

光子辅助的宽带太赫兹通信技术

余建军, 周雯, 王心怡, 王凯辉
(复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘 要: 首先, 介绍了光子辅助的宽带太赫兹通信系统中的关键技术。然后, 介绍了大容量和长距离太赫兹无线和有线通信技术方面的研究进展。采用这些关键技术, 先后实现了太赫兹信号超过 1 Tbit/s 的无线传输, 以及超过 100 Gbit/s 太赫兹信号在无太赫兹放大器的情况下无线传输 54.6 m。最后, 介绍了采用空芯光纤进行有线传输超过 100 Gbit/s 的太赫兹信号。

关键词: 多输入多输出; 多维复用技术; 概率整形技术; 太赫兹空芯光纤

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022012

Photonics-aided broadband terahertz communication technology

YU Jianjun, ZHOU Wen, WANG Xinyi, WANG Kaihui

School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: Firstly, the key technologies in photonics-aided broadband terahertz communication systems were introduced, and then the research progress in large-capacity and long-distance terahertz communication technologies was introduced. Using these key technologies, wireless transmission of THz signals had been successively achieved exceeding 1 Tbit/s, wireless transmission of THz signals exceeding 100 Gb/s for 54.6 meters without a THz amplifier. The use of air-core optical fiber to transmit terahertz signals exceeding 100 Gbit/s was also introduced.

Keywords: multiple-input multiple-output, multi-dimensional multiplexing technology, probabilistic shaping technology, THz hollow-core fiber

0 引言

随着智能终端应用的飞速发展, 无线网络用户数量急剧增加, 这就要求未来的通信系统能够在各种复杂的环境中实现超高速访问。一种解决方案是通过使用更高的载波频率来增加信道带宽, 以提供足够的传输容量^[1]。所以更高的载波频率成为高频通信的备选, 即毫米波和太赫兹频段。与毫米波相比, 太赫兹频段的带宽为 0.1~10 THz^[2], 拥有更高的频谱范围, 可以提供每秒太比特级别数据传输速率的支持; 拥有更高的方向性, 更不易发生自由空

间衍射; 采用太赫兹通信技术, 收发机间的距离更短, 电力损耗更低。因此, 相比之下, 太赫兹频段具有更大的潜力^[1-8]。

随着对高速率通信需求的日益增加, 以及太赫兹器件的研发取得重要进展, 太赫兹无线通信技术成为当前国内外无线通信研究的一个重要热点^[3-5]。目前, 国内太赫兹通信已有几十家研究团队, 如电子科技大学、复旦大学、中国工程物理研究院、中电十三/四十一/五十四所、华为、中兴、浙江大学等。其中, 中国工程物理研究院太赫兹通信研究小组实现了 120 GHz 超 10 km 传输^[6]。

收稿日期: 2021-09-30; 修回日期: 2021-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61935005, No.91938202, No.61720106015, No.61835002, No.61805043, No. 62127802)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61935005, No.91938202, No.61720106015, No.61835002, No.61805043, No.62127802)

太赫兹波频率高、可用带宽大，具有适合信号传输的多种优良特性，在未来无线通信中具有广阔的应用前景和潜力。光纤通信可以提供巨大的传输容量和超长的传输距离，但其移动性较差，无法实现广域无缝覆盖^[8]。太赫兹无线通信在理论上可以覆盖任何地方，但由于受到频率资源不足和各种损伤的影响，通信带宽和传输距离受到限制。太赫兹通信已经出现超高的无线传输速率（超过 40 Gbit/s），这甚至超过光纤传输速率。然而，仅仅依靠带宽受限的电子设备很难产生这样的超高速无线信号，因此，光子辅助太赫兹技术应运而生并得到了深入的研究^[7-10]。

相对于电的方式产生太赫兹信号，光子辅助技术产生太赫兹信号有如下优点。1) 可以选择的频率高达 1 THz。根据 2 个泵浦激光器的不同频率精确调整，方便地获得不同频率的太赫兹信号，理论上能够覆盖所有可用的大气传输窗口。2) 可以产生超宽带的太赫兹信号。由于使用的光电器件包括调制器，可以实现带宽超过 100 GHz 太赫兹信号。3) 可以灵活地产生多通道的太赫兹信号。光子辅助技术能够非常便利地产生多个光载波，在多载波系统中使用该方法能够大幅提升系统容量，结合不同的调制格式，能大大增强系统的灵活性。4) 能够将光纤的低衰减、大容量等优势与太赫兹无线通信的灵活接入优势结合起来，实现光载无线通信，完成光纤和无线的融合传输。

在自由空间传输的太赫兹信号，由于大气中水汽的吸收和尘埃粒子的散射，具有很高的传播损耗，无法实现远距离传输。当使用有线传输时，同轴电传输线的损耗会随着频率的增加而迅速增加，带宽也受到频率相关损耗的限制。因此，采用能够将太赫兹波限制在内部，实现低损耗、长距离、高频、高安全性传输的光纤是一个不错的选择。在空芯光纤中，太赫兹波在空芯中传输，因此其传播速度可以接近真空中的传播速度，从而实现低时延。空气的低吸收使吸收光的热量转化较少，因此空芯光纤具有较高的功率阈值，可以传输高功率的太赫兹信号。由于没有玻璃芯，材料引起的色散和非线性效应也可以大大降低。最重要的优点是空芯光纤的低损耗窗口类似于空气的窗口，因此可以在太赫兹范围内传输低损耗的信号，而低损耗的固体材料很难找到。所有这些优点使空芯光纤成为太赫兹信号传输中有前途的候选者。

本文将介绍提升太赫兹信号的传输容量和延长传输距离的各种关键技术，并介绍采用这些技术实现创纪录的太赫兹信号无线和有线传输结果。

1 增加太赫兹传输容量的方法

在光纤通信中，实现大容量光纤传输有几种典型的技术，包括光的偏振复用^[8]、多入多出结构、高阶正交幅度调制（QAM, quadrature amplitude modulation）^[9]、电/光多载波调制以及先进的基于发射和接收的数字信号处理（DSP, digital signal processing）算法。先进的 DSP 算法可以补偿器件和光纤传输链路的各种线性和非线性损伤，从而提高接收机灵敏度和系统性能^[10-14]。新兴的光子辅助太赫兹传输技术利用光纤信道的大带宽，使用光子拍频的方式生成宽带太赫兹信号，能够突破电子器件带宽的限制^[15-16]。为了提升传输容量^[17-25]，可以采用多维复用的方式，包括无线多输入多输出（MIMO, multiple-input multiple-output）与光偏振复用相结合^[20-23]、天线极化复用、高电平 QAM 和多频段调制^[24-25]等。

1.1 多维复用

多种多维复用技术的实现与协同集成可以显著降低光纤-无线集成接入系统的信号波特率，提高系统的传输能力。图 1 总结了用于光纤-无线集成接入系统的典型多维复用技术，包括 MIMO 空间复用、光偏振复用、高阶 QAM 调制、天线偏振复用和多载波调制。

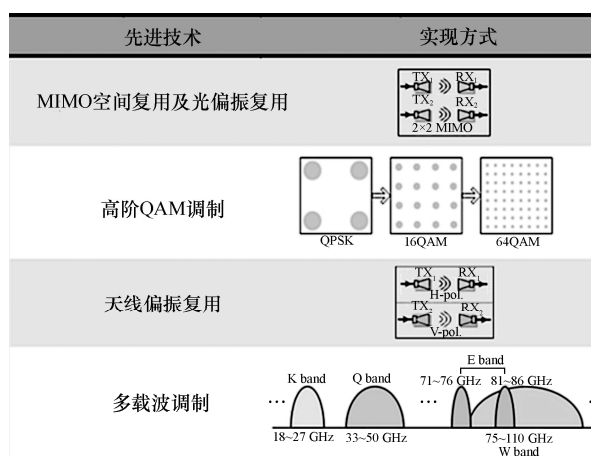


图 1 用于光纤-无线集成接入系统的典型多维复用技术

1) MIMO 空间复用技术

天线 MIMO 技术利用多个发送和接收天线，可以有效地增加系统的无线传输容量，还可以明显

减少达到给定无线传输容量所需的无线发射功率。并且，天线 MIMO 技术还可以结合包括空间复用、波段复用和天线极化复用等在内的多种复用方式，有效降低信号波特率，减少对光电设备的带宽需求，提高接收机灵敏度，实现毫米波信号高速高频谱效率的传输。

MIMO 空间复用技术使用多个发射和接收天线，可以很好地集成光学偏振复用技术，显著提高系统传输能力。但是，这样做的代价是相对复杂的天线结构，并且每个发射天线的发射能量显著降低^[26-27]。MIMO 空间复用结构如图 2 所示。天线的大小、天线的重量和传输距离可以通过选择天线的数目和天线在发射端和接收端之间的间距来实现折中。

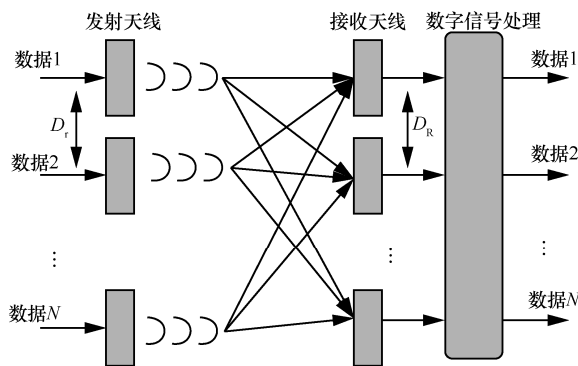


图 2 MIMO 空间复用结构

2) 光偏振复用技术

在光纤通信中，光的偏振复用技术可以将光纤链路的容量提高一倍，是未来频谱效率高的高速光传输的一种实用解决方案。在光子辅助的太赫兹通信系统中，偏振复用技术同样是一种能有效提高系统容量的方案。经过偏振复用后，太赫兹信号可以由二维转换为三维，从而使无线传输能力提高一倍。

如何实现多路偏振复用太赫兹信号的产生和无线传输，从而实现 FWI (fiber wireless integration) 通信是一个很有意义的研究课题。人们可以使用单输入单输出 (SISO, simple-input simple-output) 的无线链路来传输单偏振的太赫兹信号^[28-32]。然而，为了传输多路偏振复用的太赫兹信号，需要使用基于 2 对天线的 2×2 MIMO 无线链路^[33]。在这种情况下，本文团队提出了利用光偏振复用的无线 MIMO 技术来实现偏振复用的太赫兹信号的产生和无线传输。

光偏振复用的无线 MIMO 技术原理如图 3 所示。整个系统结构包括 5 个部分，即光基带发射机、光纤链路、光外差上变频器、2×2 MIMO 无线链路和无线太赫兹接收机。光基带发射机中，光调制器和偏振多路复用器用于产生偏振多路复用的光基带信号。光外差上变频器接收光纤传输后的偏振复用光基带信号。光外差上变频器中使用 2 个偏振分束器和 2 个光耦合器对接收到的光基带信号和本振光信号进行光偏振分集操作。本振光信号是由激光器 2 产生的。在这里值得注意的是，光外差上变频器中的激光器 2 和光发射机中的激光器 1 都是自由运行的，它们的频率间隔正好是所需要的太赫兹载频。

然后，利用 2 个并行的光电探测器进行光电转换，这 2 个光电探测器可以是单端的，也可以是平衡的。光电探测器产生 2 路太赫兹电信号，可以认为这是一个偏振复用的太赫兹电信号。与单端的光电探测器相比，平衡光电探测器可以消除噪声，提高系统的稳定性。接着，利用 2×2 的无线 MIMO 链路传输产生多路偏振复用的太赫兹电信号。在某些情况下，每个接收天线可以同时接收来自 2 个发射天线的无线功率，因此可能会出现无线串扰。在无

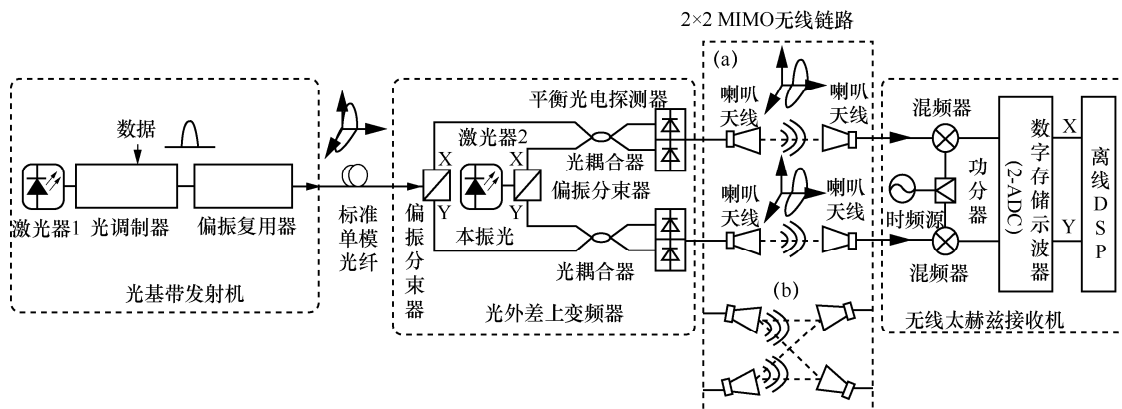


图 3 光偏振复用的无线 MIMO 技术原理

线太赫兹接收机中，首先采用基于平衡混频器和正弦波射频信号的模拟下变频，将高频太赫兹信号下变频为频率较低的中频信号。然后，使用双信道数字存储示波器（DSO, digital storage oscilloscope）来捕获中频信号，用于后续离线数字信号处理。对于多路偏振复用信号，光纤链路和 2×2 MIMO 无线链路都可以看作 2×2 的模型，可用 2×2 的琼斯矩阵表示。

偏振多路复用器包括一个用来将 I/Q 调制器的输出平均分成 2 个支路的保偏光纤耦合器、在一个支路上用来实现 150 符号时延的单臂光时延线、在另一个支路上的用来平衡 2 个支路光功率的光衰减器，以及一个用来组合 2 个支路的偏振波束组合器。经过偏振多路复用器，可以得到一个 PDM-QPSK/ PDM-16QAM/PDM-64QAM 的光基带信号。值得注意的是，调制阶数越高，每个符号的比特数越大，所需的信号波特率越低。同时，随着调制阶数的增加，也需要更高的接收机灵敏度。因此，最优的矢量调制与系统的整体性能之间需进行权衡。

3) 多载波调制技术

为了增加无线传输容量，本文将光多载波调制技术引入太赫兹通信系统中。光多载波调制技术包括光正交频分复用（OFDM, orthogonal frequency division multiplexing）和奈奎斯特波分复用（WDM, wavelength division multiplexing）等技术，这些技术为光子载波优化提供了可能。

集成偏振复用、无线 MIMO 结构和光多载波调制技术的光子辅助太赫兹系统原理如图 4 所示，该系统可用于实现多载波偏振复用太赫兹信号的产生和无线传输。

4) 天线偏振复用技术

为了进一步增加无线传输能力，本文将天线偏振复用技术引入所提出的太赫兹通信系统中。集成了偏振复用、无线 MIMO、多载波调制和天线偏振复用 4 种技术的光子辅助太赫兹系统原理如图 5 所示。本文以双路波分复用信号为例，在光外差上变频器中，首先使用波长选择开关（WSS, wavelength selective switch）来分离信道 1 和信道 2 的信号，经光外差上变频后，太赫兹载波携带信道 1 和信道 2

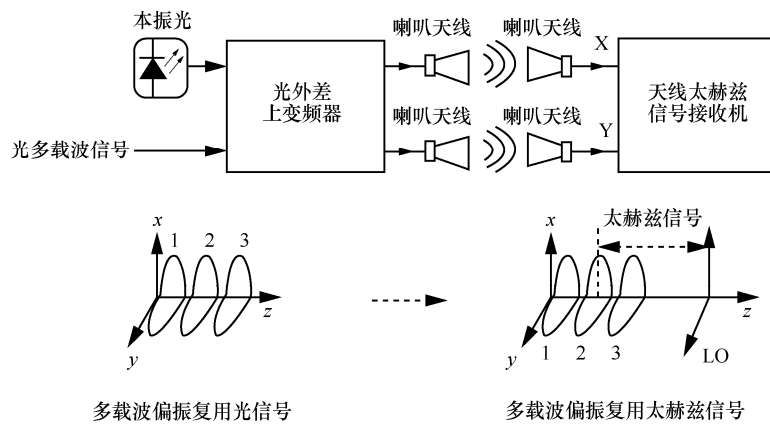


图 4 集成偏振复用、无线 MIMO 结构和光多载波调制技术的光子辅助太赫兹系统原理

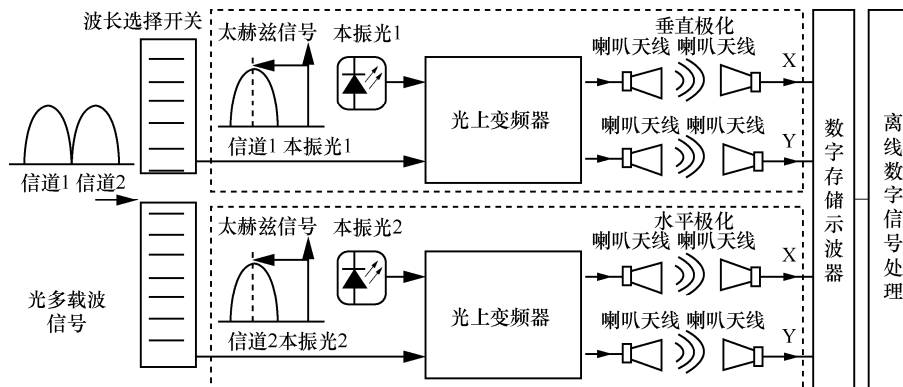


图 5 集成了偏振复用、无线 MIMO、多载波调制和天线偏振复用 4 种技术的光子辅助太赫兹系统原理

的信号。然后，使用两对水平偏振的天线来发射信道 1 的信号，使用另外两对垂直偏振的天线来发射信道 2 的信号，本文把这种天线结构定义为天线偏振复用。

使用天线偏振复用可以进一步使无线传输能力加倍，但需要两倍的光电器件。本文还测量到，对于一个典型的喇叭天线，垂直偏振和水平偏振可以有大于 33 dB 的偏振隔离。因此，采用天线偏振复用可以有效地抑制信道 1 和信道 2 之间的无线串扰。

对于基于空间复用、太赫兹频带复用、天线偏振复用等多维复用技术的大容量光纤-无线集成系统，需要进一步优化天线结构，实现多维复用技术的完全集成。在基于天线偏振复用的天线结构设计中，可以增加交叉偏振鉴别，优化天线结构参数，减小传播路径对发射信号的去偏振效应。

1.2 结合概率整形技术的高阶 QAM

高阶 QAM 在光纤传输系统和光子辅助太赫兹系统中得到了广泛的研究，用来实现更高的传输速率和光谱效率。由于缺乏高频太赫兹频段的功率放大器，功率受限的光纤信道或功率不足的无线太赫兹信道通常会限制高电平 QAM 信号的传输距离或容量。概率整形 (PS, probabilistic shaping) 作为一种编码调制方案，是近年来的研究热点，可以在不增加发射功率到光纤或无线信道的情况下，在一定的传输距离下增加容量或延长高阶 QAM 信号的传输距离^[34-35]。

2 延长太赫兹传输距离的方法

如上文所述，在大容量太赫兹信号传输方面，可以使用光子辅助方法生成太赫兹信号，这种结构较为方便、易于集成。此外，多维复用方式的结合包括 MIMO 空间复用技术、光的偏振复用技术、多载波调制技术以及天线偏振复用技术，能扩充信号的维度，大幅提升传输容量。高阶 QAM 由于其固有的高频谱效率，也能很好地提升系统容量，然而高阶 QAM 外围的信号很容易受信道中非线性失真的影响，因此将概率整形技术与高阶 QAM 结合在一起，能有效降低非线性失真的程度。先进的 DSP 算法也能够有效提升传输容量和传输距离。

在延长太赫兹通信距离方面，可以采用较低级的 QAM 信号进行传输，因为它要求的信噪比较低；

也可以采用高增益天线、大增益电放大器、太赫兹有线传输和先进数字信号处理算法，特别是概率整形技术延长传输距离。

2.1 多频段太赫兹信号产生和传输

采用多频段复用能够降低单频段信号的波特率，从而降低对光电器件信号的带宽，并且降低系统相应的平坦度以及延长传输距离，因而多频段信号的太赫兹生成方式受到越来越多的关注^[31]。

2.2 先进数字信号处理算法

如前文所述，先进的光通信技术的应用包括光子辅助方法、多维度复用和高阶 QAM 等，都能减少无线太赫兹通信系统的传输波特率，提高传输容量，更好地满足大容量光纤传输。高效的 DSP 对于光纤-无线集成系统是至关重要的，因为它可以有效地减轻或补偿由于组件和传输链路不完善而造成的各种线性和非线性损伤，从而显著提高系统性能。外差相干检测系统中，需要结合先进 DSP 算法来检测多维电平的太赫兹信号，以提高系统性能，降低系统复杂度。

与先进 DSP 相结合的外差相干检测的简化结构分别如图 6 所示。由于外差相干检测不需要光相位分集，因此可以将 2 个偏振分束器和 2 个 90° 光混频器简化为 2 个偏振分束器和 2 个光耦合器。所需的平衡光电探测器和模数转换器的数量可以减少一半，因为在每个偏振 (X 偏振或 Y 偏振) 处的同相 (I, in-phase) 和正交 (Q, in quadrature) 信号分量仍然合并在一起，光偏振分集后只剩下 2 个不同的信号支路。显然，简化的外差相干检测结构比相应的集成结构具有更高的硬件效率。此外，由于高速宽带平衡光电探测器和模数转换器的可用性，中频信号的下变频以及 I 路和 Q 路信号成分的分离可以通过离线数字信号处理^[35]在数字领域实现。

对于光载太赫兹 PDM-QPSK 调制信号，外差相干探测后的离线数字信号处理流程包括中频信号下变频、色散 (CD, chromatic dispersion) 补偿、恒模算法 (CMA, constant modulus algorithm) 均衡、载波恢复、差分译码、误码率 (BER, bit error ratio) 计算^[36]，基于外差检测和离线 DSP 的宽带无线接收机实例如图 7 所示。

3 速率超 1 Tbit/s 太赫兹信号传输

本文团队基于概率整形的高级 QAM、极化复

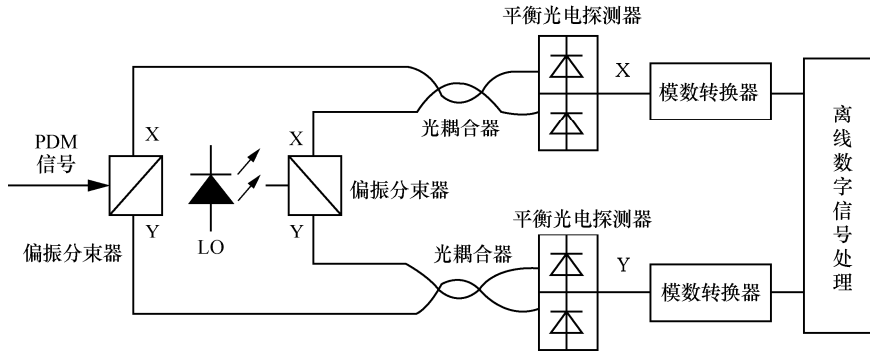


图 6 与先进 DSP 相结合的外差相干检测的简化结构

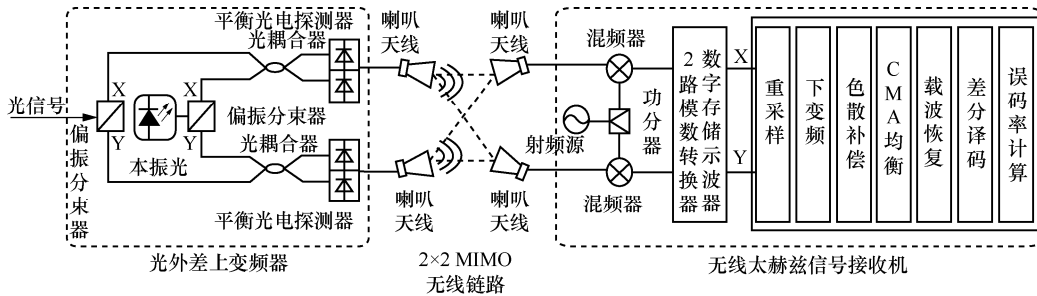


图 7 基于外差检测和离线 DSP 的宽带无线接收机实例

用的 MIMO、预均衡、多载波复用技术，使用光子辅助方式在 D 波段成功地实现了速率超 1 Tbit/s 的矢量太赫兹信号的无线传输^[37]。实验系统中同时使用了 2 种不同的 D 波段太赫兹载波频率，分别为 124.5 GHz 和 150.5 GHz，这 2 种频率正好位于 D 波段系统的可拓展频率范围（124~152 GHz），基于远光程外差技术，可同时产生 2 个双副载波矢量太赫兹信号，以达到 1.056 Tbit/s 的总数据容量。

速率超 1 Tbit/s 的光子辅助 D 波段矢量太赫兹信号传输的实验装置如图 8 所示。该系统可以实现 4x4 MIMO 传输，无线传输距离为 3.1 m。该实验系统中，光发射端采用 4 个自由运行激光器（激光器 1~激光器 4）用来提供光载波。激光器 5 和激

光器 6 用于在无线发射端提供本振光源。在光发射端，激光器 1 和激光器 3 生成的 2 个连续光波（分别标记为信道 1 和信道 3）首先由保偏光纤耦合器耦合，然后通过一个 I/Q 调制器被 24 GBaud 的六电平信号调制，随后由保偏掺铒光纤放大器放大，最后由偏振复用器复用，生成一个双通道的光 PDM-64QAM-PS5.5 信号，信道间隔为 275 GHz（124.5 GHz + 150.5 GHz = 275 GHz）。对激光器 2 和激光器 4 产生的 2 个连续光波（分别标记为信道 2 和信道 4）进行相同的操作，生成另一个具有 275 GHz 信道间距的双通道光 PDM-64QAM-PS5.5 信号。每个 24 GBaud 的六电平驱动电信号采用 64QAM-PS5.5 调制和最优预失真。

将产生的 2 个双通道光 PDM-64QAM-PS5.5 信

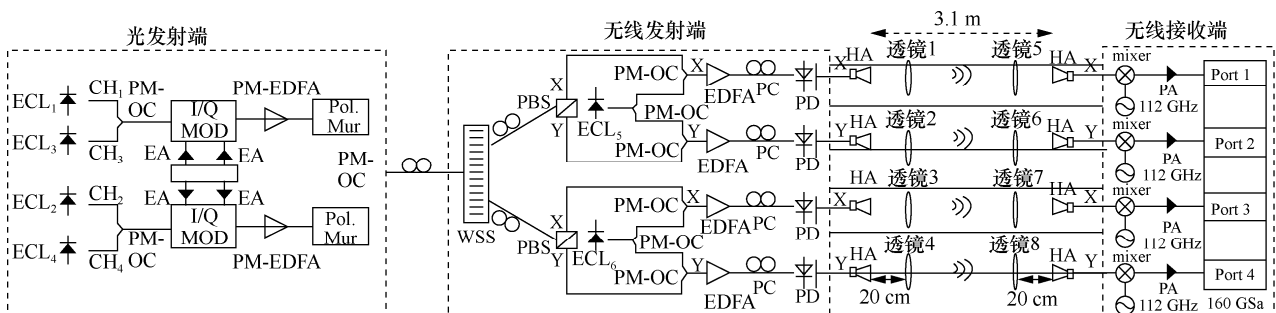


图 8 速率超 1 Tbit/s 的光子辅助 D 波段矢量太赫兹信号传输的实验装置

号用保偏光纤耦合器进行耦合，以 2.9 dBm 的光功率将组合光信号从光发射端发送到无线发射端，在单模光纤上的传输长度超过 10 km。

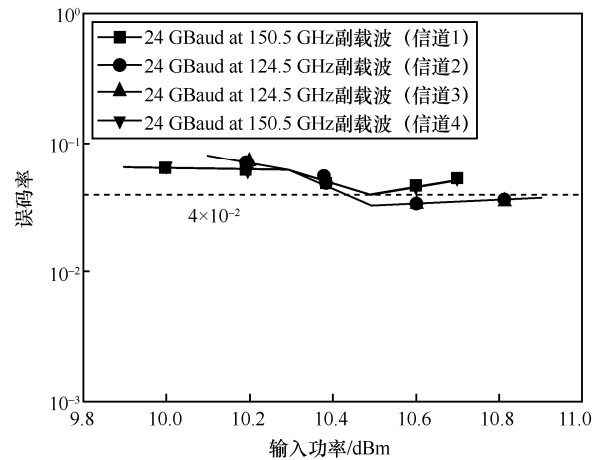
在无线发射端，接收到的光信号经过一个可编程波长选择开关（WSS, wavelength selective switch），随后被分成 2 个双副载波光信号，即包括信道 1 和信道 2 在内的双副载波光信号以及包括信道 3 和信道 4 在内的双副载波光信号。经过偏振控制器（PC, polarization controller）后，包括信道 1 和信道 2（或信道 3 和信道 4）在内的双副载波光信号随后经过光的偏振分集操作。然后，生成的 X 偏振和 Y 偏振双副载波光太赫兹信号由 2 个并行的掺铒光纤放大器放大，通过 2 个并行的偏振控制器，最后由 2 个 D 波段的光电探测器转换成 2 个双副载波太赫兹信号，它可以被认为是一种采用 PDM-64QAM-PS5.5 调制的双副载波电太赫兹信号，2 个太赫兹载波频率分别为 124.5 GHz 和 150.5 GHz。从工作波长的角度看，本振光源，即激光器 5 或激光器 6，位于信道 1 和信道 4（或信道 2 和信道 3）的中心。

将生成的 2 个双副载波电太赫兹信号通过 3.1 m 的 4×4 MIMOD 波段无线太赫兹传输链路进行传输。这 4 个无线传输链路是平行的，两对水平偏振的 D 波段喇叭天线用来传输对应于信道 1 和信道 2 的双副载波电太赫兹信号，而另外两对垂直偏振的 D 波段喇叭天线用来传输对应于信道 3 和信道 4 的双副载波电太赫兹信号。使用 4 对透镜对太赫兹信号进行聚焦，使无线接收端接收到的无线功率最大。

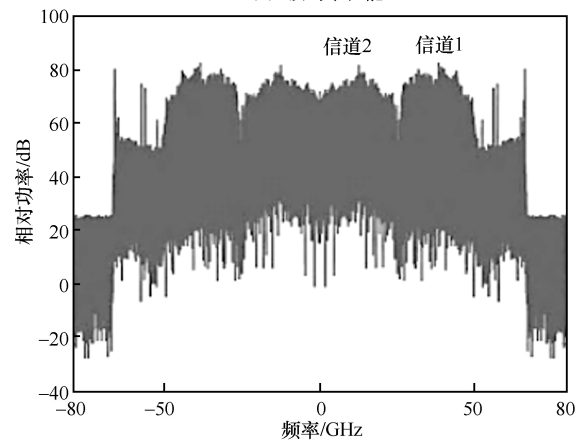
在无线接收端，首先对接收到的 2 个双副载波太赫兹信号使用 4 个并行的 D 波段混频器进行模拟下变频；然后，下变频后的双副载波中频信号每个都携带 12.5 GHz 和 38.5 GHz 副载波频率，由 4 个并行的功率放大器进行增强；最后，使用数字存储示波器的 4 个采样率为 160 GSa/s 的模数转换器同时捕获 2 个下变频后的双副载波中频信号。

本文测量了在 4×4 MIMO 无线通信系统中同时传输 2 个双副载波 PDM-64QAM-5.5 调制的矢量太赫兹信号时系统的误码率性能，如图 9(a)所示。发送的 2 个双副载波 PDM-64QAM-PS5.5 调制的矢量太赫兹信号的总波特率为 $24 \times 2 \times 2 = 96$ GBaud，总比率为 $96 \times 5.5 \times 2 = 1.056$ Tbit/s，可无线传输超过 3.1 m，

误码率低于 SD-FEC 阈值 4×10^{-2} 。捕获到的 X 偏振双副载波中频信号如图 9(b)所示，对应于信道 1 和信道 2 的输入功率为 10.5 dBm。这项工作表明了太赫兹信号大容量传输的可行性。



(a) 误码率性能



(b) 捕获到的X偏振双副载波中频信号

图 9 实验结果

4 太赫兹空芯光纤传输

太赫兹空芯光纤是一种新型的高效传输介质，主要由中空基板和具有高反射率的金属镀层组成^[38]。太赫兹空芯光纤在从可见光到远红外甚至太赫兹波段的宽波长范围内具有低损耗的特性。其损耗可以做到每米小于 1 dB。最近，本文团队成功实现了光子辅助太赫兹波通信系统中 325 GHz 太赫兹信号在 1 m 空芯光纤上的有线传输^[39]。通过采用 32 GBaud PS-4096QAM 信号，实现了净比特率达到 275.2 Gbit/s 的太赫兹有线传输，频谱效率 (SE, spectrum efficiency) 为 8.6 bit/(s·Hz)。实验结果展现了太赫兹空芯光纤作为太赫兹信号高速传输新介质的潜力。

4.1 太赫兹空芯光纤传输实验装置

本文在光子辅助太赫兹通信系统中实现了 325 GHz 的 32 GBaud PS QAM 信号在 1 m 空芯光纤上的传输, 如图 10 所示。采用一个 UTC-PD 产生 325 GHz 太赫兹信号, 然后采用 1 m 太赫兹空芯光纤进行有线传输。聚碳酸酯管用作太赫兹空芯光纤的中空基材以获得柔韧性, 可以弯曲甚至盘绕。内金属镀层为银膜, 厚度为 0.3 μm 。此外, 太赫兹空芯光纤的内径为 3.6 mm, 300 GHz 下的线性传输损耗为 1.33 dB/m。

在接收端, 空芯光纤传输后的太赫兹信号被喇叭天线接收。如图 10(b)所示, 发射器和接收器处的 2 个天线平行放在同一方向。中空光纤弯曲并精确插入两根天线之间, 确保太赫兹信号在中空光纤中传输无泄露。

对于 32 GBaud PS-4096QAM 太赫兹信号有线传输, PS-4096QAM 信号产生框架如图 11(a)所

示。进入 PD 的 32 GBaud PS-4096QAM 光信号的光谱如图 11(b)所示, 太赫兹信号的中心频率为 325 GHz。17 GHz 处接收的 IF 信号的电频谱如图 11(c)所示。

4.2 太赫兹空芯光纤实验结果

图 12 给出了 32 GBaud PS-256QAM、PS-1024QAM 和 PS-4096QAM 信号在 BtB 情况下和通过 1 m 空芯光纤传输后的 NGMI 测量值与进入 PD 的功率的关系。

在 BtB 情况下, PS-256QAM 和 PS-1024QAM 信号的 NGMI 测量值均高于 0.83-NGMI LDPC 阈值。对于 PS-4096QAM 信号, 当进入 PD 的功率达到 10 dBm 时, 可以获得 NGMI 均高于 0.83-NGMI LDPC 阈值。此外, 与 BtB 情况相比, 通过 1 m 空芯光纤传输后进入 PD 的功率损失约为 0.5 dB。考虑到 0.83-NGMI LDPC 阈值, PS-4096QAM 信号在空芯光纤传输后进入 PD 所需的功率提高到

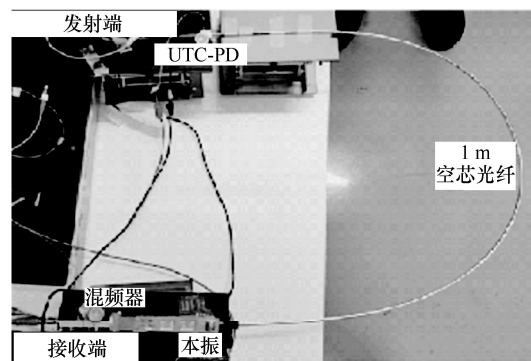
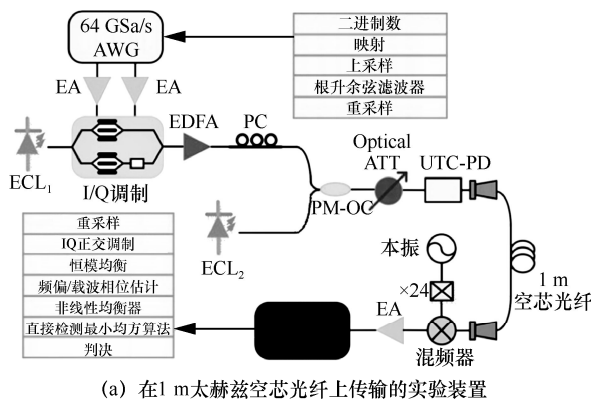
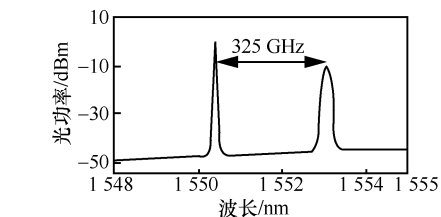
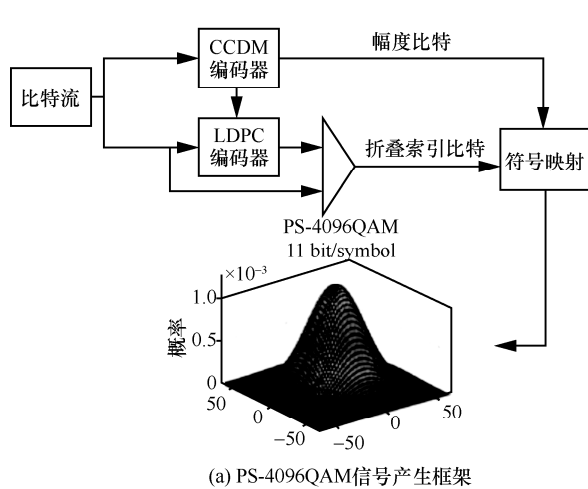
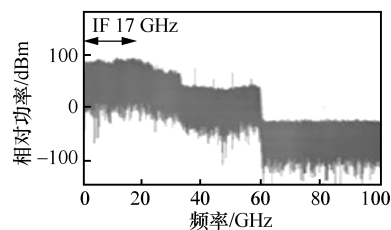


图 10 在 1 m 太赫兹空芯光纤上传输的实验装置



(b) 进入 PD 的 32 GBaud PS-4096QAM 光信号的光谱



(c) 17 GHz 处接收的 IF 信号的电频谱

图 11 32-GBaud PS-4096QAM 太赫兹信号有线传输原理

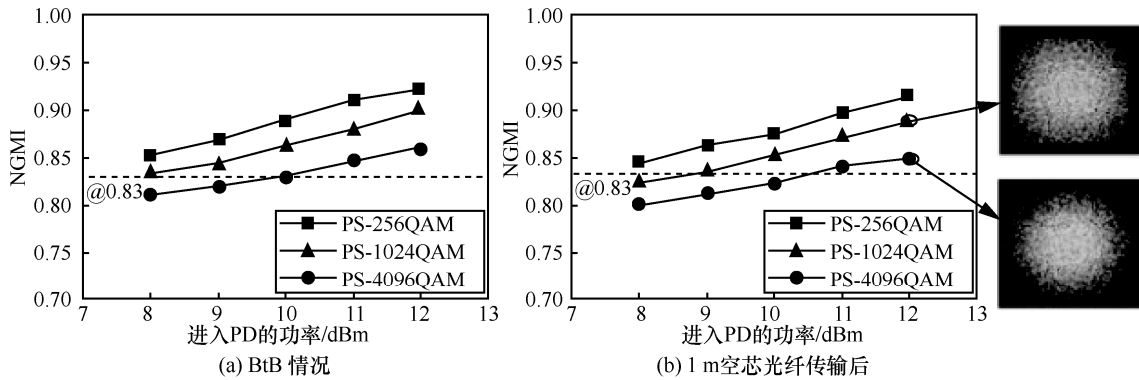


图 12 3 种 PS-QAM 格式的 NGMI 测量值与进入 PD 的功率的关系

10.5 dBm。同时，PS-1024QAM 信号在 0.83-NGMI 阈值下进入 PD 所需的功率为 8.6 dBm。图 13 分别给出了 16 GBaud 64QAM 和 PS-256QAM 信号的电频谱。

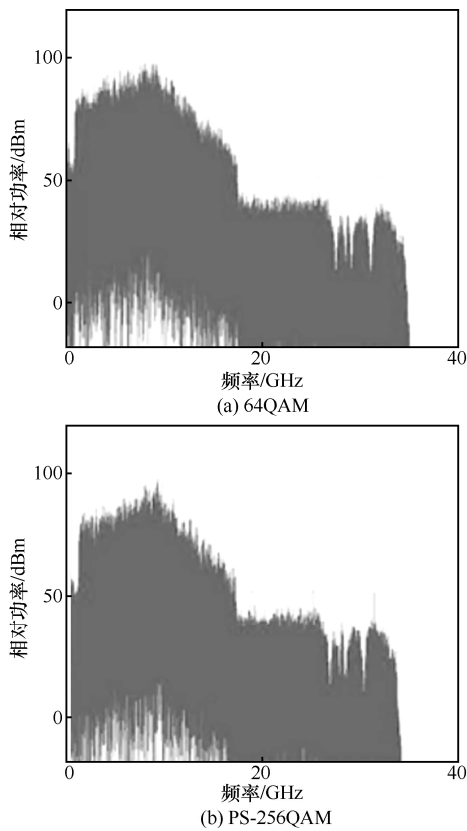


图 13 16 GBaud 64QAM 和 PS-256QAM 信号的电频谱

5 宽带太赫兹信号长距离传输

要在太赫兹系统中保持高速传输速率的同时增加传输距离，仍然存在需要克服的技术挑战^[40-43]。本文团队提出了在没有太赫兹放大器的情况下增

加传输距离同时保持高速传输速率^[44]。与其他太赫兹长距离传输实验不同，本文不使用任何昂贵的太赫兹放大器或固定工作频率范围的反射器天线，而是利用了合适的介电透镜和 DSP 算法成功展示了 20 GBaud TPS-256QAM OFDM 信号在太赫兹频段频率超过 54.6 m 的无线传输能力，净数据速率为 109.6 Gbit/s，在无太赫兹放大器的基础上成功实现单通道太赫兹传输中最高净速率和最远无线距离，为下一阶段更远距离的传输打下了基础。

图 14 展示了太赫兹系统的实验装置。在光发射器端，放置了 2 个自由运行的激光器 (ECL₁ 和 ECL₂) 以产生连续波长 (CW, continuous wavelength) 光波。它们的间距是 340 GHz。接下来，ECL₁ 产生的激光用于驱动 I/Q 调制器，该调制器具有 2.3 V 的半波电压和 30 GHz 的 3 dB 带宽。在发射端，OFDM 信号生成的过程包括 M-QAM 符号的生成、S/P 转换、训练序列 (TS, training sequence) 插入、N 点快速傅里叶逆变换 (IFFT, inverse fast Fourier transform)、添加循环前缀 (CP, cyclic prefix)、P/S 转换。此外，采用工作频率为 64 GSa/s 的波形发生器 (AWG, arbitrary waveform generator)，实现数字信号到模拟信号的转换。在双并联电放大器 (EA, electric amplifier) 的帮助下，I 通道和 Q 通道的基带 OFDM 信号被加载到 I/Q 调制器，然后 I/Q 调制器的输出信号经过保偏掺铒光纤放大器 (PM-EDFA, polarization maintaining Erbium doped fiber amplifier) 放大。PM-EDFA 和 ECL₂ 的输出信号通过保偏光纤耦合器 (PM-OC, polarization maintaining fiber coupler) 耦合成一个输出。频谱测量结果如图 15 所示，2 个光载波之间的频率间隔为 340 GHz。

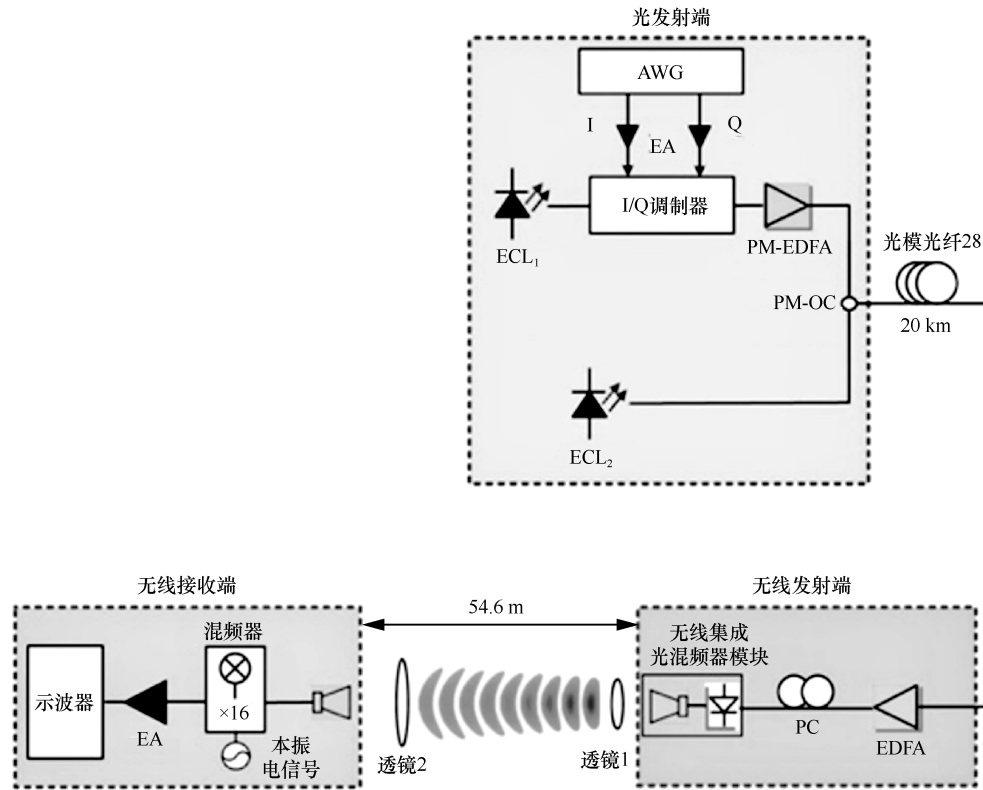


图 14 太赫兹系统的实验装置

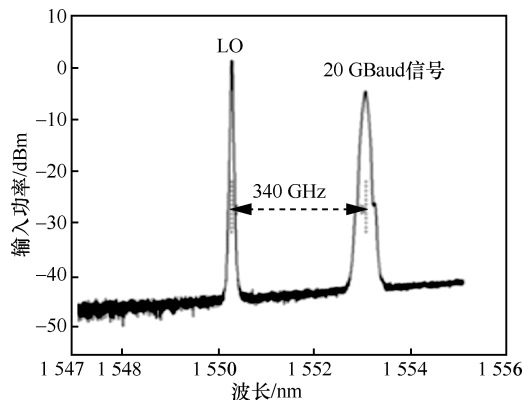


图 15 频谱测量结果

PM-OC 的输出信号通过 20 km 单模光纤 28 (SMF-28) 传输。之后，为了补偿光纤传输中的功率损耗，信号经过掺铒光纤放大器 (EDFA, Erbium doped fiber amplifier) 放大。随后，信号通过偏振控制器进行偏振控制，最后进入无线集成光混频器模块 (即 AIPM)，并转换为电太赫兹信号。

从 AIPM 输出的太赫兹电信号进入 54.6 m 的无线链路。无线传输中，使用一对平凸透镜来准直太赫兹光束，以最大限度地提高接收端接收到的无线信号功率。这对介电透镜在 520 GHz 下具有大约

1.96 的低介电常数和大约 1.4 的折射率。并且透镜具有低介电常数，典型的工作频率可以扩展到 0.1~2 THz，并且在频带边缘的性能下降很小。同时，它们在很宽的频率范围内表现出良好的聚焦功能。透镜 1 用于准直来自点源的太赫兹波，其直径和焦距参数分别为 10 cm 和 20 cm。此外，透镜 2 用于将准直光束聚焦到后焦点，其直径和焦距参数分别为 30 cm 和 50 cm。

在接收端，透镜 2 的焦点附近放置一个喇叭天线 (HA, horn antenna) 来接收电太赫兹信号，使用次谐波肖特基混频器对太赫兹信号进行下变频。该混频器由 16 倍频正弦电波源驱动，其频率为 20.625 GHz。因此，用于驱动 IMAMC 的频率为 $16 \times 20.625 = 330$ GHz。得到的中频信号的频率为 10 GHz，然后经过 EA 放大，最后被 DSO 捕获，DSO 3 dB 带宽为 33 GHz。后续离线 DSP 处理和上面的实验基本一致。

本文研究了不同调制格式的 20 GBaud OFDM 信号在系统传输后的 NGMI 性能。不同调制格式下 20 GBaud OFDM 信号的 NGMI 与 AIPM 或 UTC-PD 的输入功率之间的关系如图 16 所示，

此测量没有光纤传输。传输的 OFDM 信号的调制格式为 TPS-256QAM。AIPM 输入功率的测量范围为 9~14 dBm，由 AIPM 之前的 EDFA 调整。可以看出，在固定调制格式时，随着 AIPM 输入功率的增加，NGMI 性能逐渐优化。图 16 中插图给出了 AIPM 的输入功率为 14 dBm 时，20 GBaud 信号传输在 TPS-256QAM 格式下恢复的星座图。高达 20 GBaud 的 340 GHz TPS-256QAM 信号可在 54.6 m 无线距离内传送，并能满足 10% 的 FEC 开销。

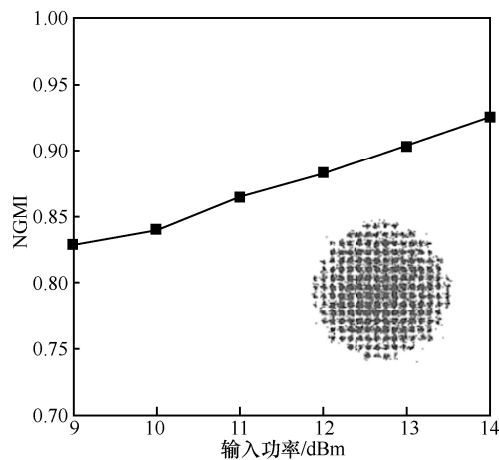


图 16 不同调制格式下 20 GBaud OFDM 信号的 NGMI 与 AIPM 或 UTC-PD 的输入功率之间的关系

6 结束语

本文对太赫兹通信系统提高容量和传输距离的技术和方法进行了介绍。这些技术在太赫兹通信的传输容量和传输距离方面都取得了进展。本文实现了 D 波段 (110~170 GHz) 的 4×4MIMO PS-64QAM 太赫兹信号无线传输 3.1 m，其总比特率达到了 1.056 Tbit/s。在该系统中，采用先进的数字信号处理技术，包括概率整形和预失真。本文在光子辅助太赫兹波通信系统中通过 1 m 空芯光纤实验证明了 325 GHz 的 32-GBaud PS-4096 QAM 太赫兹信号的有线传输。借助 PS 技术和先进的 DSP，可以成功实现频谱效率为 8.6 bit/(s·Hz) 的 275.2 Gbit/s 传输速率。在国际上，本文团队在太赫兹波段实验性地实现了无太赫兹放大器的高速光子辅助无线集成系统，其中高达 109.6 Gbit/s 的 TPS-256QAM 信号可以通过 20 km 的 SMF-28 传输，然后基于一对合适的介电透镜和先进的 DSP 技术提供超过 54.6 m 的无线传输。这一成果显著提升了无线移动数据通信的性能，延

长了传输距离，增加了传输容量。下一阶段有望实现速率超 1 Tbit/s 的太赫兹信号在 km 级别的距离上进行长距离传输。

参考文献：

- [1] 谢莎, 李浩然, 李玲香, 等. 太赫兹通信技术综述[J]. 通信学报, 2020, 41(5): 168-186.
XIE S, LI H R, LI L X, et al. Survey of terahertz communication technology[J]. Journal on Communications, 2020, 41(5): 168-186.
- [2] CHEN Z, MA X, ZHANG B, et al. A survey on terahertz communications[J]. China Communications, 2019, 16(2): 1-35.
- [3] 姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2213-2233.
YAO J Q, CHI N, YANG P F, et al. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2213-2233.
- [4] 林长星, 陆彬, 吴秋宇, 等. 基于混频偏置合成的高速太赫兹无线通信系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(1): 1-6, 25.
LIN C X, LU B, WU Q Y, et al. A high speed terahertz wireless communication system based on mixer and bias power combination[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(1): 1-6, 25.
- [5] 吴秋宇, 林长星, 陆彬, 等. 21 km, 5 Gbps, 0.14 THz 无线通信系统设计与实验[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(6): 1-4.
WU Q Y, LIN C X, LU B, et al. Design and tests of 21 km, 5 Gbps, 0.14 THz wireless communication system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(6): 1-4.
- [6] 邓贤进. 太赫兹高速通信技术研究[C]//中国工程物理研究院科技年报. 北京: 中国原子能出版社, 2014: 45-48.
DENG X J. Research on terahertz High Speed Communication Technology[C]//Science and Technology Annual Report of China Academy of Engineering Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 2014: 45-48.
- [7] JIA S, ZHANG L, WANG S W, et al. PS-64QAM-OFDM THz photonic-wireless transmission with 2×300 Gbit/s line rate[C]//Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics. Washington: OSA Publishing, 2020: 1-2.
- [8] 余建军. 宽带太赫兹通信技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
YU J J. Broadband terahertz communication technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [9] 王成, 刘杰, 吴尚昀, 等. 0.14 THz 10 Gbps 无线通信系统[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(3): 265-269.
WANG C, LIU J, WU S Y, et al. 0.14 THz 10 Gbps wireless communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(3): 265-269.
- [10] WINZER P J. High-spectral-efficiency optical modulation formats[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3824-3835.
- [11] ZHANG J W, LI X Y, DONG Z. Digital nonlinear compensation based

- on the modified logarithmic step size[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(22): 3546-3555.
- [12] IP E, KAHN J M. Feedforward carrier recovery for coherent optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(9): 2675-2692.
- [13] ZHOU X, YU J J. Multi-level, multi-dimensional coding for high-speed and high-spectral-efficiency optical transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(16): 3641-3653.
- [14] YU J J, ZHANG J W. Recent progress on high-speed optical transmission[J]. *Digital Communications and Networks*, 2016, 2(2): 65-76.
- [15] SEEDS A J, SHAMS H, FICE M J, et al. Terahertz photonics for wireless communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(3): 579-587.
- [16] 田遥岭, 蒋均, 黄昆, 等. 0.34 THz 肖特基二极管高速 OOK 信号直接检波器[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(8): 0822001.
TIAN Y L, JIANG J, HUANG K, et al. 0.34 THz high speed on-off keying(OOK) signal direct detector based on Schottky diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0822001.
- [17] HERMELO M F, SHIH P T B, STEEG M, et al. Spectral efficient 64-QAM-OFDM terahertz communication link[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19360-19370.
- [18] PANG X, JIA S, OZOLINS O, et al. Single channel 106 Gbit/s 16QAM wireless transmission in the 0.4 THz band[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*. Washington: OSA Publishing, 2017: 1-4.
- [19] JIA S, YU X B, HU H, et al. 120 Gbit/s multi-channel THz wireless transmission and THz receiver performance analysis[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(3): 310-313.
- [20] 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.
- [21] LI X Y, DONG Z, YU J J, et al. Fiber-wireless transmission system of 108 Gbit/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.
- [22] YU J J, LI X Y, CHI N. Faster than fiber: over 100-Gbit/s signal delivery in fiber wireless integration system[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22885.
- [23] LI X Y, XIAO J N, YU J J. Long-distance wireless mm-wave signal delivery at W-band[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 661-668.
- [24] LI X Y, YU J J, XIAO J N. Demonstration of ultra-capacity wireless signal delivery at W-band[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(1): 180-187.
- [25] 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.
- [26] LI X Y, YU J J, WANG K H, et al. 120Gbit/s wireless terahertz-wave signal delivery by 375GHz-500GHz multi-carrier in a 2 × 2 MIMO system[C]//*Proceedings of 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [27] YU J J. Photonics-assisted millimeter-wave wireless communication[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(6): 1-17.
- [28] CHEN M, XIAO X, YU J J, et al. Real-time generation and reception of OFDM signals for X-band RoF uplink with heterodyne detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(1): 51-54.
- [29] LI C H, WU M F, LIN C H, et al. W-band OFDM RoF system with simple envelope detector down-conversion[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*. Washington: OSA Publishing, 2015: W4G.6.
- [30] ZIBAR D, SAMBARAJU R, CABALLERO A, et al. High-capacity wireless signal generation and demodulation in 75- to 110-GHz band employing all-optical OFDM[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(12): 810-812.
- [31] MCKENNA T P, NANZER J A, CLARK T R. Experimental demonstration of photonic millimeter-wave system for high capacity point-to-point wireless communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3588-3594.
- [32] DUCOURNAU G, SZRIFTGISER P, BECK A, et al. Ultra-wide-bandwidth single-channel 0.4-THz wireless link combining broadband quasi-optic photomixer and coherent detection[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(3): 328-337.
- [33] LI F, CAO Z Z, LI X Y, et al. Fiber-wireless transmission system of PDM-MIMO-OFDM at 100 GHz frequency[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(14): 2394-2399.
- [34] GHAZISAEIDI A, FERNANDEZ D J R I, RIOS-MÜLLER R, et al. Advanced C L-band transoceanic transmission systems based on probabilistically shaped PDM-64QAM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(7): 1291-1299.
- [35] CHO J, CHEN X, CHANDRASEKHAR S, et al. Trans-Atlantic field trial using high spectral efficiency probabilistically shaped 64-QAM and single-carrier real-time 250-gbit/s 16-QAM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(1): 103-113.
- [36] LI X Y, DONG Z, YU J J, et al. Demonstration of ultra-high bit rate fiber wireless transmission system of 108-Gbit/s data over 80-km fiber and 2 × 2 MIMO wireless links at 100GHz W-band frequency[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013*. Washington: OSA Publishing, 2013: JW2A.75.
- [37] LI X Y, YU J J, ZHAO L, et al. 1-Tbit/s millimeter-wave signal wireless delivery at D-band[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1): 196-204.
- [38] 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.
- [39] DING J J, WANG Y Y, ZHANG J, et al. Demonstration of 352-Gbit/s single line rate PS-4096QAM THz wired transmission over hol-

low-core fiber[C]//Proceedings of 26th Optoelectronics and Communications Conference. Washington: OSA Publishing, 2021: T5A.1.

- [40] YANG Y H, SHUTLER A, GRISCHKOWSKY D. Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8830-8838.
- [41] RAPPAPORT T S, XING Y C, KANHERE O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. IEEE Access, 2019, 7: 78729-78757.
- [42] SONG H J, NAGATSUMA T. Present and future of terahertz communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 256-263.
- [43] LI W P, DING J J, WANG Y Y, et al. 54/104 meters Terahertz wireless delivery of 124.8/44.8 Gbit/s Signals without Terahertz Amplifier[C]//Asia Communications and Photonics Conference. Washington: OSA Publishing, 2021: T4D. 8.

[作者简介]



余建军（1968- ），男，湖南益阳人，博士，复旦大学教授，IEEE Fellow，OSA Fellow，主要研究方向为超宽带高速光纤通信、毫米波通信和太赫兹通信。



周雯（1987- ），女，江苏扬州人，博士，复旦大学青年副研究员，主要研究方向为高速光纤通信、大容量光子太赫兹通信及数字信号处理算法。



王心怡（1997- ），女，江苏泰州人，复旦大学硕士生，主要研究方向为宽带通信技术。



王凯辉（1994- ），男，浙江平湖人，博士，复旦大学在站博士后，主要研究方向为高速光通信系统和光子毫米波/太赫兹波通信技术。