乘以这 2 个信息熵之比(即 1.056 4)，通过控制波特率的大小使净速率相同。

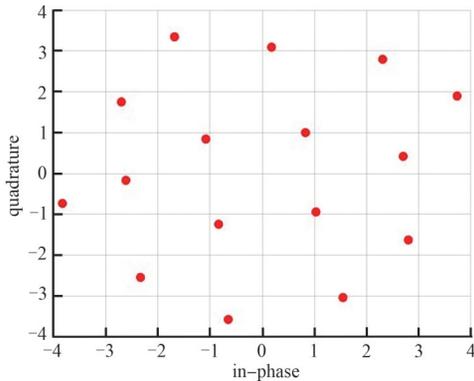


Fig.4 Constellation diagram of the PGS-16QAM
图 4 PGS-16QAM 的星座图

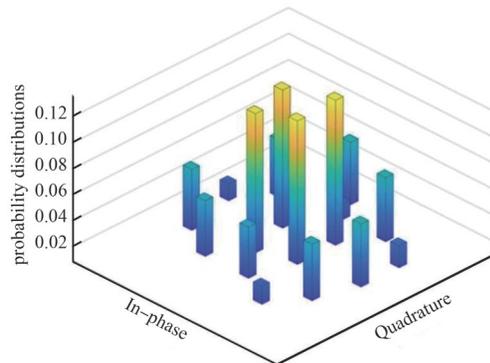


Fig.5 Probability distribution of the PGS-16QAM
图 5 PGS-16QAM 的概率分布图

1.5 虚拟光子集成(Virtual Photonic Integration, VPI)仿真结果

利用 VPI 仿真软件，对整形星座图和 16QAM 进行对比分析。在光纤长度为 30 km 的情况下，研究不同传输速率、不同光信噪比(Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR)下传输信号的 NGMI。当 OSNR 为 17 dB 时，不同传输速率与对应的 NGMI 之间的关系如图 6 所示。同样，当传输净速率为 6.92 Gb/s 时，不同 OSNR 与对应的 NGMI 之间的关系如图 7 所示。

从图 6~图 7 可以看出，PGS-16QAM 在仿真中起到了明显的优化效果，PGS-16QAM 的 NGMI 值均高于其他 3 个，而 GS-16QAM 优于 PS-16QAM，未调整的 16QAM 表现最差。这种差异在低 OSNR 和高速率下更为明显。

当软判决开销设为 10%，NGMI 的前向纠错门限为 0.92^[7]时，此时以 16QAM 为参考，PS-16QAM、GS-16QAM、PGS-16QAM 的净速率分别提升 22.3%、46.3%、58.2%，同时光信噪比分别优化 0.48 dB、1.15 dB、1.55 dB。

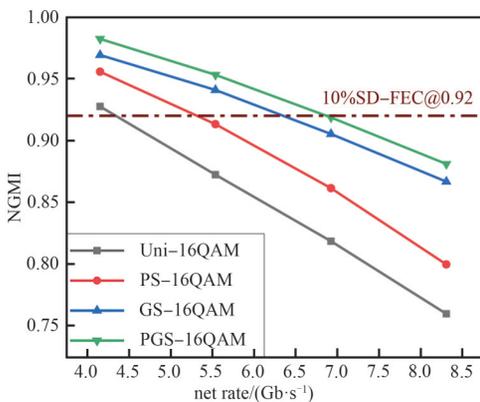


Fig.6 Measured NGMI at different net rates when OSNR is 17 dB
图 6 当 OSNR 为 17 dB 时，不同净速率下的 NGMI 测量值

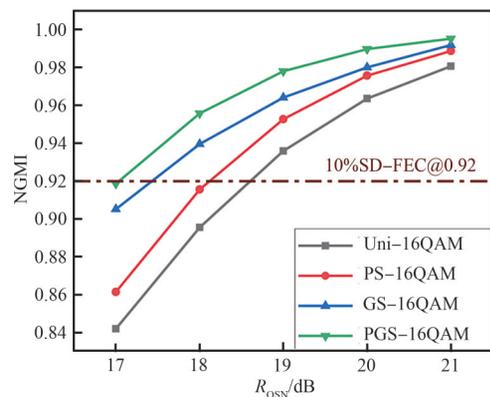


Fig.7 Measured NGMI at different OSNRs under 6.92 Gb/s net rate
图 7 净速率为 6.92 Gb/s 时，不同 OSNR 下的 NGMI 测量值

2 实验系统介绍

图 8 为全电子 THz 波段无线前传系统的实验装置。在发射端，生成的 DMT 信号被加载到采样率为 3~6 GSa/s 的任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)中，产生连续波形。使用 12.5 GHz 本振(Local Oscillator, LO-1)和 12 倍倍频器产生 150 GHz 的载波。然后，基带 DMT 信号通过次谐波混频器上变频为太赫兹信号，中心频率为 300 GHz，产生的 THz 波段信号通过标准喇叭天线(Horn Antenna, HA)发射到自由空间。

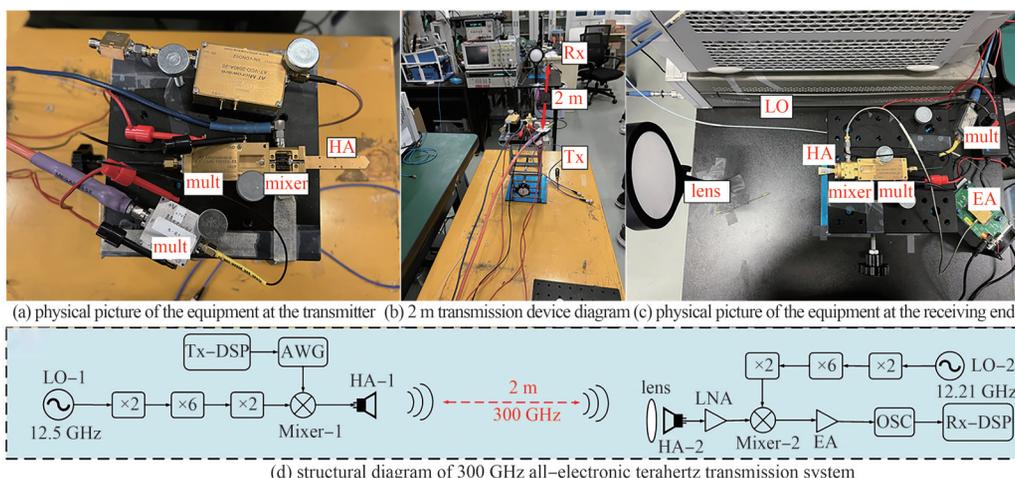


Fig.8 Experimental setup for fully electronic THz band wireless fronthaul system
图8 全电子 THz 波段无线前传系统的实验装置

经过 2 m 的无线传输后，THz 信号经透镜聚焦，并由另一个增益为 25 dBi 的 HA 接收。接收信号由增益为 20 dB 的低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)放大，随后在次谐波混频器中与 146.52 GHz LO 信号下变频。产生的中频(Intermediate Frequency, IF)为 6.96 GHz。随后，IF 信号由增益为 25 dB 的电子放大器(Electronic Amplifier, EA)放大。最后，IF 信号由采样率为 40 GSa/s、3 dB 带宽为 13 GHz 的数字存储示波器(Digital Storage Oscilloscope, DSO)捕获，并由接收端离线 DSP 处理。

3 实验结果分析

在该全电子 300 GHz 太赫兹无线系统中，对不同速率下的 4 种调制格式进行对比，得到与 VPI 仿真软件一致的结果。传输的净比特率为 5.54 Gb/s 时，4 种调制格式的星座图如图 9 所示。

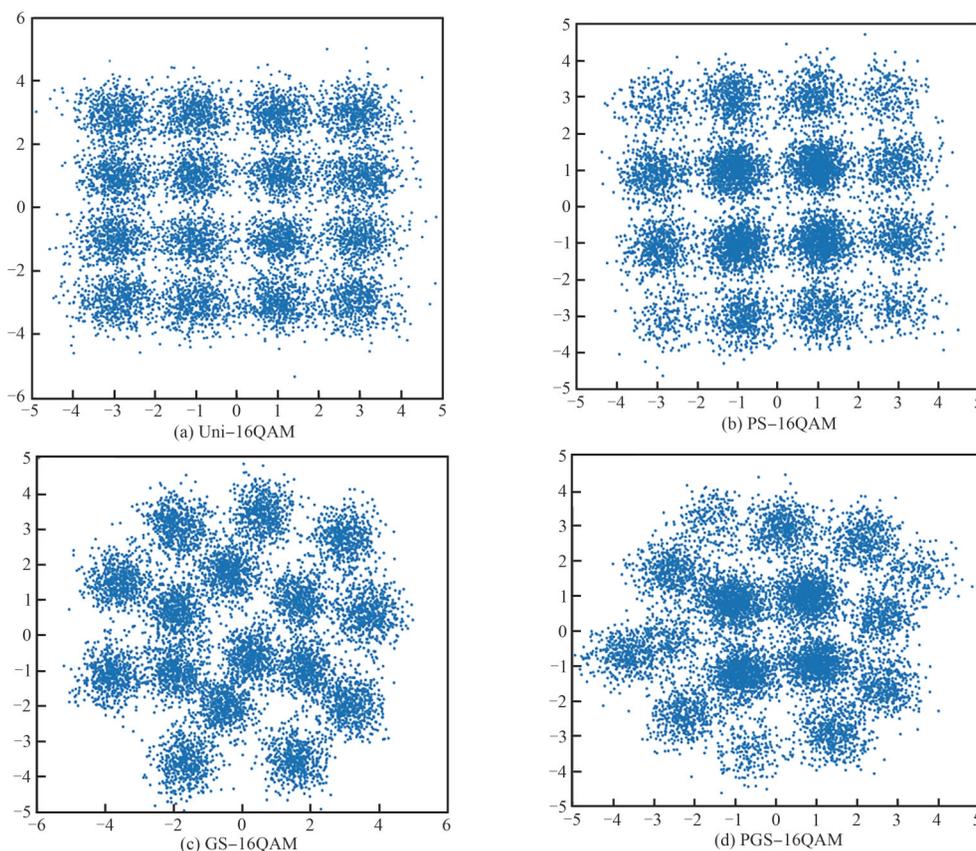


Fig.9 Pre-judgment constellation diagram
图9 判决前星座图

不同净比特速率下的传输结果如图 10 所示, 实验结果趋势与仿真类似, 在太赫兹无线传输系统中 PGS-16QAM 依然效果最好, GS-16QAM 优于 PS-16QAM, 未调整的 16QAM 效果最差。净速率为 4.15 Gb/s 和 5.54 Gb/s 时, PS 与 GS 信号的 NGMI 相近; 净速率增加到 6.92 Gb/s 和 8.31 Gb/s 时, GS 信号的表现明显优于 PS 信号, 而净速率由 6.92 Gb/s 提升到 8.31 Gb/s 时, GS-16QAM 的 NGMI 下降速度明显慢于其他 3 种格式, 这两种情况都是由于实验系统的波动造成的。

实验结果中, 随着速率的提高, 4 种调制格式之间的性能差距逐渐增大, 与仿真结果一致。但实验获得的优化提升并不如仿真中那么大, 原因是仿真中优化了所有条件, 而实验中混入了较多变量, 导致优化结果的退化。此外, 还可以得出, 在净速率较高的情况下, 优化效果更明显。

NGMI 的软判决阈值设置为 0.92, 以 16QAM 为参考, PS-16QAM、GS-16QAM 和 PGS-16QAM 净速率分别提升了 3.4%、11.4%、15.6%。

4 结论

本研究首次在纯电子元件构成的太赫兹无线系统中引入了混合 PGS 技术。与以往使用单一整形方法的研究相比, 混合整形不仅有效提高了系统的传输速率和频谱效率, 且在 300 GHz 频段的无线传输实验中展现出显著优势。当无线传输距离设置为 2 m、NGMI 阈值为 0.92 时, PGS-16QAM 相较于传统的 16QAM、PS-16QAM 和 GS-16QAM, 净传输速率分别提升了 15.6%、11.8% 和 3.8%, 进一步缩小了传输系统容量与香农极限的差距。这些实验结果表明, 混合整形方法在纯电子太赫兹系统中的应用具有显著的优化效果, 为未来高频段、高速率无线通信系统的设计和实现提供了新的技术路径和参考依据。

参考文献:

- [1] 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. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Terahertz communication systems: present and outlook[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(6): 931-937.) doi:10.11805/TKYDA201806.0931.
- [2] MOROHASHI I, IRIMAJIRI Y, KAWAKAMI A, et al. THz communication system at 1.8 THz by photonics-based transmitter and electronics-based receiver[C]// 2023 the 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2023: 1-2. doi:10.1109/IRMMW-THz57677.2023.10299187.
- [3] ZHANG Jiao, ZHU Min, LEI Mingzheng, et al. Real-time demonstration of 103.125 Gbps fiber-THz-fiber 2x2 MIMO transparent transmission at 360-430 GHz based on photonics[J]. Optics Letters, 2022, 47(5): 1214-1217. doi:10.1364/OL.448064.
- [4] WANG Mingxu, YU Jianjun, ZHAO Xianming, et al. K-means non-uniform-quantization digital-analog radio-over-fiber scheme for THz-band photonics-aided wireless fronthaul[J]. Optics Letters, 2024, 49(10): 2801-2804. doi:10.1364/OL.521380.
- [5] WEI Yi, YU Jianjun, LI Weiping, et al. Demonstration of 60 Gbps 135 GHz terahertz signal transmission over 4 600 m wireless distance with photonics-aided technology[C]// 2023 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Shanghai, China: IEEE, 2023: 1-4. doi:10.1109/OECC56963.2023.10209581.
- [6] DING Junjie, YU Jianjun, LI Weiping, et al. High-speed and long-distance photonics-aided terahertz wireless communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(11): 3417-3423.
- [7] ISHIBASHI T, MURAMOTO Y, YOSHIMATSU T. Unitraveling-carrier photodiodes for terahertz applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(6): 79-88. doi: 10.1109/JSTQE.2014.2336537.
- [8] FATADIN I, SMITH J, GUI Y, et al. Demonstration of 120 Gbit/s 64-QAM wireless link operating in the 300 GHz band[J]. IEEE Access, 2024(12): 31159-31167. doi:10.1109/ACCESS.2024.3368884.
- [9] 田鹏, 韩扬, 王明旭, 等. 全电子的 300 GHz 太赫兹无线通信[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(6): 665-670. (TIAN Peng, HAN Yang, WANG Mingxu, et al. Demonstration of 300 GHz all-electronic terahertz wireless communications[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(6): 665-670.) doi:10.11805/TKYDA2023387.
- [10] SCHULTE P. Constant composition distribution matching[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 62(1): 430-434.

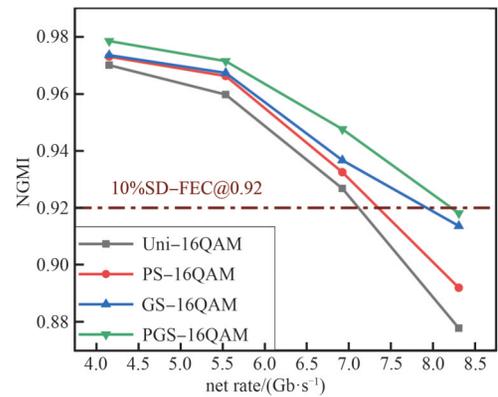


Fig.10 Measured NGMI at different net rates in terahertz wireless system

图 10 太赫兹无线传输系统中不同净速率下的 NGMI 测量值

doi:10.1109/TIT.2015.2499181.

- [11] ZHANG S L, YAMAN F. Constellation design with geometric and probabilistic shaping[J]. Optics Communications, 2018, 409(1): 7–12. doi:10.1016/j.optcom.2017.08.063.
- [12] QU Z, DJORDJEVIC I B. Geometrically shaped 16QAM out-performing probabilistically shaped 16QAM[C]// 2017 European Conference on Optical Communication(ECOC). Gothenburg, Sweden: IEEE, 2017:1–3. doi:10.1109/ECOC.2017.8346080.
- [13] SILLEKENS E, SEMRAU D, LAVERY D, et al. Experimental demonstration of geometrically-shaped constellations tailored to the nonlinear fibre channel[C]// 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). Rome, Italy: IEEE, 2018:1–3. doi:10.1109/ECOC.2018.8535199.
- [14] DING Junjie, WANG Kaihui, KONG Miao, et al. Transmission of hybrid probabilistically and geo-metrically shaped 256QAM at 49-Gbaud in a 50-GHz spacing WDM system[C]// 2020 European Conference on Optical Communications(ECOC). Brussels, Belgium: IEEE, 2018:1–4. doi:10.1109/ECOC48923.2020.9333281.
- [15] XU Xing, LIU Bo, WU Xiangyu, et al. A robust probabilistic shaping PON based on symbol-level labeling and rhombus-shaped modulation[J]. Optics Express, 2018, 26(20):26576–26589. doi:10.1364/OE.26.026576.
- [16] ZHANG S L, QU Z, YAMAN F, et al. Flex-rate transmission using hybrid probabilistic and geometric shaped 32QAM[C]// 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition(OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2018. doi:10.1364/OFC.2018.M1G.3.
- [17] CHO J, SCHMALEN L, WINZER P J. Normalized generalized mutual information as a forward error correction threshold for probabilistically shaped QAM[C]// 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). Gothenburg, Sweden: IEEE, 2017:1–3. doi:10.1109/ECOC.2017.8345872.

作者简介：

韩 扬(1999–)，男，在读硕士研究生，主要研究方向为毫米波系统中的数字信号处理技术。email: 22210720136@m.fudan.edu.cn.

田 鹏(2001–)，男，在读硕士研究生，主要研究方向为太赫兹波通信技术、光子辅助毫米波技术。

王明旭(1998–)，男，在读博士研究生，主要研究方向为矢量毫米波、光载无线等。

谭景文(2000–)，男，在读硕士研究生，主要研究方向为光子毫米波/太赫兹通信技术。

徐思聪(2000–)，女，在读博士研究生，主要研究方向为毫米波通信中的神经网络算法。

张 冰(1996–)，女，在读硕士研究生，主要研究方向为毫米波和太赫兹波通信技术。

魏 怡(1995–)，女，在读博士研究生，主要研究方向为太赫兹波通信和光载无线。

杨雄伟(1996–)，男，在读博士研究生，主要研究方向为毫米波和太赫兹波通信技术、光子太赫兹技术等。

余建军(1968–)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为高速光纤通信技术、毫米波和太赫兹波通信技术、光纤无线融合技术。