

# 大容量光子辅助亚太赫兹无线通信系统演示\*

蔡沅成<sup>1,2</sup>, 李建康<sup>3</sup>, 罗炜<sup>2</sup>, 项施通<sup>2</sup>, 华炳昌<sup>1</sup>, 雷明政<sup>1</sup>, 张教<sup>1,2</sup>, 朱敏<sup>1,2\*\*</sup>

(1.网络通信与安全紫金山实验室, 江苏南京 211111;  
2.东南大学, 江苏南京 210096;  
3.湘潭大学, 湖南湘潭 411105)

**【摘要】** 光子辅助技术路线有助于实现高频无线通信与光纤有线传输的无缝融合, 是6G网络实现大容量无线通信潜在的关键使能技术之一。针对光偏振复用信号的桥接传输, 提出了基于单输入单输出无线链路的透明传输方案, 可有效解决传统2×2多输入多输出无线链路中远距离传输多天对困难、双通道间串扰大和信道不平衡等难题。采用提出的方案基于单通道分别实现了离线超400 Gbps和实时125 Gbps超100米距离的大容量光子辅助亚太赫兹无线通信系统演示。

**【关键词】** 6G; 太赫兹通信; 单输入单输出无线链路; 大容量; 实时通信

doi:10.3969/j.issn.1006-1010.20230405-0003 中图分类号: TN929.5

文献标志码: A 文章编号: 1006-1010(2023)05-0058-06

引用格式: 蔡沅成, 李建康, 罗炜, 等. 大容量光子辅助亚太赫兹无线通信系统演示[J]. 移动通信, 2023, 47(5): 58-63.

CAI Yuancheng, LI Jiankang, LUO Wei, et al. Demonstration of Large-Capacity Photonics-Assisted Sub-Terahertz Wireless Communication Systems[J]. Mobile Communications, 2023, 47(5): 58-63.

OSID:



扫描二维码  
与作者交流

## Demonstration of Large-Capacity Photonics-Assisted Sub-Terahertz Wireless Communication Systems

CAI Yuancheng<sup>1,2</sup>, LI Jiankang<sup>3</sup>, LUO Wei<sup>2</sup>, XIANG Shitong<sup>2</sup>, HUA Bingchang<sup>1</sup>, LEI Mingzheng<sup>1</sup>, ZHANG Jiao<sup>1,2</sup>, ZHU Min<sup>1,2</sup>

(1. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China;  
2. Southeast University, Nanjing 210096, China;  
3. Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**[Abstract]** Photonics-assisted technology plays a vital role in achieving the seamless integration of high-frequency wireless communication and fiber-optic wired transmission. It is considered as one of the potential key enabling technologies for large-capacity wireless communication in 6G networks. In this study, we propose a transparent transmission scheme based on a single-input single-output wireless link to effectively solves the challenges faced in traditional 2×2 multiple-input multiple-output wireless links, such as difficulties in antenna alignment over long distances, large inter-channel interference, and channel imbalance. By adopting this scheme, we successfully demonstrate high-capacity photonics-assisted sub-terahertz wireless communication systems, achieving a data rate exceeding 400 Gbps offline and real-time transmission of 125 Gbps over a distance of more than 100 meters.

**[Keywords]** 6G; terahertz communication; single-input-single-output wireless link; large capacity; real-time communication

## 0 引言

随着信息化社会的高速发展, 无线通信容量需求爆炸式增长。与现有5G网络相比, 6G无线通信期望能提供10倍以上的通信速率, 届时用户均值速率将逼近100 Gbps,

峰值速率则将达到T比特量级<sup>[1]</sup>。在这种情况下, 将必然需要毫米波乃至太赫兹与其他低频段网络(如sub 6 GHz)融合组网, 广泛应用于多尺度多维度通信场景<sup>[2]</sup>, 为6G大容量无线通信新征程保驾护航。

亚太赫兹、太赫兹频段天然具有大带宽、低延时和良好的方向性, 在大容量无线通信场景下具有广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。针对传统全固态纯电子学方案生成太赫兹波过程中存在的带宽受限、变频损耗大等“电子瓶颈”难

收稿日期: 2023-04-05

\*基金项目: 国家自然科学基金(62101126, 62101121, 62271135); 江苏省自然科学基金(BK20221194, BK20220210)

\*\*通信作者

题, 光子辅助技术可充分发挥光学器件大带宽、高频响等特性, 能有效突破电子学方案存在的容量瓶颈<sup>[4]</sup>, 是实现6G太赫兹通信的一条重要技术路线。它也可以有效促进无线通信和光纤网络的透明传输和无缝切换, 将无线通信的灵活接入与光纤网络的大容量通信、长距离拉远传输等优点相融合, 能很好地满足未来6G网络中大容量、超宽带信号的便携式接入需求。

然而, 高频亚太赫兹、太赫兹无线通信也面临着一些关键挑战。一方面, 高路径损耗严重限制了亚太赫兹、太赫兹信号对区域的覆盖能力<sup>[4-5]</sup>。另一方面, 超宽带无线信号的实时处理显著受限于高速数模/模数转换器的带宽、采样速率和精度。只有克服上述难题, 才能加快亚太赫兹、太赫兹无线通信在6G网络中的应用进程。

相比于太赫兹频段, 亚太赫兹波段不仅具有更小的传输路径损耗, 而且产业链更加完善, 因此, 在现阶段它吸引了更多的关注。以频谱覆盖了部分亚太赫兹频段的W波段(频率范围为75~110 GHz)为代表, 不仅器件成熟度高, 而且其频谱资源也足够丰富, 可提供35 GHz的通信带宽。因此, 本文聚焦光子辅助W波段无线通信系统, 研究适合大容量无线通信的一些关键技术, 包括更适用、更具有鲁棒性的光纤无线透明转换方案, 以及支持高速实时信号处理的光纤-无线-光纤(FWF, Fiber-Wireless-Fiber)传输架构。

## 1 光子辅助W波段无线通信系统研究进展

表1给出了具有代表性的光子辅助W波段无线通信系统研究成果。可以看出, 在离线系统方面, 通过光偏振复用(OPDM, Optical Polarization Division Multiplexing)或电极化复用(EPDM, Electrical

Polarization Division Multiplexing)结合2×2多输入多输出(MIMO, Multiple-Input Multiple-Output)无线链路, W波段的最高通信容量已实现156 Gbps<sup>[7]</sup>, 最远无线传输距离达到2.5 km<sup>[10]</sup>。当同时采用OPDM和APDM并结合4×4 MIMO时, 其容量可达432 Gbps<sup>[9]</sup>。然而, 当考虑单通道的空口速率时, 经过折算发现最大容量不超过110 Gbps<sup>[11]</sup>。对于W波段高达35 GHz的宽谱资源, 这一容量仍有巨大的提升空间。在实时系统方面, 最长无线传输距离不超过50 m<sup>[13]</sup>, 最高实时通信速率低于25 Gbps<sup>[14]</sup>, 系统容量和100 Gbps以及T比特量级水平相距甚远。

## 2 基于SISO链路的大容量光子辅助W波段无线通信系统

为了实现OPDM信号的透明转换, 传统桥接方案通常采用2×2 MIMO无线链路<sup>[16-17]</sup>。然而, 在该方案中, 两个独立的无线分支链路不仅结构复杂, 而且其收发天线必须精确对准、链路增益需保持匹配, 否则将会引起双偏振信号解调性能的退化。此外, 2×2 MIMO通道间干扰也会导致系统性能的下降和不稳定。与2×2 MIMO无线链路不同, 双极化单输入单输出(SISO, Single-Input Single-Output)无线链路通过一对正交模转换器(OMT, Orthomode Transducers)和两个双极化天线, 可将OPDM信号巧妙耦合到单通道无线链路中<sup>[18]</sup>。这种无缝融合方案更具竞争力, 不仅极大简化了无线链路结构, 还能显著提升单通道的空口容量。

基于上述双极化SISO无线链路, 本节在W波段(中心载频为92.5 GHz)分别从离线和实时两方面进行实验验证。首次在W波段单通道空口速率上实现离线超400 Gbps和实时100 Gbps超100米的无线传输演示。其中, 离线

表1 光子辅助W波段无线通信系统研究成果

文献号、年份	载波频率/GHz	线速率/Gbps	无线传输距离/m	FEC开销	调制格式	OPDMEPDM	技术方法	系统类型
[6]、2014	95	109.6	2	20% HD-FEC	4QAM	是/否	FWF 2×2 MIMO	离线 系统
[7]、2014	100	156	2	20% HD-FEC	QPSK	是/是	2×2 MIMO	
[8]、2016	85.5	20	1 700	7% HD-FEC	QPSK	是/是	2×2 MIMO	
[9]、2016	94	432	2	7% HD-FEC	16QAM	是/是	4×4 MIMO	
[10]、2018	94	54	2 500	7% HD-FEC	8QAM	是/否	2×2 MIMO	
[11]、2022	88.5	110	4 600	20% HD-FEC	PS-64QAM	否/是	SISO	
[12]、2013	81.6	1.25	5	7% HD-FEC	NRZ	否/否	FWF BERT	实时 系统
[13]、2017	83	2.5	50	7% HD-FEC	NRZ	否/否	BERT	
[14]、2017	91	24.08	3	20% HD-FEC	OFDM-16QAM	否/否	FPGA	
[15]、2018	79.3	16.69	1	20% HD-FEC	OFDM-32QAM	否/否	FPGA	

系统采用传统电下混频方式实现W波段无线信号的下变换，而实时系统则采用FWF架构和成熟光模块解决高速超宽带无线信号的实时处理难题<sup>[4]</sup>。

### 2.1 离线超400 Gbps传输验证与演示

基于双极化SISO链路的W波段离线通信系统的实验装置如图1(a)所示，主要包含光发射机、光纤链路、光-无线转换模块、无线链路和W波段无线接收机五个部分。

在光发射机中，不同波特率的不同调制格式信号由发送端数字信号处理(DSP, Digital Signal Processing)模块产生。长度为 $2^{18}$ 的伪随机序列依次通过符号映射、两倍上采样、根升余弦脉冲成型，随后添加同步头并进行重采样以匹配任意波形发生器的92 Gsa/s采样率。输出的复数基带信号送入一个偏置在空点的同相/正交(IQ, In-phase/Quadrature)调制器实现电光转换，其中，发送激光器采用一个线宽小于100 kHz的外腔激光器1。接着，利用自行搭建的偏振复用器模拟OPDM传输，其具体工作流程为：通过偏振合束器(PBC, Polarization Beam Combiner)将信号等分输出到两个偏振支路，其中一个支路中采用光纤延迟线(DL, Delay Line)以消除X偏振和Y偏振数据之间的相关性，然后使用保偏光耦合器(OC, Optical Coupler)组合两个偏振态，从而实现OPDM传输。该OPDM信号经过20 km标准单模光纤传输后，采用一个掺铒光纤放大器来补偿光纤传输带来的损耗。

在光-无线转换模块中，传输的OPDM信号经过偏振控制器调整适当偏振方向后，与外腔激光器2产生的

本振光一起通过保偏光耦合器耦合。为了使产生的毫米波信号位于W波段中心位置，设置两个外腔激光器的中心频率之差为92.5 GHz。不同波特率下耦合光波的光谱图如图1(b)所示。随后，上述耦合光波经过一个可调光衰减器后通过偏振分束器分成X和Y两个偏振分支，在每一个偏振分支上都采用一个单端光电探测器(PD, Photodetector)产生中心载频为92.5 GHz的毫米波信号。最后，经过W波段低噪声放大器放大后，两路毫米波信号送入一个W波段正交模转换器实现极化复用，产生的EPDM信号通过一对总增益为60 dBi的镜头校正天线实现双极化毫米波信号的1.3 m无线传输。

在W波段无线接收端，采用传统电下混频方式实现毫米波信号的下变换。首先通过正交模转换器将接收到的双极化毫米波信号重新分成水平和垂直两个极化支路，然后在各支路使用一个W波段集成谐波混频器(由六倍倍频器和W波段混频器构成)来实现毫米波频率下变频。射频源频率设置为18.85 GHz，下变频后的信号经过电放大器放大后由数字存储示波器以128 GSa/s的采样率进行采样，所捕获的信号用于进一步的离线DSP处理。接收端DSP包括重采样、基于斯密特正交化算法的IQ不平衡补偿和基于恒模算法的偏振解复用处理，以及时钟恢复、载波相位恢复、匹配滤波等操作。为了补偿光纤无线混合信道中的非线性损伤，本文采用沃尔泰拉均衡器完成信道均衡，随后进行误码率的计算。表2列出了本实验中部分关键器件及其参数。

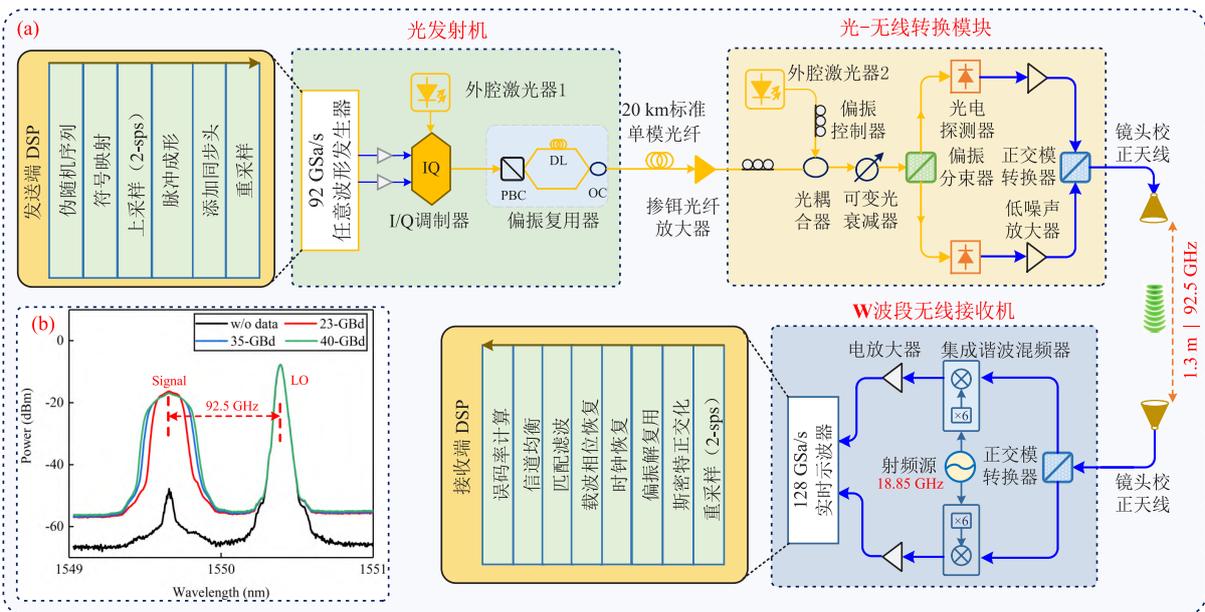


图1 基于双极化SISO无线链路的光线400 Gbps光子辅助W波段无线通信系统验证与演示

表2 离线通信系统关键器件参数

器件	相关参数
任意波形产生器	采样率: 92 GSa/s; 模拟带宽: 32 GHz
外腔激光器1	中心波长: 1 549.316 nm; 输出功率: 14 dBm
外腔激光器2	中心波长: 1 550.056 nm; 输出功率: 8 dBm
光电探测器	3 dB带宽: 100 GHz; 响应度: 0.6 A/W
W波段低噪声电放大器	工作带宽: 75~110 GHz; 放大增益: 35 dB
W波段正交模转换器	工作带宽: 75~110 GHz; 隔离度: 35 dB
W波段双极化透镜校正天线	工作带宽: 75~110 GHz; 天线增益: 2×30 dBi
射频源	工作频率: 18.75 GHz; 输出功率: 7 dBm
集成谐波混频器	工作带宽: 75~110 GHz; 倍频系数: ×6
数字存储示波器	采样率: 128 GSa/s; 模拟带宽: 59 GHz

离线传输性能测试结果如图2所示, 图2(a)首先给出了40 GBd情况下三种不同调制格式信号传输20 km光纤和1.3 m无线后, 误码率随PD输入光功率的变化情况。对于PDM-QPSK信号, 随着ROP的增大, 误码率逐渐减小, 当PD输入光功率超过3 dBm时甚至可以实现无误码传输。对于PDM-16QAM信号, 最佳PD输入光功率为5 dBm, 对应最低误码率约为 $6 \times 10^{-4}$ 。若要满足7%开销硬判决前向纠错(HD-FEC, Hard-Decision Forward Error Correction)和20%开销软判决前向纠错(SD-FEC, Soft-Decision Forward Error Correction)误码率阈值门限, PD的输入光功率需分别达到0.75 dBm和-2 dBm。对于容量最大的PDM-64QAM信号, 其最佳PD输入光功率降低到3 dBm, 对应最佳误码率约为 $1.4 \times 10^{-2}$ , 该误码率无法满足7% HD-FEC的误码率阈值门限。然而, 当输入PD光功率在1 dBm到7 dBm范围内时, 误码率可以满足20% SD-FEC的阈值门限。

图2(b)进一步给出了PDM-64QAM信号在三种不

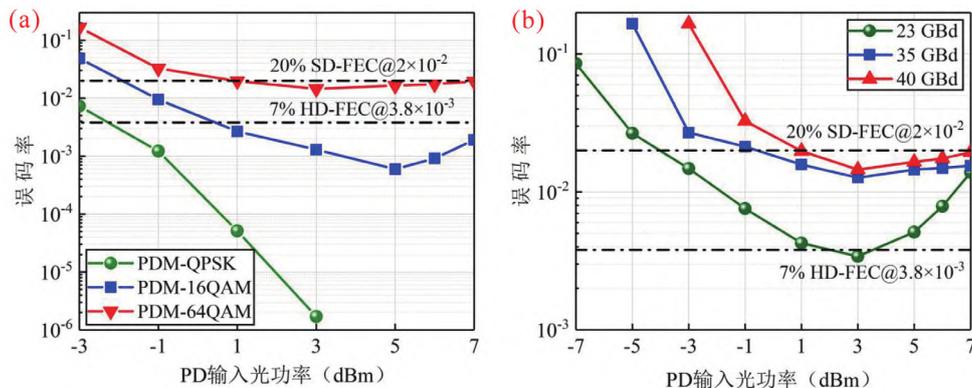


图2 离线传输性能测试 ( (a) 40 GBd波特率下三种不同调制格式以及 (b) PDM-64QAM信号在不同波特率下的误码率随PD输入光功率变化曲线 )

同波特率下的传输性能。首先, 三种不同波特率其最佳的PD输入光功率都为3 dBm。其次, 在23 GBd波特率下, 其最佳误码率能达到7% HD-FEC阈值条件。即使波特率提升到35 GBd甚至40 GBd, 系统的最佳误码率仍能满足20% SD-FEC阈值条件。在这个阈值条件下, 35 GBd波特率条件下具有超过8 dB的接收动态范围, 即使在40 GBd条件下也有6 dB的接收动态范围, 可以充分表现出本系统的优异性能。对于40 GBd PDM-64QAM调制信号, 系统可以实现总容量为480 Gbps (40 GBd×6 bit×2 pol), 剔除20%开销后, 系统净速率仍然可达到400 Gbps。

## 2.2 实时超100 Gbps传输验证与演示

基于光纤-无线-光纤传输架构和双极化SISO无线链路的实时100 GbE超100 m无线传输的光子辅助W波段无线通信系统如图3(a)所示。该系统主要由光发射机、光-无线转换模块、无线-光转换模块、光接收机以及两段光纤链路和一段无线链路等六个部分组成。其中, 光发射机和光接收机的配置相同, 都采用商业成熟的100 GbE数字相干光(DCO, Digital Coherent Optical)模块, 前者用于实时产生125 Gbps的PDM-QPSK信号, 而后者则利用相干光通信技术实现125 Gbps PDM-QPSK信号的实时接收。

在光发射机中, 100 GbE DCO模块实时产生31.379 GBd的PDM-QPSK光基带信号, 在滚降系数为0.2的情况下, 该OPDM信号输出总带宽约为37.65 GHz (超过W波段35 GHz全带宽)。经过20 km标准单模光纤传输后, 用掺铒光纤放大器补偿光纤传输引起的功率损耗。

在光-无线转换模块中, 通过光子辅助的方法产生所需的毫米波信号。首先, 采用可调谐光滤波器抑制掺铒光纤放大器引入的带外放大自发辐射噪声。其次, 在通过偏振控制器调整合适的偏振状态后, 该OPDM信号光

与由外腔激光器1产生的本振光在保偏光耦合器中耦合，耦合后的光谱图如图3（b）所示。同离线实验一样，信号光和本振光中心频率间隔为92.5 GHz。随后，插入一个可调光衰减器以调节输入光电探测器的光功率。接下来，采用与离线系统一致的光偏振分集探测和电正交模耦合方式，通过一个正交模转换器把两个偏振分支产生的92.5 GHz毫米波进行极化复用，获得一个125 Gb/s载波频率为92.5 GHz的双极化毫米波信号。

然后，同样通过一对双极化镜头校正天线来建立W波段电磁双极化SISO无线链路，无线传输距离最远可达100 m。为了应对长距离无线传输时接收端易受多径干扰的问题，选择在紫金山实验室的两栋楼之间进行超100 m无线传输系统实验验证，照片如图3（c）所示。其中，无线发射端放置在紫金山实验室中心楼的四层顶楼，而接收端则放置在紫金山实验室B1楼的第八层空旷窗口（共有十层）。为了提高毫米波接收功率，在接收天线前放置一个自制的聚四氟乙烯透镜，其直径为30 cm，焦距为50 cm，可以提供约50 dBi的增益<sup>[19]</sup>，以聚焦由长距离传输而引起发散的毫米波波束。

为了实现100 GbE信号的实时光相干接收，需要在无线-光转换模块中实现毫米波频段到光基带的透明转换。这可以通过以下两个步骤进行：首先实现从毫米波频段到中频信号的电下变频，其次是电光重调制和滤波，

进一步将获得的电中频信号转换为所需的光基带信号。如图3（a）中所示，通过正交模转换器将接收到的双极化毫米波信号重新分成两个正交电极化（H极化和V极化），然后使用同样的六倍频W波段集成谐波混频器实现两路毫米波信号的下变频。其中，设置射频源频率为18.65 GHz，于是，92.5 GHz的毫米波信号被下变换为19.4 GHz的中频信号。接着，通过级联放大之后，将得到的两路中频信号分别馈入两个相同的强度调制器（IM，Intensity Modulator）以实现电光转换。一个与发射端传输的OPDM信号存在23.8 GHz频率间隔的外腔激光器2作为两个IM的输入光载波，其输入功率通过保偏分束器均匀分配到两个支路。通过将每个IM偏置在传输空点，可以在两个支路中实现载波抑制双边带调制。随后，两路载波抑制双边带信号在适当的偏振控制下通过一个偏振合束器再次耦合，从而可以获得一个偏振复用的载波抑制双边带光信号。该载波抑制双边带信号首先由第二个掺铒光纤放大器进行功率放大，然后馈送到第二个光可调滤波器，通过滤除其中一个边带和不需要的自发辐射噪声，可以获得中心波长为1 549.279 nm的PDM-QPSK光基带信号。

在接收端，将经过另一段20 km标准单模光纤传输后的PDM-QPSK光基带信号馈入到光接收机进行实时接收并计算误码率。本实时通信系统中各关键器件参数如表3

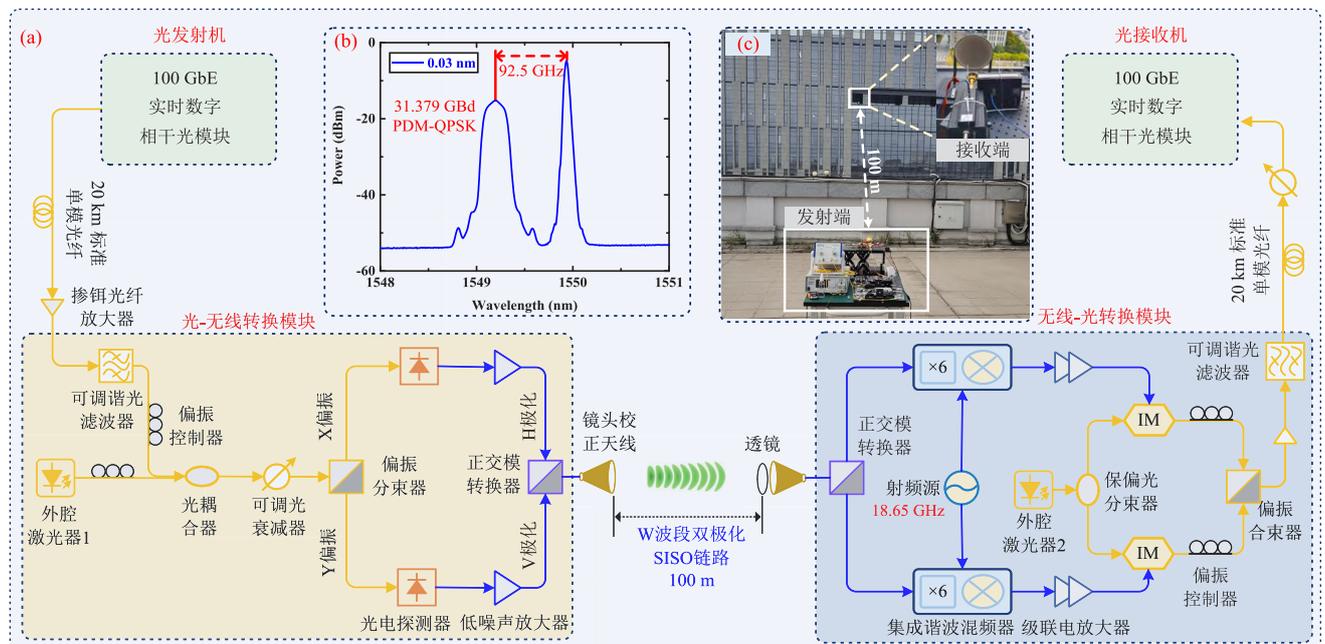


图3 基于光纤-无线-光纤传输架构和双极化无线SISO链路的实时100 GbE超100 m无线传输的光子辅助W波段无线通信系统演示（a）实时通信系统架构；（b）室外实验场地；（c）光-无线转换模块中耦合后的信号光谱

所示, 其中部分W波段器件如低噪声放大器、正交模转换器和双极化镜头校正天线等参数同离线系统一致, 表3中不再重复展示。

表3 实时通信系统关键器件参数

器件	相关参数
光发射机输出的OPDM信号	中心波长: 1 549.316 nm; 输出功率: 3 dBm 波特率: 31.379 GBd; 滚降系数: 0.2; 总带宽: 37.65 GHz
外腔激光器1	中心波长: 1 550.056 nm; 输出功率: 10 dBm
外腔激光器2	中心波长: 1 549.124 nm; 输出功率: 14.5 dBm
可调光滤波器	波长精度: 5 pm; 带宽精度: 1 pm; 插入损耗: 4.5 dB
聚四氟乙烯透镜	透镜直径: 30 cm; 透镜焦距: 50 cm; 透镜增益: 50 dBi
本振射频源	工作频率: 18.65 GHz; 输出功率: 7 dBm
级联电放大器	3 dB带宽: 47 GHz; 联合增益: 45 dB左右
强度调制器	3 dB带宽: 40 GHz; 半波电压: 5 V左右

实时传输性能测试结果如图4所示, 图4(a)首先给出了在两段20 km标准单模光纤和3 m/100 m两个不同无线传输距离下, 误码率随不同PD输入光功率的变化曲线。其中, 无线传输3 m在室内完成验证, 而无线传输100 m则通过图3(c)所示的场景完成验证。从验证结果可以看出, 在3 m无线链路传输条件下光毫米波转换的最佳光功率为5 dBm, 而100 m条件下的最佳光功率则为6 dB, 相较于3 m无线链路增大了1 dB。当PD输入光功率超过最佳功率值时, 由于PD的饱和效应, 误码率性能会降低。此外, 若要满足7% HD-FEC阈值条件, 3 m无线链路和100 m无线链路需要的光功率分别为-0.5 dBm和4.5 dBm。其中, 对于100 m无线传输, 满足要求的PD输入光功率范围为4.5~7 dBm, 展现了一个2.5 dB的功率裕度。

在最佳PD输入光功率条件下, 进一步研究了误码率随不同DCO接收光功率的变化情况, 结果如图4(b)所示。在

7% HD-FEC阈值门限下, 3 m和100 m的接收灵敏度分别为-28.1 dBm和-22.8 dBm。因此, 100 m无线传输引入的接收灵敏度代价超过5.3 dB。此外, 当接收光功率超过-20 dBm时, 可以获得一个稳定的传输性能。综上, 本实时系统在100 m无线传输情况下支持的总传输容量为125 Gbps, 剔除7%的FEC开销后, 可实现的净速率为117.3 Gbps。

### 3 结束语

为了解决传统2×2 MIMO无线链路结构复杂、多天线对准困难和通道间串扰大等问题, 本文提出了面向OPDM信号的SISO无线链路透明转换方案, 通过采用正交模转换器和双极化镜头校正天线, 在W波段基于双极化SISO无线链路分别从离线和实时两方面对大容量光子辅助亚太赫兹无线通信系统进行了验证与演示。无论是单通道空口速率超400 Gbps的大容量离线通信, 还是实时125 Gbps超100 m的超长距离无线传输实验, 均打破W波段无线通信的已有纪录, 对未来6G网络的发展具有极大促进意义。

### 参考文献:

- [1] 杨鸿儒, 李宏光. 太赫兹波通信技术研究进展 [J]. 应用光学, 2018,39(1): 12-21.
- [2] 马静艳, 张忠皓, 李福昌, 等. 太赫兹通信关键技术与发展愿景 [J]. 邮电设计技术, 2020(4): 1-5.
- [3] Elayan H, Amin O, Shubair R M, et al. Terahertz communication: The opportunities of wireless technology beyond 5G[C]//2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet). IEEE, 2018: 1-5.
- [4] 朱敏, 张教, 华炳昌, 等. 面向6G的太赫兹光纤一体融合通信系统: 架构、关键技术与验证 [J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(1): 191-210.
- [5] 中国联通网络技术研究院. 中国联通太赫兹通信技术白皮书 [R]. 2020.
- [6] Li X, Yu J, Cao Z, et al. Ultra-High-Speed Fiber-Wireless-Fiber link for emergency communication system[C]//Optical Fiber Communication Conference. San Francisco, California: OSA, 2014: M3D.6.

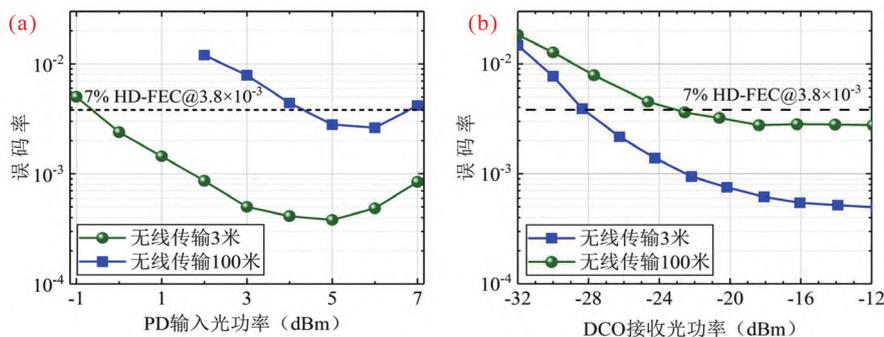


图4 实时传输性能测试 (误码率随 (a) PD输入光功率和 (b) DCO接收光功率变化曲线)

(下转第75页)

[6] Zhang D, Pan P, You R, et al. SVD-Based Low-Complexity Hybrid Precoding for Millimeter-Wave MIMO Systems[J]. Communications Letters IEEE, 2018,22(10): 2176-2179.

[7] Cui M Y, Zou W X. Low complexity joint hybrid precoding for millimeter wave MIMO systems[J]. Communications, 2019,16(2): 49-58.

[8] Alkhateeb A, Leus G, Heath R W. Limited Feedback Hybrid Precoding for Multi-User Millimeter Wave Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015,4(11): 6481-6494.

[9] Nakanishi K M, Mitarai K, Fujii K. Subspace-search variational quantum eigensolver for excited states[J]. Physical Review Research, 2019,1(3): 033062.

[10] JM Kübler, Arrasmith A, Cincio L, et al. An Adaptive Optimizer for Measurement-Frugal Variational Algorithms[J]. Quantum, 2020,4: 263.

[11] Endo S, Sun J, Li Y, et al. Variational Quantum Simulation of General Processes[J]. Physical Review Letters, 2020,125(1).

[12] Wang X, Song Z, Wang Y. Variational Quantum Singular Value Decomposition[J]. Quantum, 2021,5: 483.

[13] Bravo-Prieto C, D García-Martín, Latorre J I. Quantum Singular Value Decomposer[J]. Physical Review A, 2020,101(6): 062310.

[14] Li K, Wei S, Zhang F, et al. Optimizing a Polynomial Function on a Quantum Simulator. 10.1038/s41534-020-00351-5[P]. 2018.

[15] Meng F X, Yu X T, Zhang Z C. Improved quantum algorithm for MMSEbased massive MIMO uplink detection[J]. Quantum Information Processing, 2020,19(8): 117.

[16] Meng F X, Yu X T, Zhang Z C. Quantum algorithm for multiple signal classification[J]. Physical Review A, 2020,101(1): 012334.

[17] 翟光蔚. 基于量子奇异值估计方法的无线信道预测算法研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020.

[18] Ning B. Beamforming Technologies for Ultra-Massive MIMO in Terahertz Communications [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2023,4: 614-658.

[19] Peruzzo A, McClean J R, Shadbolt P, et al. A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor[J]. Nature Communications, 2014,5: 4213. ★

### 作者简介



汪锐: 南京邮电大学通信与信息工程学院在读硕士研究生, 研究方向为5G/6G无线通信技术、基于量子机器学习的无线通信技术。



李汀: 博士, 现任南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 研究方向为5G/6G无线通信技术、基于人工智能的无线通信技术、量子计算、量子机器学习等。



解培中: 博士, 现任南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 主要研究方向为MIMO预编码技术、干扰对齐、定位技术等。

(上接第63页)

[7] Li X, Yu J, Zhang J, et al. Antenna polarization diversity for 146Gb/s polarization multiplexing QPSK wireless signal delivery at W-band[C]//OFC 2014. IEEE, 2014: 1-3.

[8] Li X, Xiao J, Yu J. Long-Distance wireless mm-wave signal delivery at W-Band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016,34(2): 661-668.

[9] Li X, Yu J, Xiao J. Demonstration of Ultra-Capacity wireless signal delivery at W-Band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016,34(1): 180-187.

[10] Li X, Yu J, Wang K, et al. Delivery of 54-Gb/s 8QAM W-Band signal and 32-Gb/s 16QAM K-Band signal over 20-km SMF-28 and 2500-m wireless distance[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018,36(1): 50-56.

[11] Wang F, Yu J, Wang Y, et al. Delivery of polarization-division-multiplexing wireless millimeter-wave signal over 4.6-km at W-band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022,40(19): 6339-6346.

[12] Olmos J J V, Pang X, Lebedev A, et al. Multi-Gigabit capacity W-band hybrid wireless-photonic transmission link[C]//Asia Communications and Photonics Conference. 2013: ATh3G.1.

[13] Chorcho L, Rommel S, Turkiewicz J P, et al. Reconfigurable radio access unit for DWDM to W-band wireless conversion[J]. IEEE Photonics technology letters, 2017, 29(6): 489-492.

[14] Li X, Xiao X, Xu Y, et al. Real-time demonstration of over 20Gbps V-and W-band wireless transmission capacity in one OFDM-RoF system[C]//Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2017: M3E. 3.

[15] Deng R, Yu J, He J, et al. Twin-SSB-OFDM transmission over heterodyne W-band fiber-wireless system with real-time implementable blind carrier recovery[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018,36(23): 5562-5572.

[16] Li X, Yu J, Wang K, et al. Photonics-aided 2 × 2 MIMO wireless terahertz-wave signal transmission system with optical polarization multiplexing[J]. Optics Express, 2017,25(26): 33236-33242.

[17] Zhao F, Yang X, Zhao L, et al. Demonstration of 4096QAM THz MIMO wireless delivery employing one-bit delta-sigma modulation[J]. Optics Letters, 2022,47(24): 6361-6364.

[18] Cai Y, Zhu M, Zhang J, et al. Real-time 100-GbE fiber-wireless seamless integration system using an electromagnetic dual-polarized single-input single-output wireless link at W band[J]. Optics Letters, 2023,48(4): 928-931.

[19] Li W, Yu J, Ding J, et al. 104 meters photonics-aided terahertz wireless transmission without terahertz amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022,34(16): 858-861. ★

### 作者简介



蔡沅成: 副研究员, 博士毕业于电子科技大学, 现任网络通信与安全紫金山实验室与东南大学联合培养博士后, 主要研究方向为直接探测光纤通信系统、光纤无线融合通信系统和6G毫米波/太赫兹通信技术。



李建康: 湘潭大学在读本科生, 主要研究方向为6G毫米波/太赫兹通信技术。



罗炜: 东南大学在读硕士研究生, 主要研究方向为光纤无线融合通信系统及先进数字信号处理技术。