

【太赫兹通信技术论坛】中移动：太赫兹在移动通信中应用的思考

太赫兹通信 2023-06-27 08:51 发表于上海

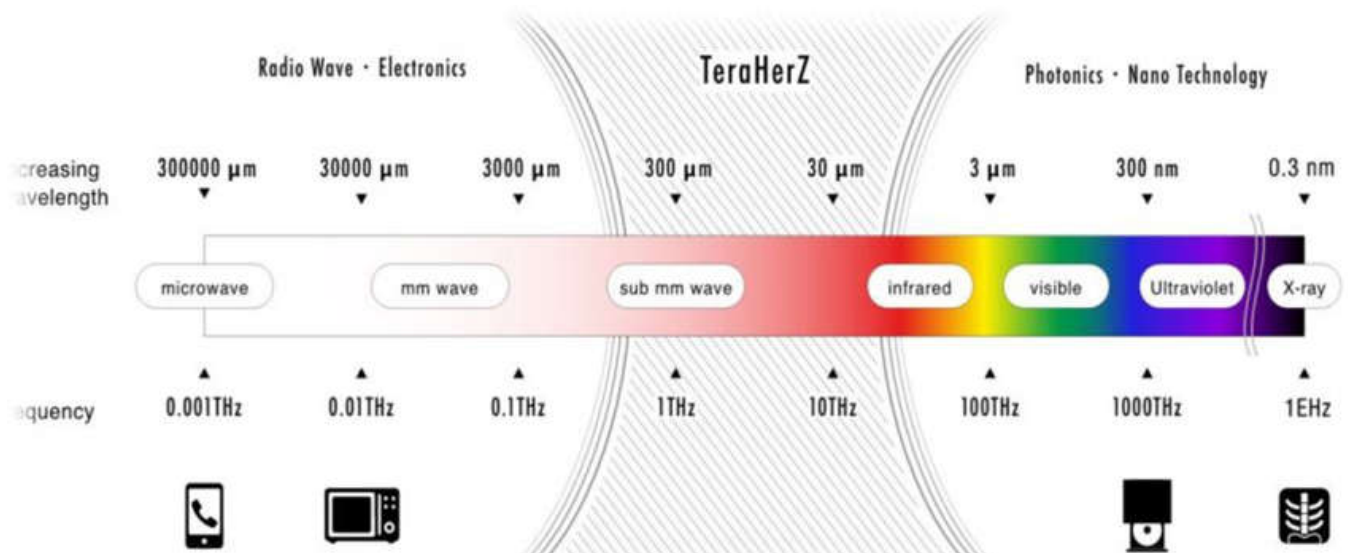
演讲者：何洪俊 主任研究员

任职单位：中国移动研究院未来研究院

讲座日期：首届全国太赫兹通信技术论坛，2023年5月25日

一、太赫兹背景与潜在场景

近年来，介于毫米波与红外线之间的太赫兹频段受到了广泛的关注。太赫兹频段频谱资源丰富，处于微波电子学与红外光子学的交叉区域，频率从 0.1到10THz。从通信能力的角度，太赫兹通信高速数据传输能力强，具备 100Gbps 至 1Tbps 的高速无线数据传输能力；从传输特性的角度，太赫兹通信波束窄，具有较强的传播方向性，良好的保密性和抗干扰性，并且可以探测更小的目标，进行更精确的定位。太赫兹通信的劣势在于相比于微波穿透性较差，非视距场景传播困难；在大气中长距离通信时，太赫兹大气衰减较为严重，传输效率低。



太赫兹通信的潜在应用场景主要包括：

- **光纤代替：**主要包括固定无线接入（Fixed Wireless Access）和高速无线回传（Wireless Backhaul）两种方式。其中，太赫兹固定无线接入将支持大带宽高速率，能够补充现有商用的毫米波频段，提供几十GHz带宽，上百Gbps速率的超高速无线网络。太赫兹高速无线回传能够

代替光纤克服地形问题，未来有望提供超高容量的无线回传网络，并能够与光纤网络进行无缝融合。同时，BBU与BBU间光纤施工成本较高场景，可采用太赫兹通信进行代替或降低工程成本。

- **超高速无线传输**：主要场景包括无线室内/室外场景、无线数据中心场景、无线数据亭场景。其中，无线室内/室外场景面向6G、全息通信、虚拟现实/增强现实、3D游戏元宇宙等业务场景，以虚拟现实为例，至少需要几十Gbps的空口速率支持无压缩的视频帧数据传输；同时，体育赛事转播等业务需求将随分辨率提升逐渐增加，以体育赛事转播为例，4K 60P 数据无压缩视频传输至少需要10-20Gbps的业务速率；无线数据中心场景中，太赫兹波可以提供更大的带宽和更高的传输容量，太赫兹通信可支持几十Gbps 至 Tbps 级的高速传输速率，有足够的带宽以支撑数据中心的数据传输，且太赫兹传输可以通过更小尺寸的收发器交织大量不同频带的天线来补偿严重的传输损耗；在无线数据亭场景中，面向6G可分布在公共场所，可以同时点对点或者点对多点高速数据传输，同样，通过太赫兹通信可支持几十Gbps到 Tbps 级的高速传输速率。
- **太赫兹通感一体化通信**：通过太赫兹大带宽的优势，能够提供更高的感知精度，辅助沉浸式业务等需要物理空间感知的新业务发展。同时，通过对周围环境势态的感知，能够辅助太赫兹通信资源进行预测性分配。

频点		2.6GHz	4.9GHz	6GHz	26GHz	200GHz
带宽		160MHz	100MHz	500MHz	800MHz	15-40GHz (光生) ; 10-15GHz (电生)
距离分辨率 $\Delta r = \frac{c}{2B}$		0.93m	1.5m	0.3m	0.19m	0.004m@37GHz (光生) ; 0.01m@15GHz (电生)
测距精度 分辨率 $\approx \frac{1}{1.6\sqrt{\alpha \text{ SINR}}}$	回波 SINR=0dB	0.58m	0.94m	0.19m	0.12m	0.0025 @37GHz (光生) ; 0.0062 @15GHz (电生)

太赫兹通感一体化通信的挑战在于：首先，太赫兹频段带来较高的路径损耗，更适用于短距通信感知一体化场景；其次，太赫兹感知一体化波形对射频系统的挑战，功率放大器补偿能力、相位噪声的对抗能力以及帧结构的设计和调度能力等。

- **空天地一体化通信、星间通信**：太赫兹波在外层空间中基本可做到无损传播，通过极低的功率就可实现超远距离传输。太赫兹高频特性利于太赫兹系统实现小型化、轻量化，易于部署在星载平台。太赫兹通信能够搭载于卫星、无人机、飞艇等天机平台和空基平台，作为无线通信和中继设备，应用于卫星集群间、天地间和千公里以上的星间高速无线通信场景，实现未来的空天地海一体化通信。

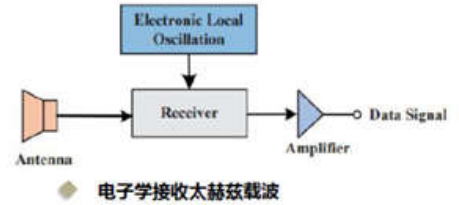
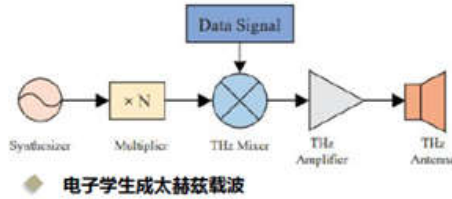


- **微小尺度通信**：太赫兹微小尺度通信主要包括芯片的片上/片间高速无线通信与纳米传感器体域网。片间的太赫兹通信能够通过光子学的方式产生300GHz以上的太赫兹载频，实现十几Gbps至几十Gbps的片间无压缩数据传输。未来通过将太赫兹技术与微纳技术的结合，有望实现毫微尺寸、高效率、低成本的太赫兹通信收发器件与设备；对于纳米传感器体域网，随着柔性电子器件的发展，可穿戴的柔性通信设备逐渐增多，未来太赫兹将同样适用于基于体域网的短距通信场景。

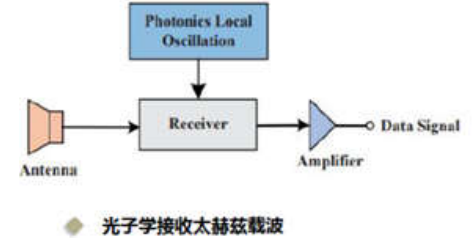
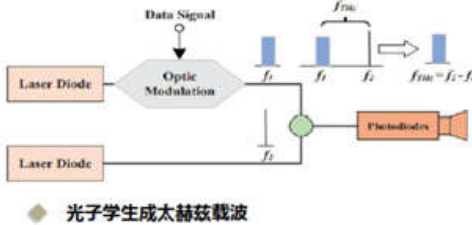
二、太赫兹生成方式与关键器件

目前太赫兹信号具有两种主要的生成方式：“自下而上”的电子混频方式产生太赫兹载波与“自上而下”的光子拍频方式产生太赫兹载波。不同太赫兹信号生成方式适用于不同的频段，例如：在300GHz以下的太赫兹频段，自下而上的电子学方式更具有优势，系统带宽根据采样板的采样率，平均带宽能够支持到10-20GHz左右；在300GHz以上的太赫兹频段，自上而下的光子学方式更具有优势，光子学方式系统平均带宽能够支持30GHz以上。根据ITU所划分频谱，目前在100-275GHz的频段业务已经划分完成，总带宽约97.2GHz，预计分配到单个运营商的带宽最多不超过40-50GHz，而且是非连续频段。因此300GHz以下，电子学系统及光子学系统都有能力匹配频谱需求。

1. “自下而上”的电子混频方式产生太赫兹载波:



2. “自上而下”的光子拍频方式产生太赫兹载波:



不同太赫兹信号生成方式器件瓶颈主要包含:

- 基带部分：电子学器件瓶颈为低精度，高采样率AD/DAC。目前商用transceiver以及高速采样板的采样率仍旧较低，需要进一步研发低精度高采样的AD/DAC以满足电子学太赫兹系统需求。光子学器件瓶颈为现有光模块中的AD/DAC。目前商用光模块中AD/DAC虽然采样率能够实现几十GSa/s，但AD/DAC本身大部分非国产，面临与电子学相同的问题。
- 射频前端部分：电子学器件瓶颈为混频器。部分国产器件指标实测数据不完整，尤其高频段混频器工艺产线有些差距，总体正在逐步发展。光子学器件瓶颈为单行载流子光电探测器。国内无商用器件，相关研究相对较少，但是光子学生成方式必不可缺的器件
- 光子学与电子学器件的共同瓶颈为功率放大器/底噪放大器。功放与底噪放D波段以及220GHz国内具有自主设计能力，但是不具备全频段流片工艺，商用产品稀少。主要原因是工艺产线的差距过大，涉及三五族基底材料和HEMT,HBT等晶体管工艺产线严重不成熟导致。

器件	混频器
关键问题	频率越高，国内外器件差距越大，主要涉及二极管工艺，变频损耗是主要性能指标。
器件分类	基频混频器。 应用频段：40-140/170GHz 进口变频损耗约8dB，国产约8dB
	次谐波混频器。 应用频段：140/170-500GHz 进口 < 7dB，国产 < 10dB
未来器件/工艺倾向	共振隧穿二极管 (RTD)，肖特基二极管 (Schottky diode) *，晶体管 (HBT等) 基底：GaAs*，AlN，石英，三五族材料
技术补充	实现混频器的器件有三种：低温超导绝缘 (SIS, Superconductor Insulator Superconductor) 混频管、热电子测热辐射 (HEB, Hot Electron Bolometer) 混频管、肖特基势垒二极管(SBD,Schottky Barrier Diode)。SIS 和 HEB 都需要在液氮低温环境，其应用场景严重受限。

器件	光电探测器 (UTC-PD)
关键问题	传统PIN-PD带宽不足，难以生成100GHz以上的频率，必须采用UTC-PD。UTC-PD国内无商用产品，市场小，需求较少。
基底材料	砷磷 HEMT器件
关键指标	带宽
技术补充	影响带宽的关键因素：载流子的渡越时间，RC的延迟时间。 缩短载流子渡越时间的手段：通过梯度掺杂以及设计渐变带隙，本质上提升载流子漂移速度，在内部时间内建电场以及能带梯度，以缩短载流子的渡越时间。 同时，减少渡越时间后可以缓解在吸收层的空间电荷效应，提高输出功率。

器件	功放/低噪放
关键问题	功放与底噪放D波段以及220GHz国内具有自主设计能力，但是不具备全频段流片工艺，商用产品稀少，主要原因：工艺产线的差距过大，涉及三五族基底材料和HEMT,HBT等晶体管工艺产线严重不成熟导致。
器件分类	<p>功放</p> <p>增益：国产约15dB；进口约18dB， 输出P1dB：国产约11dBm；进口约17dBm， 输出Psat：国产13 - 17dBm；进口约20dBm</p> <p>低噪放</p> <p>增益：国产15 - 20dB；进口约22dB 噪声系数：国产3.3 - 4dB；进口约3dB以下</p>
未来器件/工艺倾向	InP HBT (InGaAs mHEMT)
技术补充	二极管器件无法实现增益，硅基以及锗硅技术晶体管的频率特性弱于 InP HEMT 和 InP HBT，最适合进行单片放大电路设计的两类单片工艺便是 InP HEMT 和 InP HBT 工艺。

未来太赫兹器件待突破展望主要包含以下方面：

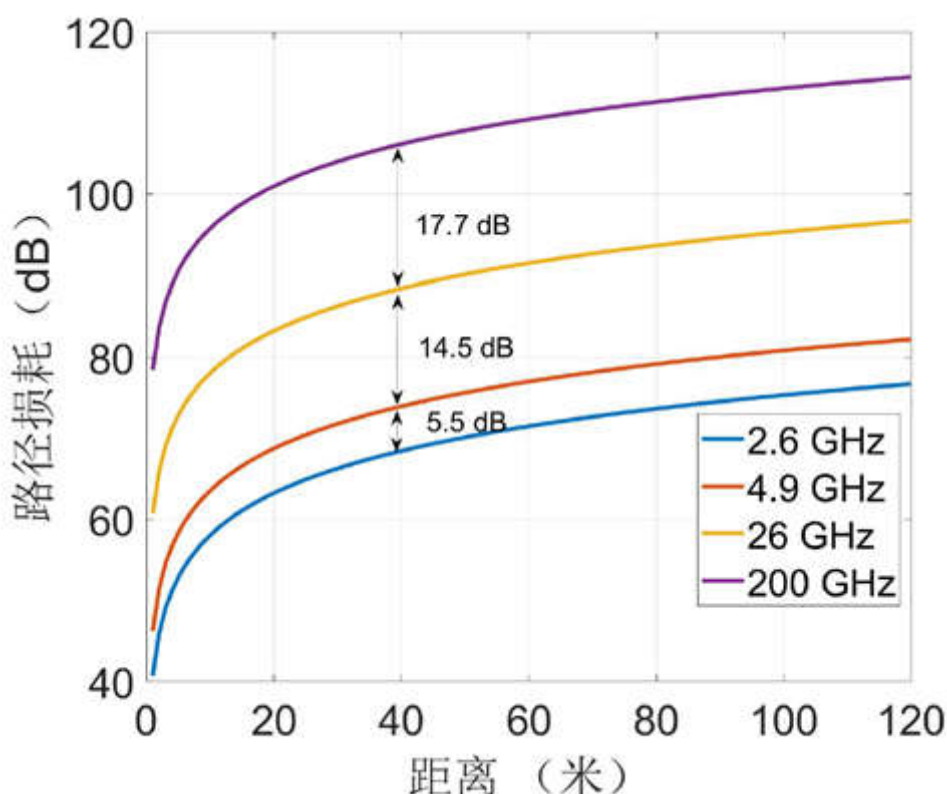
- **低精度，高采样率AD/DAC**：需要开发低精度，高采样率的AD/DAC，在满足系统大带宽的同时能够具有较低成本。根据香农采样定理，采样率需要大于系统带宽的两倍。目前商用化的高频AD/DAC多集成与ADI等厂商的电学transceiver中，服务于传统低频段，因此具有高精度，以满足高阶的编码调制技术。而低频段采用高阶调制编码的原因是频谱资源相对较为紧张，通过高阶编码调制增加谱效。但是太赫兹频段频谱资源相对充足，而且大带宽是其优势之一。高精度低采样率的AD/DAC无法满足系统大带宽的需求。高精度高采样率的AD/DAC成本较高。因此需要开发低精度高采样率的AD/DAC，在满足系统大带宽的同时能够具有较低成本。
- **布局140GHz以上功率放大器半导体工艺与产线**：需要布局140GHz以上功放，面向基于InP的基底材料的先进工艺线，包括HEMT，HBT器件是未来功放的重要发展方向。功放器件主要有两个重要的选择，基底材料与半导体工艺。未来功放重要的发展方向是三五族的HBT器件。三五族HBT为纵向器件，击穿电压更高，增益平坦度较好，功率容量较大，适合进行功率放大电路的研制。并且与三五族HEMT器件相比，HBT对曝光设备的要求低，例如0.5μm发射极的HBT与25nm栅长的HEMT器件的截止频率相当，这使得HBT在工艺上占据优势，非常适合作为国产太

赫兹器件的突破口进行研究；而三五族HEMT作为横向器件，优势是噪声性能，适合进行低噪声放大电路的研制，不需要像InP HBT电路对基极进行流控，直流电路设计更加简便。

- **光子学器件UTC-PD**：需要研发UTC-PD以支持300GHz以上频段：PIN-PD无法提高带宽（拍频频率差）的原因是由于传统的PIN-PD的输出功率在一定范围内正比于吸收层的受光面积和厚度，但增大吸收层厚度会提高PIN-PD的载流子渡越时间，从而降低带宽，因此对于PIN-PD的带宽和功率是一组Trade off，很难实现大带宽和高功率的共存。但UTC-PD与PIN-PD的器件结构不同，在缩短载流子渡越时间的同时，不需要减少吸收层的厚度，因此输出功率不会与带宽互斥。而在100GHz以上的频段，尤其是结合场景，300GHz以上的频段，大带宽的光电探测器必不可少。

三、太赫兹信道与组网研究

太赫兹信道模型的典型特征包括：1) 额外的传播损耗：太赫兹由于波长较短，在遇到水蒸气、氧气时引起部分分子共振，损失信号能量，导致传播过程中存在额外损耗；2) 散射机理改变：随着波长的减小，物体表面的粗糙度会逐渐大于太赫兹频波长，物体表面散射由瑞利散射逐渐转变为Mie散射，散射能量更为集中；3) 优良的穿透性：太赫兹具有穿透纸张、塑料、织物布料等非金属材料的能力，并且不会因携带大能量而导致电离辐射。



针对太赫兹信道的研究，由于太赫兹信道具有高路损、少多径、空间稀疏等特点，其信道测量方法由外场实测向射线追踪仿真方式转变，且研究场景由RMa、UMa、UMi向室内热点、室内工厂等微场景转变。未来太赫兹信道的研究重点在于：对于太赫兹信道特性测量方法的研究，除了搭建高精度、大带宽、多天线的信道测量平台外还需要研究高效的信道仿真手段，从而使仿真建立的模型更具有普适性；对于太赫兹信道特性分析的研究，重点着眼于频率跨度较大的频域非平稳性信道特性，以及太赫兹信道稀疏性的研究。同时，对于包括空天地海在内的新信道场景进行全面的信道特性分析研究；对于信道建模方法的研究，基于簇核与环境散射体思想，研究建立具有太赫兹信道稀疏特性的空时频信道模型。

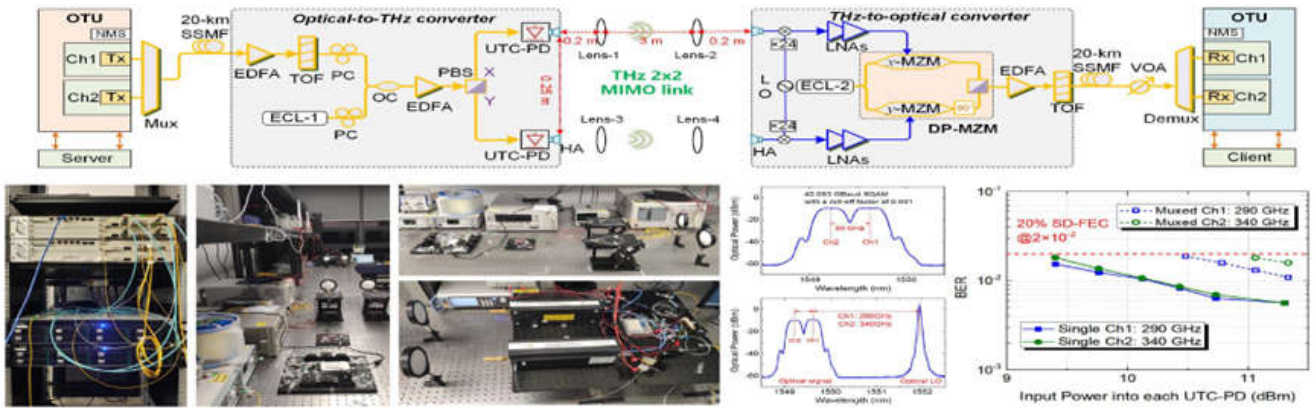
太赫兹大规模天线空口传输的优势与挑战主要有以下方面：其优势在于1) 移动性：超大规模天线系统进行波束赋形，能够解决移动性的问题，同时，实现高增益极窄波束，提升覆盖距离。2) 结合应用需求：超大规模天线系统进行波束赋形，能够实现支持通信感知能力的波束扫描等能力；太赫兹大规模天线空口传输的挑战在于：1) 材料工艺：为支持太赫兹频段，天线尺寸将达到亚毫米级甚至纳米级。如何实现小尺寸的天线阵子将是一项关键性的挑战。基于新材料天线在太赫兹频段下可能替代传统天线。2) 集成化问题：太赫兹频段由于天线尺寸的逐渐缩小，单个阵子之间的集成将成为重要的挑战，利用新型材料降低阵列天线的集成难度，提升天线性能并降低成本将是未来另一个关键挑战。

从太赫兹组网的角度，其主要面临的挑战是太赫兹波绕射能力差，易被遮挡，导致通信链路不稳定，易中断。太赫兹波束极窄，覆盖范围小，导致移动性差，波束管理复杂度较高。针对这一挑战一个潜在的应对思路是使用太赫兹频段与中低频段融合组网。将太赫兹频段与中低频段融合组网，充分发挥高中低频段协同传输的优势，可解决太赫兹通信易中断、移动性差等问题，有效提升系统鲁棒性。在融合组网架构下，空口传输方案的设计可考虑以下方面：1) 快速接入：太赫兹波束数量庞大，初始接入阶段终端需使用不同接收波束对大量发送波束进行测量和上报，反馈开销大，也导致时延大，需设计中低频段辅助的快速接入方案。2) 能耗管理：太赫兹天线阵列庞大，发射功率大，需考虑按需启用太赫兹射频链路，降低网络能耗；另一方面，终端电池容量有限，上行发射功率较小，导致太赫兹上下行覆盖极不对称，可考虑上下行解耦传输方案，实现终端节能。3) 快速切换：太赫兹波束覆盖范围小，需进行超密集部署，带来切换频繁、测量开销大等问题，可设计中低频段辅助的高频波束管理和小区切换方案，进一步简化切换流程，减小中断时延，保证用户体验的一致性。

四、现阶段合作成果

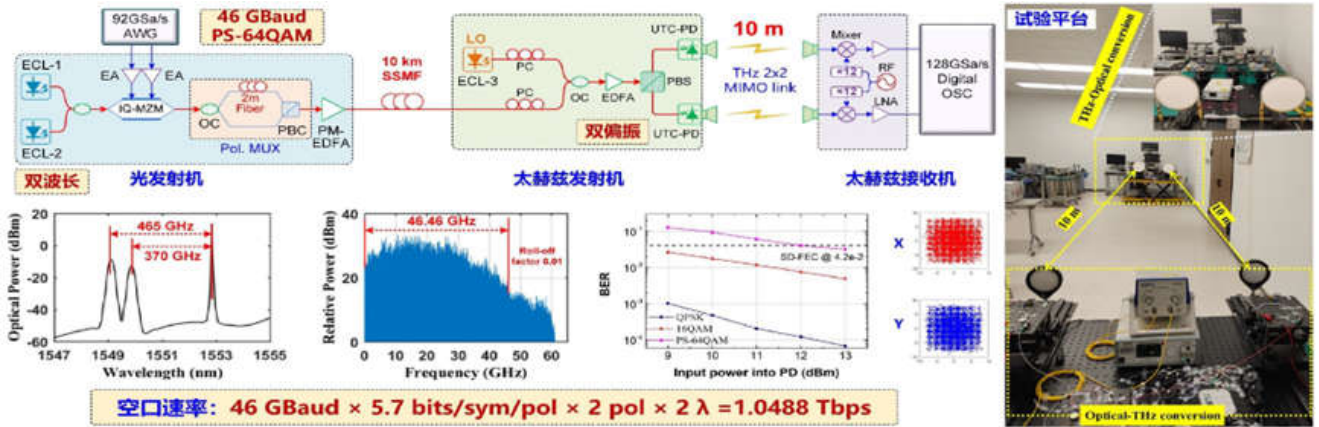
- 国际首个400Gbps实时太赫兹系统

联合东南大学朱敏教授团队，率先实现6G太赫兹100/200/400Gbps实时无线通信。已创造出目前世界上太赫兹无线通信的最高实时传输记录，成果入选2021年全球光通讯领域顶级学术盛会OFC Demo Zone（全球仅16篇），2022年欧洲光通信顶级会议ECOC，2021年中国信息通信领域十大科技进展（已公示）。



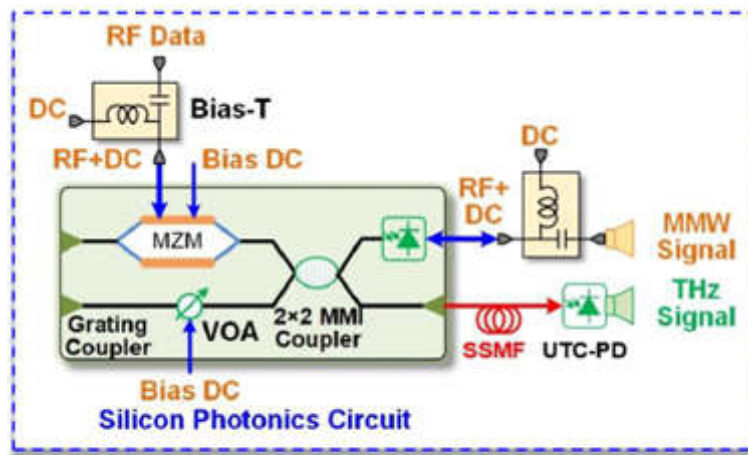
● 全球首个1Tbps离线太赫兹系统

联合东南大学朱敏教授团队，率先实现T比特级光子太赫兹无线通信以及传输验证，采用双波长双偏振传输机制，实现空口速率1.0488Tbps；创造出目前世界上太赫兹无线通信的最高离线传输记录。



● 基于W波段的光电混合集成芯片

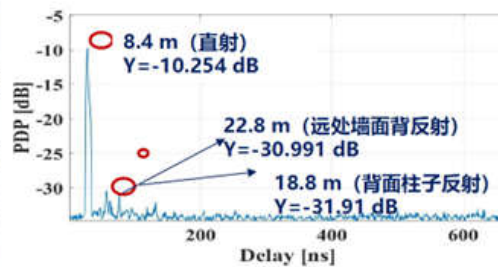
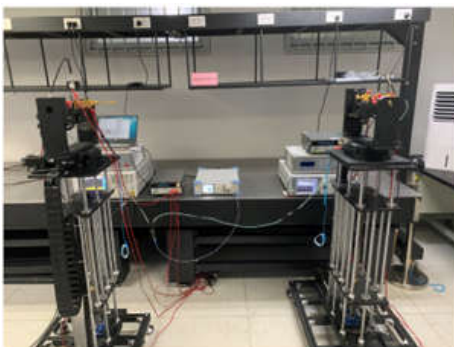
联合东南大学朱敏教授团队，研制出业界首款超宽带光子毫米波/太赫兹收发功能一体集成芯片及封装模块，可实现光纤与毫米波/太赫兹通信的无缝融合。突破高频电子器件带宽瓶颈，核心技术指标国际领先，封装后的调制器3dB带宽35GHz，探测器3dB带宽48GHz，可调衰减器消光比大于30dB。



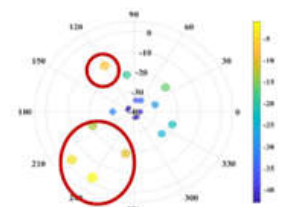
光子毫米波/太赫兹收发功能一体集成芯片

• 太赫兹信道测量成果

联合北京邮电大学张建华教授团队，搭建太赫兹信道测量平台，支持全角度太赫兹信道测量：工作频率达到75-110GHz，130-150GHz，220-330GHz，带宽达到1.2GHz/2GHz，旋转精度达0.01°；开展100 GHz办公室场景全角度信道LOS，NLOS测量，利用角度-时延域极值法，取同一时延下的最优多径合成全向PDP，同时针对合成全向PDP，进行了办公室场景太赫兹角度扩展分析。



测量点1的合成PDP



LOS位置2角度功率分布

五、 结论

目前太赫兹技术在电子学和光子学领域都正在快速发展，但在商业化过程中仍然存在一些需要解决的问题。首先，在系统方面，需要逐步从单一器件的性能提升，向整个系统性能的提升以及集成化发展。这意味着需要在不断改进太赫兹器件的基础上，将其与其他组件整合成高性能、高效率的系统。其次，在组网方面，太赫兹技术需要与其他频段如可见光、毫米波等进行融合组网。这种融合可以实现多频段的互补和协同工作，提高整体通信系统的可靠性和容量。同时，太赫兹技术还需要实现与光纤网络的无缝融合，以便更好地利用光纤的传输能力来扩展太赫兹通信的覆盖范围和传输距离。第三，从场景应用的角度来看，需要更深入地研究太赫兹技术在通信感知和高速无线回传方

面的潜力。太赫兹通信具有穿透非金属和低散射等独特优势，可以在复杂环境下实现通信和感知需求。因此，探索太赫兹技术与这些应用场景的结合，可以为智能交通、安全监控、医疗诊断等领域带来更多创新和发展机会。总而言之，太赫兹技术的商用化进程面临着系统性能的提升、与其他频段的融合组网以及与各种场景的深入结合等多个问题。只有解决这些问题，太赫兹技术才能真正实现商业化，并在未来的通信和应用领域发挥更大的作用。

阅读 568

分享 收藏

5 1

分享此内容的人还喜欢

发展量子通信为何要上天?

合肥市科普志愿者协会



光纤传感论文速递 2023.6.12

光纤传感速递

论文
速递

光纤传感器的基本原理

1个朋友收藏 泊光



发消息