



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Wireless Communications—Review

从太赫兹成像到太赫兹无线通信

Yi Huang^{*}, Yaochun Shen, Jiayou Wang

Department of Electrical Engineering and Electronics, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GJ, UK

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 November 2021

Revised 11 April 2022

Accepted 16 June 2022

Available online 15 September 2022

关键词

通信

成像

太赫兹技术

无线通信

摘要

太赫兹 (THz) 技术是公众熟知的一种强大的成像工具, 该技术已经被应用于安全领域和医学扫描, 生成了许多使用其他技术所无法获得的令人印象深刻的图像。随着 5G 移动网络的推出, 对 6G 无线通信的研究正在升温。据预测, 太赫兹技术将被用于 6G 和未来的无线通信。本文回顾了太赫兹技术是如何被应用于成像和无线通信的, 然后介绍和确定了该领域的最新发展, 最后检查和比较了这两种应用中的常见设备和问题。本文还讨论了将太赫兹成像与无线通信整合的可能性, 提出并讨论了目前面临的挑战和未来前景。结果表明, 太赫兹技术是未来成像和无线通信的一项关键使能技术。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

无线通信系统从 20 世纪 80 年代的第一代发展到最近的第五代 (5G), 一直在用技术改变世界通信, 成为我们日常生活的驱动力。现在, 通过无线网络, 我们随时随地都可以信息互通, 获得大量的实时信息。然而, 5G 系统的峰值数据速率约为 10 千兆比特每秒 (Gbps), 对于某些应用 (如全息图和多感知通信, 这是虚拟通信模式的下一个前沿领域) 来说仍然是不够的, 世界各地的研究人员已经开始研究下一代, 即第六代 (6G) 无线通信系统, 预计其数据速率将超过 1 太比特每秒 (Tbps), 如图 1 [1–3] 所示。国际电信联盟 (ITU) “网络 2030” 和中国 “IMT-2030” (6G) 工作组发布了多份白皮书 [4], 提出未来无线通信系统的工作频段将从目前的微波和毫米波 (mmWave)

转移到太赫兹 (THz) 频段, 以满足高数据速率和高带宽的要求。根据设想, 6G 无线通信技术可能会整合物联网 (IoT), 覆盖非常广泛的应用 (如医疗保健、自主系统和卫星通信), 并将对公民、消费者和企业走向完全智能和自主系统产生重大影响 [3]。因此, 太赫兹技术正在成为无线通信和未来网络领域的一个研究重点。

太赫兹技术并不是新的技术, 70 多年来该技术一直是天文学的一个特殊学科领域。在过去的 30 年里, 用于安全和医疗领域的太赫兹成像一直是一个热门话题。该技术已经取得了重大的进展, 在该领域人们已经出版了许多相关的书籍和研究论文 [5–8]。最近大众对太赫兹无线通信的关注度激增, 太赫兹技术的发展迎来一个巨大的浪潮。近年来, 大量的工作用于研究和开发太赫兹通信系统。在参考文献 [7–21] 中可以找到许多综述论文。然而,

^{*} Corresponding author.

E-mail address: Yi.Huang@liverpool.ac.uk (Y. Huang).

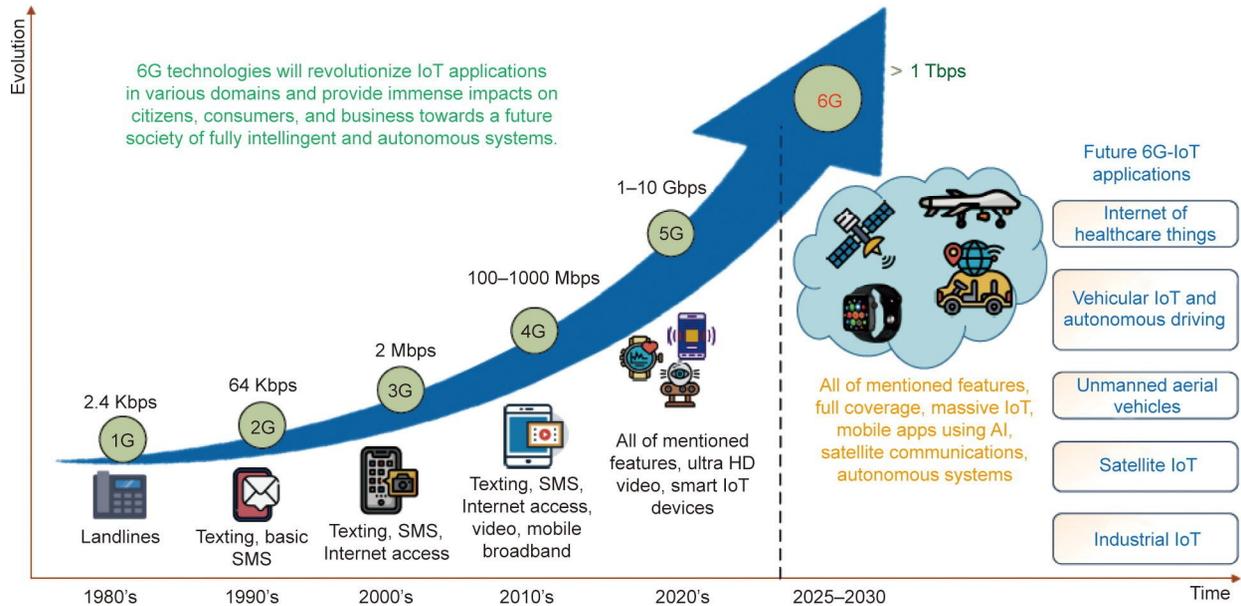


图1. 无线网络向未来6G无线通信的演变。Kbps: 千比特每秒; Mbps: 兆比特每秒; SMS: 短信服务; HD: 高清晰度; IoT: 物联网; AI: 人工智能。转载自参考文献[3], 经IEEE许可, ©2022。

所有这些综述论文都集中在太赫兹成像或太赫兹无线通信上, 并没有把它们当作相互关联或集成的太赫兹技术 (仅参考文献[21]作为一篇短文章涉及了二者)。

本文研究了太赫兹成像和太赫兹无线通信技术, 重点介绍了这些领域的主要成就和最新进展, 确定了它们的相似性和差异, 以便更好地理解 and 探索这些技术。此外, 本文还讨论了这两种技术的整合, 强调了面临的挑战, 并提出了未来的发展方向。本文的其余部分安排如下: 第2节介绍了太赫兹技术的基础知识, 重点是辐射特性和信号生成; 第3节回顾了太赫兹成像技术从过去到现在的发展, 包括其主要方法、成就和挑战; 第4节讨论了太赫兹无线通信, 包括其设计架构、技术现状、主要挑战和可能的解决方案; 第5节对两种技术进行了比较, 讨论了两种技术整合的可能性, 并给出了结论和未来的展望。

2. 太赫兹基础知识

太赫兹频段的定义有几种不同的方式。最被广泛接受的太赫兹频段的定义是: 范围为10 THz~100 GHz (波长0.03~3.00 mm), 位于微波和红外 (IR) 频段之间。与微波和红外技术不同, 太赫兹技术并不发达, 而且市场上缺乏成本合理的相关元件、设备和系统。因此, 太赫兹频段可以被看作电磁波谱中微波和红外频段之间的一个间隙 (因此被称为“太赫兹间隙”), 但这有待进一步探索和推进。到目前为止, 太赫兹频段还没有被分配, 因此可以自由使用, 但预计这种情况很快会改变[22]。

天文学家为了更好地了解宇宙, 研究了来自太空中的太赫兹波。通过这种方式, 他们发现了大气层的吸收特征, 这对天气预报和遥感都很有帮助[5-6]。自20世纪90年代以来, 将太赫兹用于安全和医学成像领域已成为一个热门话题, 并取得了重大进展[7-8]。本节将重点讨论太赫兹的两个特殊功能, 即辐射特性和信号生成或检测, 这两个特性与其射频 (RF) 和微波对应的特性有很大不同。

2.1. 太赫兹的传播特性

与射频和微波一样, 太赫兹波是非电离且非破坏性的, 从本质上来讲, 对人类是安全的。然而, 太赫兹波的波长更短[1 THz的波长是0.3 mm (300.0 μm)], 因此能够提供比微波更高的成像分辨率。虽然它们对大多数材料的穿透深度不如微波, 但它比红外和可见光的穿透深度要好, 可以显示身体和包装中的隐藏物体。这就是太赫兹被用来制作医疗和安全应用的精细图像的主要原因。无线电传播的路径损耗 (L_p) 是无线通信和成像的一个主要参数, 由Friis公式[23]控制:

$$L_p = 10 \times \lg\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = 20 \times \lg f + 20 \times \lg r - 147.6 \text{ (in dB)} \quad (1)$$

式中, P_t 是发射器功率; P_r 是接收器功率; f 是频率; r 是距离。

因此, 路径损耗与频率 f 的平方和距离 r 的平方成正比。频率越高, 路径损耗就越大。在离太赫兹源1 m远的地方, 1 GHz的路径损耗是32.4 dB, 但在自由空间1 THz的路径损耗是92.4 dB, 增加了60 dB。此外, 太赫兹波受

大气频率选择性吸收（主要是由于 H_2O 和 O_2 ）的影响，如图2 [1]所示，在这方面与射频和微波有显著不同。图2 [1]中的两条曲线代表标准海平面衰减和干燥空气衰减。图中所示的低损耗范围可以考虑用于相关应用。显然，太赫兹的衰减率非常高，而且对天气条件很敏感，因此，它不适合长距离传输。一些频率有非常高的吸收率（如120 GHz、183 GHz、325 GHz、380 GHz、450 GHz、550 GHz和760 GHz），应避免用于传输应用。由于频窗1（200~300 GHz）具有低损耗的特点，研究人员对此进行了大量的研究。

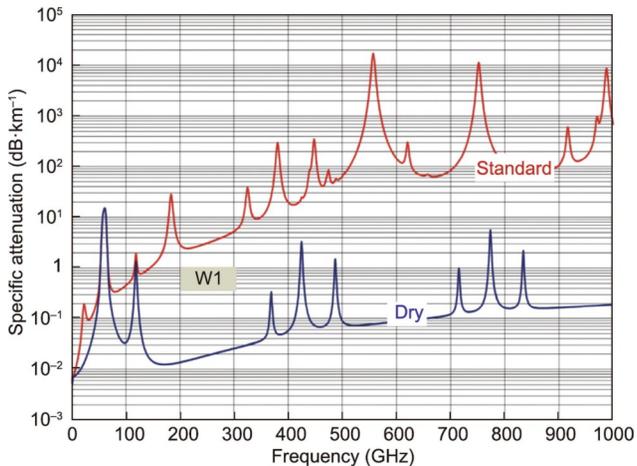


图2. 平均大气吸收衰减是频率的函数，最高可达1 THz。两条曲线显示了标准海平面衰减和干燥空气衰减[1]。W1: 频窗1。

太赫兹的另一个重要特点是，由于波长较短，太赫兹频段周围的灰尘引起的散射比其他频段更显著[18]。因此，太赫兹波的传播与射频和微波的传播非常不同。高路径损耗是太赫兹通信的一个主要问题。目前的解决方案包括增加发射功率（尽管这受到当前技术的限制）、采用高增益的定向天线或使用波束成形技术。主导路径是直射，虽然反射和衍射也起着重要的作用，但它们对太赫兹的影响不如射频和微波的无线通信。公式（1）中的自由空间路径损耗模型并不适合多径环境，更复杂和准确的模型已经被开发出来。基于各种模型[18,24–25]，下面给出了一个综合的通用公式：

$$L_p = 120 \times \lg f + 20n \lg r + \alpha \times r + \sigma - 147.6 \text{ (in dB)} \quad (2)$$

式中， n 是路径损失指数，通常在1~4之间（参考文献[24]中报道，室内环境为1.7）。 σ 是一个均值为零的高斯随机变量，表示由阴影消退引起的波动。 α 是由大气吸收、散射和衍射引起的衰减系数，它在太赫兹传播特性中起着主要作用，如图2所示[1]。对于室内环境，隔断损失在太赫兹中非常显著[18]。

2.2. 太赫兹信号的产生和检测

用于射频或微波的传统电子发射器/源和接收器/探测器功能强大、结构紧凑、价格合理，适合在室温下使用。然而，对于太赫兹频段，同等设备的开发仍然是一个主要问题。目前，太赫兹研究和开发的进展缓慢，主要原因是缺乏太赫兹硬件，特别是缺乏紧凑型和经济型的太赫兹源[8]。有两种方法可以产生太赫兹波：一种是使用电子源将频率增加两倍或三倍，达到所需的太赫兹频率；另一种是使用一个或多个光学源，将信号变频到所需的太赫兹频率。这两种方法都不是很有效，而且产生的太赫兹信号通常很小（小于10 mW），这限制了它的应用。过去，最流行的太赫兹源是基于时域的宽带系统，使用飞秒激光器和光电导天线来产生太赫兹辐射。这种系统的主要缺点包括成本高和功率相对较低。因此，人们进一步努力开发新的太赫兹源，已经取得了良好的进展。例如，研究人员成功开发出量子级联激光器（quantum cascade laser, QCL）。这是第一个能在太赫兹频段辐射出合理功率的半导体源。然而，这种太赫兹源还没有达到完全商业化的阶段，因为它仍然需要低温冷却，这严重限制了太赫兹源在实际应用中的使用。如果能在室温下运作，这种太赫兹源的效用将大大增加。

图3 [26]展示了不同太赫兹源的输出功率。在低频方面，碰撞电离雪崩渡越时间（IMPATT）和体效应二极管等电子设备可以在高达约100 GHz的频率下，产生相对较高的功率，分别超过1000 mW和100 mW。随着频率的增加，输出功率明显下降。谐振隧穿二极管（RTD）振荡器可以在较高的亚太赫兹频率下工作，但功率水平相对较低（ < 1 mW）。在高频方面（光学设备），QCL是最有希望的发电源，目前的设备主要通过激光混频器或飞秒激光脉冲源运行。另一种太赫兹生成方法是基于双波长中红外（MIR）QCL中的腔内差频生成（DFG）[26]。这些设备被称为太赫兹DFG-QCL，使用QCL有源区，为高效的太赫兹DFG过程设计出巨大的子带间非线性磁化率。与传统的太赫兹QCL不同，DFG-QCL是目前唯一可在室温下操作的电泵、单片、可大规模生产的半导体源（1~6 THz的峰值功率约为1.9 mW）[22]，缺点是需要低温和强磁场。

除了上面提到的固态电子太赫兹源，真空电子器件（VED）太赫兹源的开发也取得了重大进展[27]。在经典模型中，所有相干电磁辐射源都将电子电流的动能转化为电磁场能量。在固态电子太赫兹源中，电子传输介质是半导体，而在VED太赫兹源中，电子传输介质是真空。在真空中运动的电子不会发生散射。因此，VED在提供高

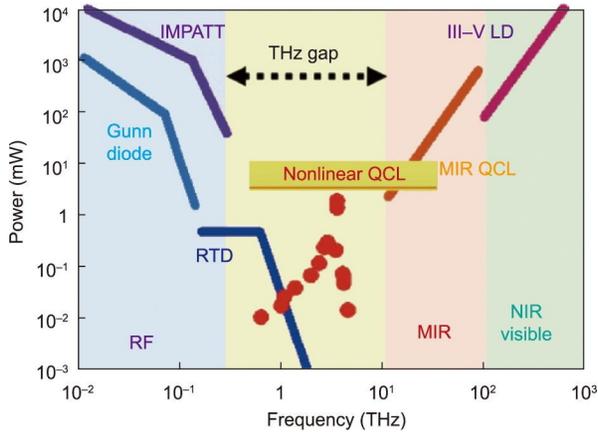


图3. 不同来源的太赫兹输出功率与频率[26]。IMPATT: 碰撞电离雪崩渡越时间; RTD: 谐振隧穿二极管; NIR: 近红外; MIR: 中红外; LD: 光发射二极管。

太赫兹功率或高太赫兹功率密度方面具有优势[28]。太赫兹VED可以提供超过12个数量级的功率和超过两个数量级的频率。就功率-频率特性而言,可能的选择可分为以下三类:

- 具有高移动性的紧凑型源,包括后向波振荡器(BWO)[29]和行波管(TWT)[30]。这些目前被用于0.1~1.0 THz,功率水平为1 mW~1 kW [连续波(CW)和脉冲]。
- 具有中等移动性的紧凑型回旋管。这种太赫兹源填补了0.1~1.0 THz和1 mW~1 MW (CW和脉冲)的性能窗口。
- 基于加速器的固定式源,包括自由电子激光器(FEL)和光束线源[31]。它们目前被用于0.2~10.0 THz (及以上)和 10^0 ~ 10^9 W (平均和脉冲)的窗口。

VED太赫兹源很有吸引力,因为它们可以提供高的太赫兹功率。然而,与固态半导体太赫兹源相比,它们通常更大、更昂贵。材料和微加工技术的进一步发展对于开发紧凑和强大的VED太赫兹源尤为重要。

太赫兹探测器也被称为太赫兹接收器或太赫兹传感器,可以根据检测的物理机制分为不同类别。第一类包括太赫兹热探测器,它吸收太赫兹光子,并在检测器中发生物理变化。例如,在Golay电池[32]中,膜对太赫兹光子的吸收导致薄膜变形,然后给出输入信号的量度。另一类包括热释电探测器,它由热释电聚偏氟乙烯(PVDF)箔组成,两侧都涂有一层薄的金属氧化物。当温度因太赫兹辐射而变化时,检测器结构捕捉到由箔的热释电效应产生的电荷,并在涂层之间产生一个电动势。热释电探测器的光谱响应非常宽,可以达到数太赫兹。因此,这些探测器适用于时域系统(TDS)功率测量[33]。另一类太赫兹探

测器包括半导体器件。肖特基势垒二极管(SBD)在零偏压条件下也得到了广泛的应用。它可以在环境温度下工作,并具有极短的响应时间[34]。使用硅或III-V族半导体技术的信号处理电路集成的能力使其在低成本和高成品率的应用中具有吸引力[35~36]。场效应晶体管(FET)具有很高的噪声等效功率(NEP),在窄带检测中可低至 $10 \text{ pW} \cdot (\text{Hz}^{-0.5})$,在宽带检测中可达到几十 $\text{pW} \cdot (\text{Hz}^{-0.5})$ [37~39]。GaN/AlGaN高电子移动性晶体管(HEMT)因对静电冲击的高度稳健性而被采用[40]。参考文献[41]报道了从0.2 THz到1.2 THz的宽带检测。市售的砷化镓(GaAs)场效应晶体管可以大大降低成本,同时保持足够的响应度和NEP[42]。采用太赫兹成像系统的实用太赫兹探测器将在第3.2节讨论。

3. 太赫兹成像

第一幅太赫兹图像是由Hartwick等[43]使用光学泵浦的分子太赫兹激光器得到的。1995年,Hu和Nuss[44]利用基于飞秒激光源的光电太赫兹成像技术,在太赫兹科学和技术领域引发了一波研究兴趣和活动。在过去的20年里,太赫兹成像科学技术在基础研究和实际应用方面都取得了巨大的进展。一般来说,太赫兹成像技术可以分为光电式或全电子式成像方法,如图4所示。光电式太赫兹成像方法是基于使用光电导天线或非线性晶体从脉冲或连续激光产生和检测太赫兹辐射的光电方法,该方法可以被进一步分为脉冲式和连续式太赫兹成像。在全电子太赫兹成像方法中,太赫兹的产生和检测都是纯电子的。这种方法还可以被进一步分为无源和有源太赫兹成像。在许多研究和评论中已经有了对于这些太赫兹成像技术和系统的深入描述[45~48]。本节重点介绍这些技术的最新发展。

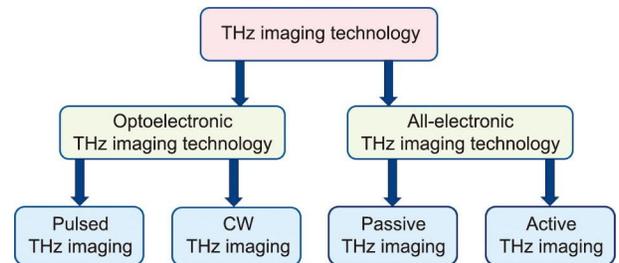


图4. 太赫兹成像技术的分类。

3.1. 光电子太赫兹成像技术

成像系统可以用基于脉冲的信号和CW信号实现。一般来说,基于脉冲的系统在时域测量单周期脉冲(宽带信号),可以一次性获得被测样品在大带宽上的信息,这类

似于脉冲雷达系统。然而，为了从测量数据中恢复信息，需要进行额外的计算（即快速傅里叶变换）。由于使用的带宽较大，系统的信噪比（SNR）可能是一个问题，特别是在较高频率下。相比之下，CW系统可以提供与光子生成技术所提供的带宽相当的工作带宽，同时保持高信噪比和快速采集时间[49]。此外，其良好的光谱分辨率和精确的相位测量能力使CW系统具有快速成像的可行性[50]。由于最流行和最先进的光电太赫兹成像系统是脉冲TDS，因此它是本节的重点。本节最后还简要介绍了CW太赫兹成像系统。

3.1.1. 脉冲时域成像系统

脉冲太赫兹TDS的核心技术使用飞秒激光器相干地产生和检测短脉冲。如图5（a）所示，分束器（BS）用于将飞秒脉冲激光的近红外（NIR）光分成两部分：泵浦光束和探测光束。泵浦光束聚焦到一个有偏压的光电导天线表面，用于产生太赫兹。在外加电场下，飞秒激光脉冲在砷化镓晶体中产生的载流子产生瞬时电流，从而产生太赫兹频率的脉冲波。辐射的太赫兹脉冲被收集、准直，然后聚焦到被测样品上。然后，从样品上反射回来的太赫兹脉冲被接收并聚焦到一个无偏压的光电导天线上，用于激光门控太赫兹检测[51–52]。通常在太赫兹发射/接收天线上连接硅透镜（SL），可以提高太赫兹辐射耦合效率。通过用一个可变延迟电动平台来扫描近红外探测光束，以检测太赫兹脉冲的时间分辨电场，如图5所示。

相干检测法最突出的特点之一，可以在时域直接测量瞬时电场，而不是太赫兹辐射的强度。这种相干检测方案提供了一系列的图像对比机制，许多新的应用已经被证明。图5（b）示了一个太赫兹时域波形的例子，其中第一个峰值是样品表面的太赫兹反射，第二个峰值是涂层/芯界面的太赫兹反射。不同物理和结构特性的太赫兹图像可以从测量的太赫兹波形中构建。

通常以逐个像素的方式，通过使用电动平台围绕太赫兹光束聚焦位置移动样品，可以获得太赫兹图像。例如，图6 [53]显示了一个巧克力豆的太赫兹图像，这些图像是由大约4000个像素点的测量获得的。在每个像素点，从样品中反射的太赫兹辐射被记录为时间的函数。因此，一个完整的太赫兹成像测量将提供一个三维（3D）的数据，其中两个轴描述了垂直和水平的空间维度，第三个轴代表时间延迟（深度）维度。可以通过分析记录的3D数据，从而得到太赫兹图像。这些涂层厚度图显示了片剂上涂层的均匀性，可以用来识别片剂涂层中的问题[54–55]。这种飞行时间测量原理也被应用于汽车涂料[56–57]和海洋防护涂层[58]的无损与定量表征。

3.1.2. 医疗和生物应用

太赫兹辐射具有较低的光子能量（即非电离辐射），不会对人体造成任何安全风险。然而，它会因受到水的影响而强烈衰减，因此，太赫兹辐射对含水量非常敏感。在过去的10年里，人们对太赫兹光谱和成像在生物和医疗方面的应用越来越感兴趣[59]。研究人员已经发表了有关人类皮肤癌的体外和体内太赫兹成像的研究，并观察到癌变组织和正常组织之间的明显差异[60–62]。此外，太赫兹光谱和成像能够检测乳腺、舌头、肝脏和结肠肿瘤[63–68]，不需要如染料等的任何标记。这种无标记的太赫兹成像方法的基本原理被认为与这一事实有关，即癌症组织比正常组织有更高的含水量和细胞密度，这会导致太赫兹光谱的差异（如折射率和吸收系数），从而可用于癌症诊断。

图7 [68]显示了大鼠新鲜脑组织的太赫兹光谱图像的例子，其中太赫兹图像是通过使用主成分分析方法来分析测量的太赫兹光谱而构建的。成像数据能够正确识别肿瘤区域，因为该区域的含水量和细胞密度更高。癌症的存在往往会导致受影响组织的血液供应增加，而组织含水量的

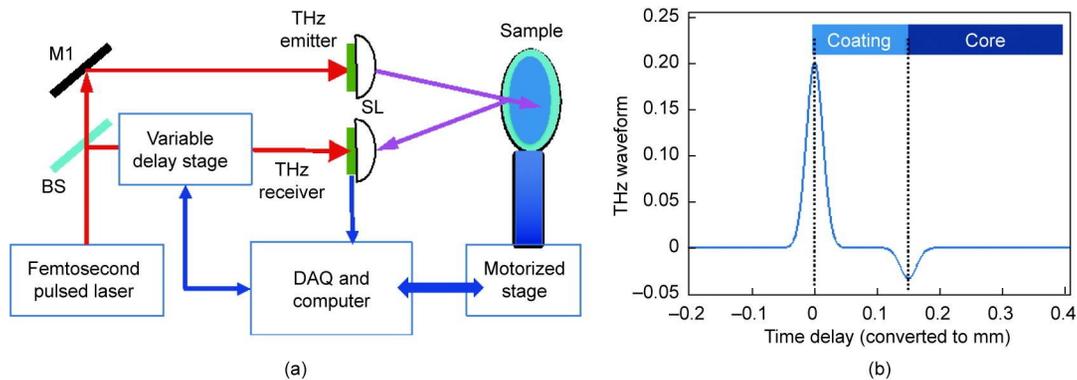


图5. (a) 典型的脉冲太赫兹成像系统示意图，该系统是基于宽带太赫兹脉冲的相干生成和检测。(b) 分层样品的太赫兹波形仿真。M1：反射镜；BS：分束器；SL：硅透镜；DAQ：数据采集。

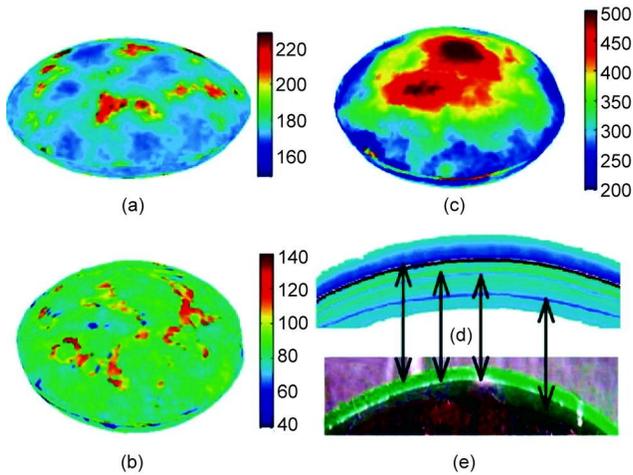


图6. (a) ~ (c) 三层巧克力豆每一层的太赫兹图像。(d)、(e) 横截面的太赫兹图和照片 (实心箭头是眼睛的指向)。颜色栏显示层厚, 单位是 μm 。转载自参考文献[53], 经 IEEE 许可, ©2008。

局部增加会导致吸收系数的增加。

虽然 X 射线和计算机断层扫描 (CT) 可以提供更好的图像质量和更高的分辨率, 但太赫兹成像在两个方面超过了传统的医学成像技术。首先, 太赫兹成像不仅提供振幅, 还提供光谱信息。因此, 太赫兹成像可以提供补充信息, 如人体组织的类型[69]。其次, 与 CT 和 X 射线相比, 太赫兹成像技术本质上是安全的, 因而适用于更广泛的应用场景。例如, 手术中的太赫兹成像探头可以为手术过程和现场决策提供帮助。此外, 拉曼光谱可以检测与特定化学键相关的分子或生化变化, 并已被研究用于早期皮肤黑色素瘤的临床诊断[70]。

太赫兹成像在生物医学应用中的一个有吸引力的特点是其穿透能力, 通过该技术可以对皮肤下的癌症区域进行直接成像。然而, 组织的吸收系数在 0.5 THz 时被确定为 12.7 mm^{-1} [63], 这对实际条件下体内太赫兹成像的有效检测深度设置了一个基本限制。由于人体组织的吸收系数随频率增加, 低频率的太赫兹辐射有更好的穿透能力。然而, 在较低的频率下, 太赫兹图像的空间分辨率较差, 可能会影响小肿瘤的早期检测。近场太赫兹成像的进展, 可以实现超过衍射极限的空间分辨率[71–74], 可能会提供一个很好的方法来解决这个问题。

测量的特异性是生物医学成像应用的另一个关键方面。太赫兹成像技术已被证明能够提供组织的光谱信息, 从而提供所需的测量特异性[63,68]。然而, 这些研究也表明, 癌症和正常组织在太赫兹频率范围内没有清晰的光谱特征。人们已经发现, 正常组织、癌症组织和水的太赫兹光谱的整体形状在 2 THz 以下的频率范围内都非常相似。这种缺乏鲜明光谱特征的情况, 对于在临床环境中对癌症组织进行可靠的实时成像和识别是一个重大挑战。最近在偏振敏感的太赫兹成像和片上介电探头方面的工作可以通过提供更多的信息来表征组织属性, 从而有助于缓解测量特异性问题。

3.1.3. 太赫兹时域成像的未来趋势

太赫兹时域成像技术已经在广泛的应用中显示出巨大的潜力。然而, 低空间分辨率是太赫兹成像的主要缺点之一。由于太赫兹信号在每个像素处被记录为时间的函数,

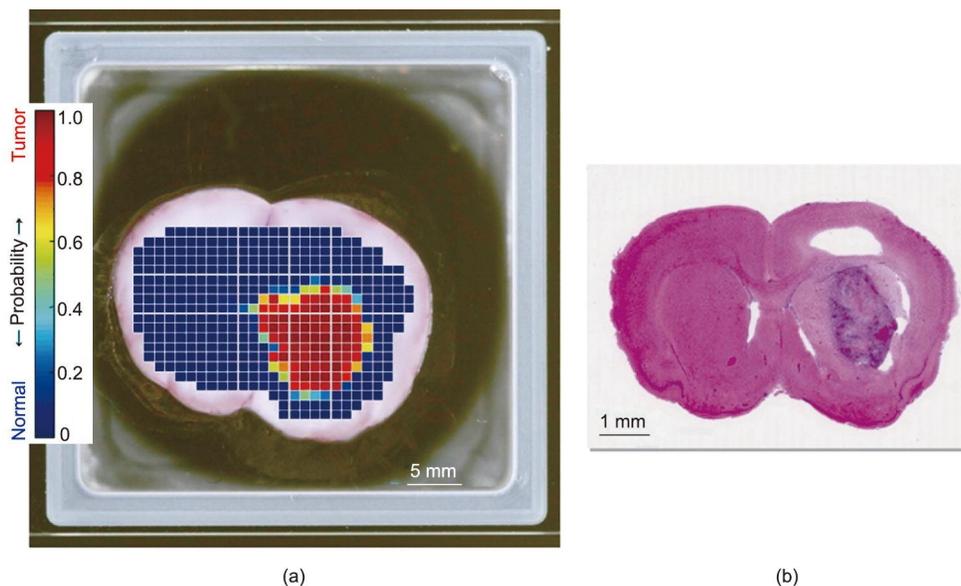


图7. 太赫兹图像 (a) 和新鲜老鼠脑组织的苏木精-伊红染色图像 (b) [68]。太赫兹图像中的测量点总数为 421 个, 像素大小为 $500 \mu\text{m}$ 。每个像素的颜色对应于从该区域的复合折射率计算出的肿瘤概率, 其中像素值为“1”表示癌变问题的概率为 100%, 像素值为 0 表示癌变组织的概率为 0 (即正常组织)。

因此太赫兹图像是以逐点方式获得的。另一个问题是，对于许多实际的工业应用，目前的太赫兹时域成像系统的图像采集速度太慢。

有几种可能的方法来加快太赫兹成像过程。一种方法是基于异步光学采样，该方法提供了极高的数据采集 (DAQ) 率，比传统的脉冲太赫兹成像系统快几个数量级 [75]。对于如此高的图像采集速度，高效的太赫兹生成是至关重要的。另一种方法是通过整合纳米图案的金属触点来开发更高效和强大的太赫兹光电发射器，如图 8 [76] 所示。通过使用三维等离子接触电极，大部分的光载流子在亚皮秒的时间范围内产生，有效地促进了太赫兹辐射。据报道，光-太赫兹功率转换效率达到创纪录的 7.5% [77]，然而这个数值仍然相对较低，仍需要进一步改进。

一种更好的方法是使用并行检测来显著提高图像采集的速度。实现并行检测的一个创新尝试，使用大面积的电光晶体，太赫兹光束和飞秒光探测光束都被投射出来 [78]。这项技术被用于可视化宽带脉冲太赫兹辐射在物体中的传播 [79]。并行检测方案保留了太赫兹时域成像的所有优点，如飞行时间和光谱成像。它的主要缺点是，通常需要一个放大的飞秒激光系统来驱动电荷耦合器件 (CCD) 相机。尽管如此，这项工作证明了视频速率太赫兹成像的可能性和意义。

另一种加快图像采集的方法是利用压缩感应的概念 [80–82]。从一个物体到一个单点探测器的太赫兹波前被一组平面二维 (2D) 掩码按顺序进行空间调制。与传统的栅格扫描方法相比，这种方法在图像采集速度上有很大的提高。也有报道说，使用基于压缩传感的单点检测器可以实现太赫兹光谱成像，可以同时获得样品的结构图和化学图 [83]。为了实现使用压缩传感的高速成像，需要一个可以通过电子控制的高速和多像素的太赫兹空间光调制

器。基于有源超材料的太赫兹空间光调制器的进展有望使压缩太赫兹成像在现实世界的实际应用中得到进一步发展 [84]。

3.1.4. 连续波太赫兹成像系统

上面讨论的脉冲太赫兹成像系统有许多吸引人的优点，但它们需要昂贵的飞秒激光系统，而且在产生精细的光谱数据上存在问题。因此，研究人员有兴趣在不放弃相干检测方案的优势的情况下，开发成本较低、光谱分辨率较高的替代品。全光电子 CW 太赫兹成像系统利用 CW 激光器，被证明是脉冲太赫兹成像系统的良好替代品 [59]。Verghese 等 [85] 展示了第一个光电式 CW 太赫兹测量系统，他们采用了两个工作在不同波长的 CW 钛蓝宝石激光器的光学差频信号 (差异为太赫兹频率)，使用光电导天线产生和检测太赫兹信号。一个基于紧凑和低成本半导体激光器的 CW 太赫兹系统也已被证明 [86]，通过优化天线设计和 LT-GaAs 材料特性，在低温生长的砷化镓 (LT-GaAs) 上的太赫兹天线的辐射功率已经得到改善 [49,87]。同样，CW 太赫兹成像系统的问题有望得到进一步的改进。

图 9 显示了一个典型的 CW 太赫兹成像系统，它是基于两个在不同频率下工作的 CW 激光器在一个光电发射器中的光混频。例如，使用相同的 BS 将两个可调谐的二极管激光器共线，合并的光束分别聚焦到发射器和检测器的光混频器上，这些光混频器由具有超短载流子寿命的 LT-GaAs 制造。当吸收带隙以上的光时，在光电导发射器中产生电子和空穴对。当对发射器施加偏置电压时，在两个激光二极管的频率差下对光电导发射器的电导率进行调制，产生了 CW 太赫兹辐射。由此产生的太赫兹波通过一个超半球形 SL 辐射出准直的太赫兹光束。类似的透镜通过两个聚焦透镜将太赫兹光束耦合聚焦到探测器上。直流零差输出信号由锁相放大器参照发射器的偏置调制进行检

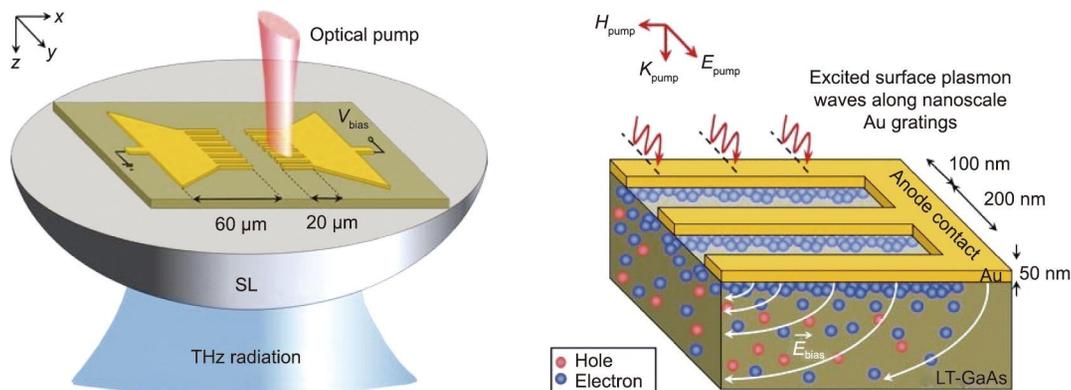


图 8. 一个带有纳米图案触点的光电导天线。该结构的“手指”减少了光载流子传输到接触电极的时间，并允许激光光子的等离子体耦合到半导体中，从而提高该装置的性能。V_{bias}: 偏置电压; E_{bias}: 偏置电场; E_{pump}、H_{pump} 和 K_{pump} 分别代表电场、磁场和泵浦波的传播方向; LT-GaAs: 低温生长的砷化镓; Au: 金。转载自参考文献 [76]，经 Macmillan Publishers Ltd. 许可，©2013。

测。当太赫兹光束和光学差频信号同时到达检测器时，直流信号达到最大（由延时阶段调整）。因此，可以同时测量太赫兹电场的振幅和相位[85]。为了覆盖所需的频率范围，可以通过机械调节太赫兹频率。

与脉冲太赫兹成像系统相比，CW太赫兹成像系统有多种优势，如更紧凑、更高的成像速度、更高的光谱分辨率和更低的成本。它们已被证明具有广泛的应用前景[88]，包括生物应用[89]和气体传感[90]。

3.2. 全电子太赫兹成像技术

全电子太赫兹成像技术有望成为更紧凑、更快速的系统，这对许多实际应用来说是必要的。这种技术可以分为被动或主动成像系统。主动成像需要太赫兹源和太赫兹探测器，被动成像则不需要太赫兹源。被动成像系统通过接收物体自然释放的太赫兹辐射以及环境中其他黑体辐射源

的反射来工作。开发全电子太赫兹成像技术的驱动力之一是该技术在安全检查方面的应用潜力。因为太赫兹辐射对人是安全的，并且可以穿透织物和其他材料，能够对隐藏的危险物体进行非接触检测[91-92]。

无源太赫兹成像已被证明是一种多用途的成像技术，用于隐蔽物体的实时检测和识别[93-94]，许多商业安全成像器都是无源系统，部分原因是结构相对简单。图10显示了一个无源太赫兹成像系统。它有4个主要单元：①成像光学元件，在检测器平面上形成物体的图像；②扫描机构及其控制器；③太赫兹接收单元，包括太赫兹天线、检测器、频谱分析仪和放大器；④数据采集卡和基于计算机的图像重建、处理和显示单元。

对于安检应用，无源太赫兹成像可以检测直接从人体发射的自然黑体辐射或通过其他黑体辐射源（如天空）从物体散射的自然黑体辐射。太赫兹频率下的微弱人体辐射

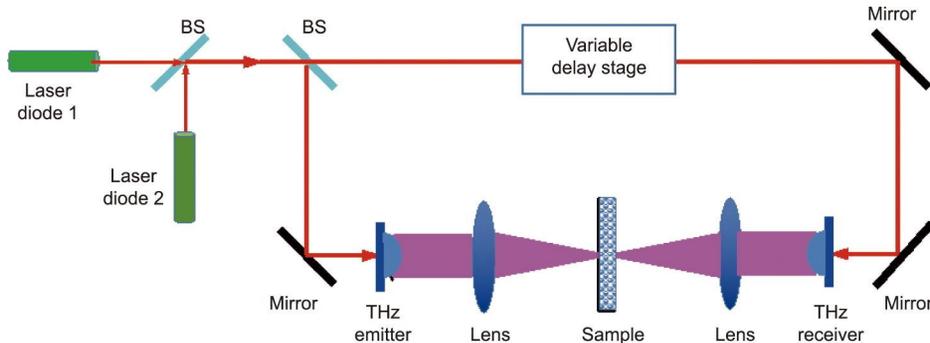


图9. 典型的CW太赫兹成像系统的示意图。

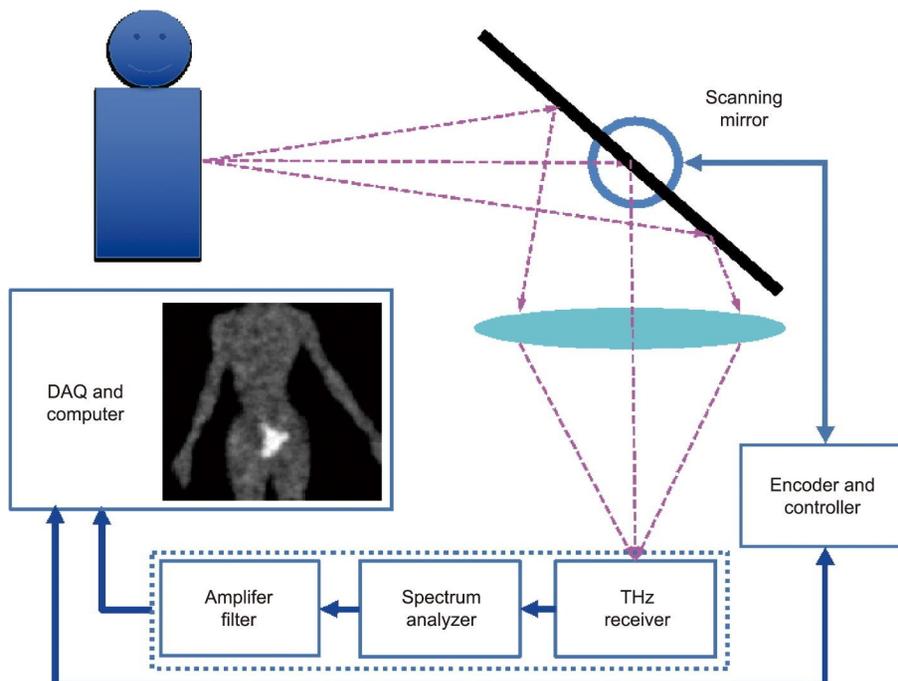


图10. 无源太赫兹成像系统的示意图。

需要非常灵敏的太赫兹探测器或检测方案。超导探测器在太赫兹辐射检测系统中具有一席之地。超导天线耦合微测辐射仪具有出色的信噪比，对无源太赫兹成像有一定帮助。通过使用64像素的超导微测辐射计线性阵列，在0.2~1.0 THz的频率范围内以接近视频速率获得了太赫兹图像，旨在对隐蔽武器进行实时的远距离探测[94]。Hassel等[95]报道了一个基于千像素动态感测热辐射计阵列的无源成像系统，该系统在两个频段（0.25 THz和0.50 THz）工作，用于人员筛查应用。这些基于超导探测器的无源太赫兹成像系统需要低温操作；然而，对于许多应用，如安全检查，室温操作将是更加理想的情况。

对于室温操作，砷化镓肖特基二极管（GaAs Schottky diode）是最有用的太赫兹器件之一。作为一个能在太赫兹范围内工作的低寄生性器件，肖特基二极管为包括太赫兹成像和太赫兹通信在内的一些实际应用提供了有用的太赫兹激发和检测。工作频率高达约3 THz的混频器和倍增器已经被证实[96]。一个基于砷化镓肖特基混频器与本地振荡器相结合的外差检测方案已被用于无源太赫兹成像，在微波和太赫兹频率下都获得了较高质量的图像[91, 97-98]。

被动成像系统面临的挑战是使用具有足够高灵敏度的探测器，有效地捕获太赫兹信号，因为人体的黑体热辐射在太赫兹频率下是非常微弱的。室内环境中的背景分离和温度对比是被动成像的额外障碍。相比之下，主动式太赫兹成像使用主动式太赫兹源来照亮被测物体。因此，来自物体的太赫兹信号将比其自身的黑体辐射大几个数量级，更容易将物体与周围环境分开。主动成像方法不仅能产生较高的灵敏度，还能提供更多关于被测物体身份的信息。

太赫兹光谱区域的主动成像系统可以通过使用单一的太赫兹探测器的窄带外差接收器来实现，尽管需要必要的机械扫描，图像采集的速度受到限制，但即使是在适度的照明功率下这种方法也可以实现非常高的信噪比和大的动态范围。参考文献[8]总结道，在过去的10年中，在开发更紧凑和强大的太赫兹源[26]以及更敏感的太赫兹探测器和探测器阵列方面取得了重大进展。已经开发了多种探测器用于太赫兹成像[99-101]。太赫兹检测器阵列与强大的太赫兹源的发展具有特别重要的意义，因为它可以实现轻松捕获样本的视频速率太赫兹图像，而不需要任何机械扫描[102]。

在安全检查方面，与温度有关的被动成像可以在主动系统失败时提供图像数据，因为镜面反射在主动太赫兹图像中占优势。另一方面，主动图像可以区分威胁、身体和背景温度的对比度，在被动成像失败的情况下获得结果

[97]。因此，结合使用主动和被动的太赫兹成像是一个直接简单的解决方案，可以克服各自的弱点，提供一个强大的安全检查方法[103-105]。

总之，在过去的20年里，太赫兹成像已经从一个陌生领域发展成为一个蓬勃发展的研究学科，其商业应用和科学影响在不断增加。基于飞行时间测量的太赫兹时域成像技术能够以非破坏性的方式区分和表征多层样品，这是迄今为止太赫兹技术的许多最成功的商业应用的关键。然而，一个全电子的太赫兹成像系统可以做得非常紧凑，并且高度灵活，对许多工业应用具有极大帮助。光电式和全电子式太赫兹成像系统都可以被用于商业领域。表1 [53-59,65,67-68,75,78,88,90-91,93-97,99-102,106-114]总结了每种类型的太赫兹成像方法的工作原理、优势、应用和挑战。

4. 太赫兹无线通信

如今，有许多无线通信系统在运行。如4G/5G蜂窝移动和无线保真（WiFi）系统。太赫兹无线通信系统只是另一种无线通信系统，其工作频率在太赫兹频段。太赫兹无线通信不是为了取代任何现有的无线通信系统，而是在现有的基础上增加新的功能和应用。这种频率变化既带来了好处也带来了挑战。主要的好处是超宽的带宽和高数据率通信（超过1 Tbps）。设想的应用如下[1-3]：

- 点对点数据密集型/超高速通信，用于数据中心、回程和空间通信，以及其他应用。
- 热点地区，如体育场馆和机场。
- 全息通信和虚拟现实应用。
- 小规模通信（如纳米或芯片间通信）。
- 高精度和高分辨率的定位和传感。
- 6G无线通信系统及其他应用。

在所有这些应用中，全息通信是太赫兹无线通信的一个关键应用；因为全息显示器被认为是多媒体体验的下一代发展，从一个或多个来源向另一个或多个目的地传递三维图像。“Facebook”改名为“Meta”就是这种趋势的反映。这种类型的通信的基本系统要求是超高的数据速率、极低的延迟和出色的同步性。安全性和数据弹性对这种应用也至关重要[1]。

如上所述，太赫兹无线通信系统预计不仅有利于传统的大规模无线网络，而且也有利于新兴的模式，如无线芯片内和芯片间通信及纳米通信。纳米技术的最新发展可能会带来一些突破性的应用。太赫兹无线纳米通信非常有前景，主要是由于石墨烯等新型材料的突破。由于这个原

表1 太赫兹成像技术及其工作原理、应用和挑战

Imaging type	Principles and characteristics	Advantages and applications	Future trend and challenges	
Optoelectronic technology	Pulsed THz imaging	<ul style="list-style-type: none"> • High image resolution (hundreds of micrometer lateral and tens of micrometer axial), rich information and imaging contrast: quantitative analysis of layered samples [53–58] and art conservation [106–107] • Conductivity mapping [108–111] • Biomedical applications, including cancer detection [59–65,67–68] • Chemical mapping via spectroscopic imaging [53] 	<ul style="list-style-type: none"> • Faster, more affordable and compact • Femtosecond lasers are expensive and bulky • Mechanical delay stage limits its imaging speed to tens of waveforms per second • Using two synchronized lasers leads to a higher speed of tens of thousands of waveforms per second but is more expensive [75] • More power-efficient parallel detection scheme [78] 	
	CW THz imaging	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency-domain measurement: photomixing of two CW lasers using a photoconductive antenna • Wide spectral coverage up to 3 THz, with higher spectral resolution than pulsed technology • Similar lateral resolution as pulsed technology 	<ul style="list-style-type: none"> • Less expensive and higher speed (at a single frequency) than a pulsed system, thus potentially wider applications [88] • Biological applications including label-free diagnosis of malignant tumors [89] • Higher spectral resolution for gas sensing [90] 	<ul style="list-style-type: none"> • More compact and integrated THz imaging systems (system on a chip) • More efficient, reproducible, and affordable photoconductive emitters and receivers
All-electronic technology	Passive THz imaging	<ul style="list-style-type: none"> • Detects the blackbody radiation from an object using either superconducting detectors or a heterodyne detection scheme based on GaAs Schottky diodes • No THz source is necessary; requires highly sensitive detectors 	<ul style="list-style-type: none"> • People screening and standoff detection of concealed weapons [91,93–97,102] • Temperature sensing through cloth [112] • No THz sources required, but provides limited information and contrast mechanism 	<ul style="list-style-type: none"> • Superconducting detector and camera: cryogenic-free operation • Heterodyne detection scheme: detector array to eliminate mechanical scanning system
	Active THz imaging	<ul style="list-style-type: none"> • Measures the THz radiation reflected from an object using an electronic THz detector or a detector array (THz cameras), which is much faster • Electronic THz source to illuminate the object; higher SNR ratio • All-electronic technology: compact and fast imaging speed and ease of integration 	<ul style="list-style-type: none"> • Many choices of THz sources, THz detectors, and cameras [102] • Video-rate THz imaging has been achieved for real-time people screening and other applications [99–101] • FMCW radar for nondestructive testing [113–114] 	<ul style="list-style-type: none"> • More sensitive and affordable THz cameras • More efficient and affordable THz sources • Measurement of both phase and amplitude • Swept THz source for rapid spectroscopic imaging • FMCW radar chip with more bandwidth

FMCW: frequency-modulated continuous-wave.

因，现在许多研究工作都以太赫兹波段纳米通信和纳米网络为目标，预计这些趋势在未来将持续下去。参考文献[19,115]对当前的太赫兹纳米通信和纳米网络研究提供了一个非常好的概述。更具体地说，这些文献讨论了由在太赫兹频段运行的纳米网络支持的应用，以及这些应用对底层纳米网络的要求。这些研究还概述了目前对协议栈不同层的贡献，以及可用的通道模型和实验工具[19]。由于纳米通信系统目前正处于起步阶段，该系统的实现仍需要很长的时间。因此，本文不涉及这一主题。

从射频/微波到太赫兹频段的频率变化导致了更短的工作波长和广泛的硬件、软件问题，包括更小的尺寸和更复杂的传播特性。

4.1. 太赫兹无线通信系统的结构和实现

一个无线通信系统至少应包括一个发射器和一个接收器，如图11所示。基带处理器可以将原始信息数字化，然后进行编码、调制，并通过一个典型的外差（频率转换）结构将其转换到所需的频率，然后由天线发射。在包络检测的情况下，可以使用一个检测二极管。这些设备的可用性和参数将最终决定太赫兹超宽带无线通信的出现和潜在成功。检测方案有许多种，直接检测方案由于其简单和具有成本效益的配置，目前非常流行，但其灵敏度较低，需要使用放大器来扩大传输范围。相比之下，外差检测可以提高接收器的灵敏度，并使用矢量调制方案来提高传输数据率。此外，在数字处理阶段可以进一步提高系统性能。

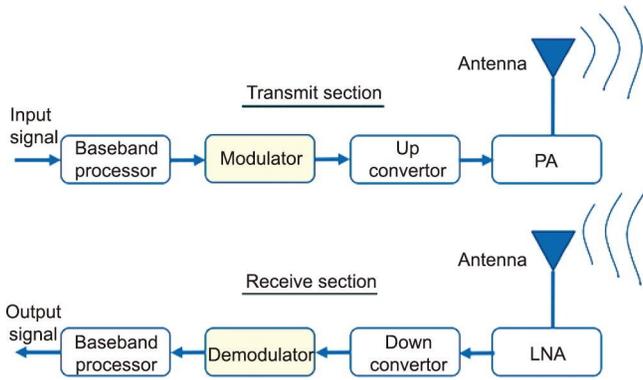


图 11. 一个典型的无线通信系统由一个发射器和一个接收器组成。PA: 功率放大器; LNA: 低噪声放大器。

对于射频前端元件, 太赫兹元件的工作频率和输出功率还不能满足商业要求。一个解决方案是探索先进的半导体材料, 如硅锗 (SiGe) 和磷化铟 (InP), 以及相关技术。在基带信号处理方面, 太赫兹系统必须实时处理太比特每秒的传输速率, 这极具挑战性。亟待突破低复杂性和低功耗的先进高速基带信号处理技术。对于天线来说, 通常需要高增益来对抗高路径损耗。这些必须以合理的尺寸和波束控制功能来实现。此外, 太赫兹传播信道的特征和建模还没有得到充分的研究, 需要进一步探究[18,116]。

在实践中, 太赫兹发射器可以通过三种典型的方法构建。第一种是基于全电子的方法, 包括射频信号发生器、数据调制器和后置放大器。通常情况下, 太赫兹信号是由冈恩二极管振荡器 (Gunn diode oscillator) 的输出相乘产生的。以太赫兹为单位获得了几十微瓦的平均输出功率, 通过管理放大器的饱和输出功率可以进一步提高输出功率[12]。其他有前景的信号发生器包括由半导体晶体管、热电阻[96]、布洛赫振荡器[97]和质子振荡器[98]制成的集成电路 (IC) 振荡器。

第二种方法是使用光子技术产生和调制太赫兹信号。首先使用红外激光器生成强度以太赫兹频率调制的光信号, 然后用电-光或电吸收调制器进行编码。最后, 光信号由光电导体转化为电信号, 然后由天线辐射到自由空间。半导体激光放大器是必不可少的, 因其具有可靠性和成本效益[17]。这种方法的一个主要问题是, 从光到太赫兹的能量转换效率非常低, 如何提高这个效率是一个值得关注的话题。

第三种方法是基于组合的电-光系统, 该系统可能会使用太赫兹激光器, 如 QCL [117]。除了使用外部太赫兹调制器, 如二维电子气 (2DEG) 半导体调制器和基于超材料的调制器[12,119], QCL 的直接调制可能在超过 10 GHz 的调制频率下进行[118]。

4.2. 太赫兹无线通信系统的发展

使用太赫兹进行无线通信的想法从 20 世纪 90 年代末就已经出现了。第一个成功的太赫兹通信演示是在 2004 年被报道的[120], 其中一个音频信号通过太赫兹通信通道, 使用室温半导体太赫兹调制器进行传输, 该调制器是基于 2DEG 的还原。采用标准的太赫兹 TDS 系统, 通过 75 MHz 的宽带太赫兹脉冲序列传输高达 25 kHz 的信号。

由于传播损耗大, 大多数太赫兹通信系统使用 100~300 GHz 的工作频率, 其中衰减在三个波谷中处于局部最小, 如图 3 [26]和参考文献[1,18]所示。一个非常著名的例子是由日本电报电话公社 (NTT) 和富士电视网络公司开发的 120 GHz 频段系统, 并在 2008 年北京奥运会上进行了测试[121]。该系统首次在无线链路中采用了基于光子学的发射器, 比特率为 $10 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ [122–123]。随着半导体集成电路技术的进步, 人们随后引入了一个全电子化的发射器。这有助于减少尺寸、重量和成本, 同时增加操作的便利性[124–125]。后来, 采用了功率放大器 (PA), 将传输距离延长到 5 km, 并成功使用前向纠错技术来提高系统的长期稳定性[126]。

这种无线通信系统如图 12 [12]所示, 其中太赫兹源产生光信号, 其强度在 125 GHz 下被调制。振幅偏移键控 (ASK) 调制器用来调制数据传输的副载波。被调制的副载波信号被一个光放大器放大, 并输入到一个高功率光电二极管。该二极管将光信号转换成射频信号, 然后将该信号放大并辐射出去。该信号由天线接收, 然后通过简单的包络检测方案进行放大和解调。射频接收器使用全电子器件和 InP-HEMT 技术。这种基于光子学的射频发射器的一个主要优点是, 它使发射器核心 (图 12 [12]) 非常紧凑和轻便。因此, 它可以被放置在现场的任何地方。此外, 通过使用波分复用 (WDM) 技术, 基于光子学的发射器可以扩展为多频段系统。从三个载波频段中选择一个具有最小大气衰减的频段, 以确保系统性能, 从而进行跳频, 以提高安全性。这样的系统使用 450 mm 的卡塞格伦反射器天线 (Cassegrain reflector antenna), 实现了 10 mW 的最大射频输出功率和 48.6 dBi 的增益 (这是非常高的, 在较低的射频/微波频率下通常无法实现) [12,121]。

在过去的 10 年中, 100~300 GHz 的高速通信链路发展迅速, 这在很大程度上归功于硬件组件方面取得的进展。为光纤通信系统开发的调制器使这些频率下的高数据率复杂调制格式成为可能。在接收器中, SBD 可用于直接探测或外差探测。在直接检测方案中, SBD 检测器被用作振幅调制信号的平方律检测器, 正如在 W 波段和 100 GHz 以上使用通断键控 (OOK) 调制所演示的那样

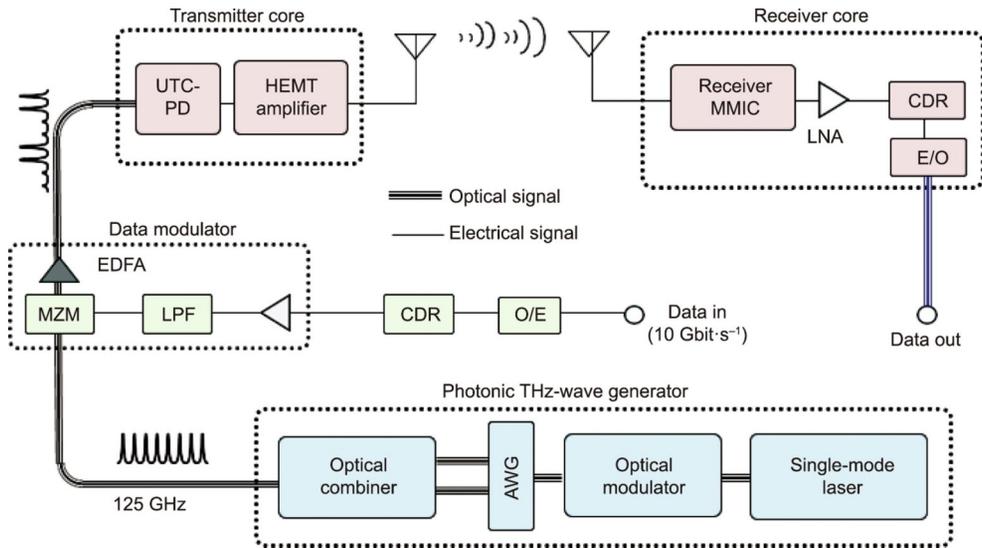


图12. 使用基于光子学的发射器的120 GHz无线链路的框图。AWG: 阵列波导光栅(用于复用); CDR: 时钟和数据恢复; EDFA: 掺铒光纤放大器; E/O: 电/光(转换); LPF: 低通滤波器; MMIC: 单片微波集成电路; MZM: 马赫-曾德尔调制器; O/E: 光/电(转换); UTC-PD: 单运载体光电二极管。转载自参考文献[12], 经 Springer Nature Switzerland AG 许可, ©2011。

[127–130]。如图13所示, 通过对两个可调谐的光学光源进行异或, 在300 GHz和小于1 m的无线传输中演示了40 Gbps信道的实时无误数据传输[131–132]。偏振复用还用于使多输入多输出(MIMO)系统中的数据速率加倍, 但它受到无线信道之间明显的交叉干扰的影响。研究人员已经开发了一个更好的固态系统[133], 该系统将在本节后面讨论。

使用单片微波集成电路(MMIC)接收器与正交相移键控(QPSK)或16-正交振幅调制(16-QAM)的太赫兹无线通信系统, 在237.5 GHz下演示高达100 Gbps的数据速率[134]。在240 GHz使用8相移键控(8-PSK)调制实现了30 Gbps的传输率, 通过使用集成了宽带天线的太赫

兹光混频器, 在400 GHz使用OOK调制获得了46 Gbps。然而, 由于两个光学源的相位噪声不相关, 这些系统在生成的太赫兹波上受到相位噪声的影响[135–136]。

需要指出的是, 近年来开发的太赫兹无线通信系统大多是基于光电组合技术[16–17, 130–132, 134–137]。然而, 这些系统采用了许多基于各种材料的光学元件。与电子学(电子学的主要器件是晶体管)不同的是, 基于光子学的系统中没有单一的主导器件。芯片上需要的器件包括低损耗的互连链路、光放大器和调制器、功率分配器、滤波器、激光器和探测器。这些器件需要一系列不同的材料和制造技术, 因此很难在一个芯片上实现这些器件。目前, 这些设备还无法兼容芯片的集成化和小型化。无论如何努

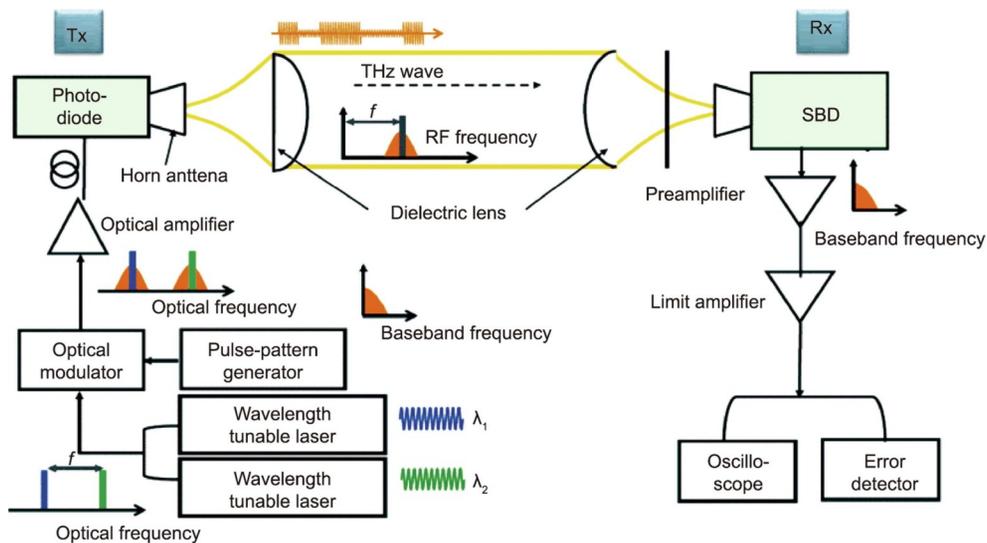


图13. 在接收器处使用SBD的300 GHz太赫兹无线链路[132]。λ₁: 子载波1; λ₂: 子载波2; Tx: 发射器; Rx: 接收器。

力使用固态电子技术实现太赫兹无线通信系统，将太赫兹系统集成到未来应用的芯片上仍然是一个重大挑战[138]。

在过去的10年中，不同的国家和机构在开发全固态太赫兹通信系统方面做出了许多努力，如参考文献[17, 126, 133, 139–149]中所述。在此，本文列出一些好的例子。2009年，北京奥运会上使用的太赫兹通信系统的光学激励装置被InP-HEMT MMIC取代[121]。该系统的最大数据速率约为11.1 Gbps，实现了10 Gbps信号在800 m范围内的无差错传输。2010年，NTT实验室再次改进了太赫兹通信系统。新的双向通信系统的结构图实现了10 Gbps的双向数据传输率和20 Gbps的单向数据传输率[139]。2013年，德国卡尔斯鲁厄理工学院（KIT）在237.5 GHz实现了单输入和单输出（SISO）的无线通信系统，数据传输率为100 Gbps（当时世界最高），距离超过20 m。这一成就是将太赫兹光子学和电子学结合起来的结果，通过在单程载波光二极管（UTC-PD）中混合锁模激光器的梳状线，以光子方式产生一个窄带太赫兹载波。然后，其输出通过一个光束聚焦天线被辐射。利用由新型太赫兹混频器和放大器组成的MMIC接收信号[141]。

最近，中国的一些大学和公司已经开发了基于全电子的太赫兹无线通信系统，并取得了良好的性能。由电子科技大学（UESTC）开发的220 GHz发射器和接收器的原理图见图14 [17]。这个太赫兹通信系统在室外环境下，在200 m的通信距离上达到了3.52 Gbps的实时三维高清（HD）视频信号传输，误码率（BER）为 1.92×10^{-6} 。采用增益为50 dBi的卡塞格伦天线覆盖预期的距离。

研究人员开发了一个高度集成的固态太赫兹MIMO无线通信系统，其系统结构如图15 [133]所示。偏振分集技术被证明可以在视线环境下将频谱效率提高一倍。采用QPSK作为调制方案，频率为220~255 GHz。值得注意的

是，一对高度集成的单芯片发送器和接收器前端模块是采用0.13 μm SiGe异质结双极晶体管（HBT）技术开发的。它仅使用低成本的引线键合板载芯片封装方案来实现高速基带信号。在发射器芯片上，每个上变频混频器后面都有一个增益带宽有限的四级功率放大器，用于几米的通信距离。来自每个芯片上变频/下变频路径的两个独立的同相和正交（IQ）数据流被引导到一个共同的透镜耦合的宽带片上缝隙天线系统。这样，两个正交圆偏振，即左手圆偏振（LHCP）和右手圆偏振（RHCP）可以以良好的隔离度进行传输，以实现高质量的通信，而不需要在基带中为发射器和接收器模块之间的任何相对方向提供高速去极化器。缝隙天线与直径为9 mm的SL结合，在210~270 GHz下为每个模块提供了23.5~27 dBi的指向性，这使得两个独立的QPSK数据流可以在230 GHz下以110 Gbps和80 Gbps的总速度在1 m和2 m位置成功传输[133]。

表2 [142–145]比较了最先进的基于电子的太赫兹无线链路，表3 [150–159]比较了最近基于光子学的太赫兹无线链路。可以看出，最先进的基于电子的太赫兹无线通信系统使用16-QAM和QPSK调制方案，在大约2 m的距离内可以达到100 Gbps的数据传输率，载波频率通常小于300 GHz，天线增益通常在25 dBi左右。对于更远的距离，需要更高的天线增益或更多的输出功率。与基于电子的系统相比，基于光子的太赫兹无线通信系统可以使用更高的载波频率和更多的信道，以实现更高的数据速率（>600 Gbps）。

4.3. 太赫兹无线通信的主要挑战

很明显，最近在电子和光子太赫兹收发器设计方面的进展已经实现了高效的信号生成、调制和辐射。经过审查的大多数太赫兹无线通信系统都低于300 GHz，为了达到

表2 基于电子的太赫兹无线链路的比较

Reference (year)	Technology	Frequency (GHz)	Modulation	On-chip LO	Antenna type	Antenna gain (dBi)	Data rate (Gbps)	Distance	Channels
Ref. [142] (2014)	35 nm InP	240	8-PSK	Yes	Horn + lens	N/A	96	40 m	1 IQ
Ref. [144] (2017)	130 nm SiGe BiCMOS	190	BPSK	No	Monopole	5	50/40	6/20 mm	1
Ref. [145] (2017)	40 nm CMOS	300	16-QAM	No	Horn	N/A	32	1 cm	1
Ref. [143] (2018)	80 nm InP	270	16-QAM	No	Horn	50/40	100	2.22 m	1
Ref. [148] (2018)	130 nm SiGe	240	BPSK	Yes	Folded dipole + lens	14	25	1 m	1
Ref. [146] (2019)	40 nm CMOS	265	16-QAM	No	Horn	24	80	3 cm	1
Ref. [147] (2019)	130 nm SiGe	225–255	64-QAM	Yes	On-chip ring + lens	26	81	1 m	1 IQ
Ref. [149] (2019)	130 nm SiGe	230	16-QAM	Yes	On-chip ring + lens	26	100	1 m	1 IQ
Ref. [133] (2020)	130 nm SiGe	225–255	QPSK	Yes	On-chip slot + lens	25	100 or 80	1 or 2 m	1 IQ

BiCMOS: bipolar complementary metal-oxide-semiconductor; CMOS: complementary metal-oxide-semiconductor; BPSK: binary phase-shift keying; N/A: not available.

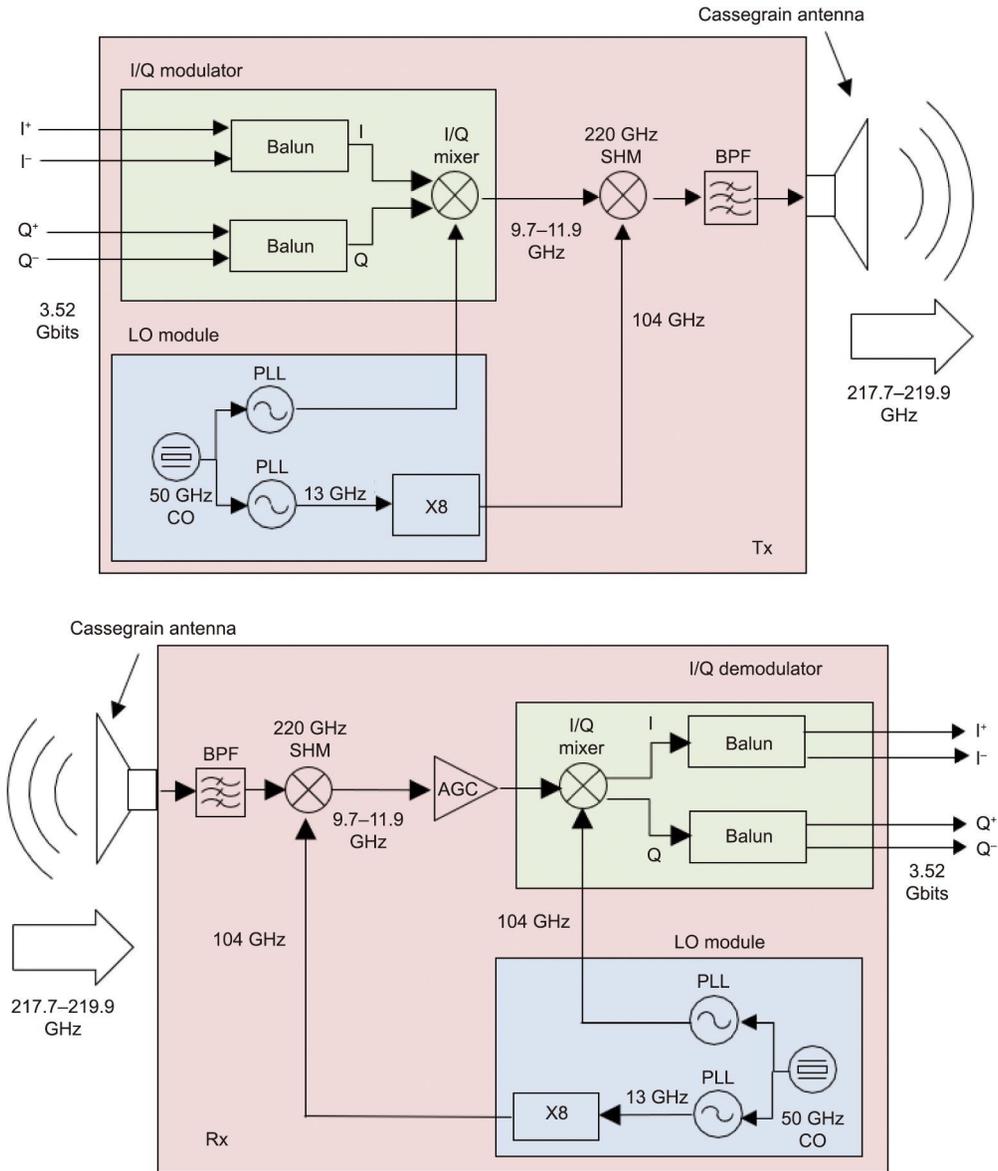


图14. 220GHz固态无线通信系统的发射器和接收器的示意图[17]。PLL: 锁相环; BPF: 带通滤波器; AGC: 自动增益控制器; SHM: 次谐波混频器; I/Q: 同相/正交; LO: 本地振荡器; CO: 晶体振荡器; I: 同相; Q: 正交。

大于1 Tbps的数据速率，工作频率将高于300~500 GHz。根据国际半导体技术路线图（International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS），硅互补金属氧化物半导体（Si-CMOS）的截至频率将在几年内超过500 GHz。除了高数据率外，选择更高的载波频率还带来了其他重要的优势。例如，天线尺寸可以小于1 mm，而波束形成天线阵列的尺寸将达到几毫米。这种微型天线可与通信终端和设备集成，成本低廉。考虑路径损耗，500 GHz接近于“最后一英里”（last-one-mile）户外应用的上限，这与短距离的室内应用不同[18]。相信在几年内，商用太赫兹无线通信系统可能是基于电子、光学或者电子与光学设备的组合；然而，基于电子的系统最终可能

会成为主导模式，因为有可能制造出各种高度集成和低成本的系统[160]。太赫兹无线通信系统的主要挑战表现为以下五个方面。

4.3.1. 电子器件的制造

虽然射频/微波设备的制造已经成熟，但太赫兹设备的制造还不成熟。基本的二极管和晶体管在太赫兹波段还不能很好地工作。高精度的机械加工已经生产出许多高质量的毫米波和亚太赫兹天线和波导，但难以满足更高频率的要求。鉴于半导体器件的工作频率高达太赫兹频段，半导体材料的影响和器件封装的分布式参数效应直接影响电路和系统的性能。特别是，由于尺寸小，太赫兹振幅调制器的制造是非常具有挑战性的。调制速度和调制深度带来

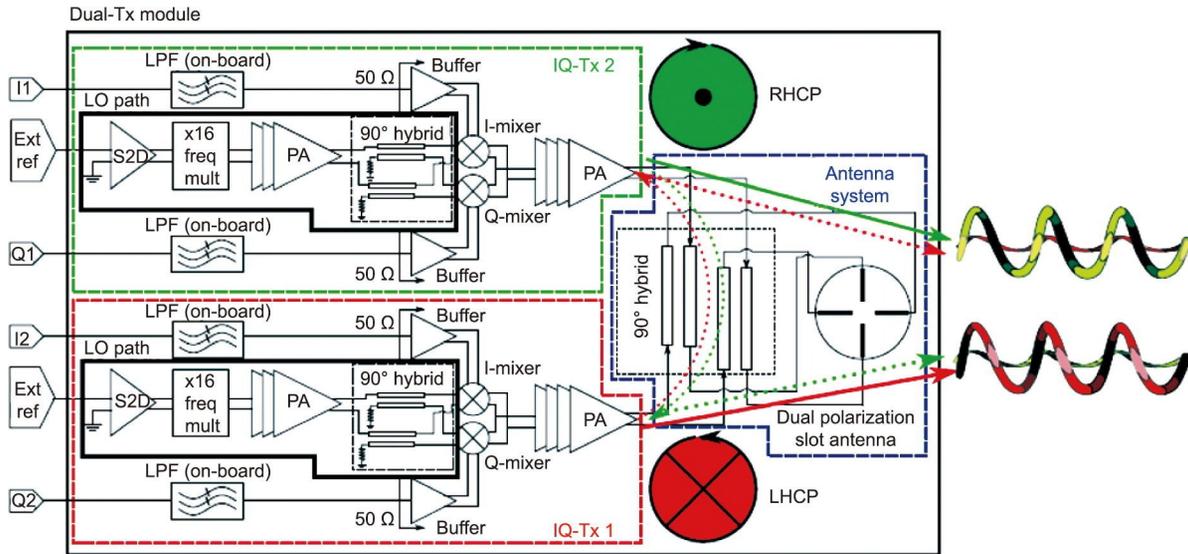


图 15. 具有左旋圆极化 (LHCP) 和右旋圆极化 (RHCP) 的极化分集无线链路的发射模块结构[133]。IQ-Tx: 同相和正交发射器; S2D: 单变差; freq mult: 频率倍增器; Ext ref: 外部参考。

表 3 基于光子学的太赫兹无线链路的比较

Reference (year)	Technology	Frequency (GHz)	Modulation	Data rate (Gbps)	Distance (m)
Ref. [150] (2016)	Optical frequency comb and UTC-PD photomixing emitter	300–500	QPSK	160.00	0.5
Ref. [151] (2017)	Optical frequency comb and heterodyne photomixing	400	16-QAM	106.00	0.5
Ref. [152] (2018)	UTC-PD and photomixing emitter	350	16-QAM	100.00	2.0
Ref. [153] (2019)	2 × 2 MIMO optical system	375–500	PDM-QPSK	120.00	0.142
Ref. [154] (2019)	DFB lasers chip and sub-harmonic Schottky mixer	408	16-QAM	131.21	10.7
Ref. [155] (2019)	Photodiode-based transmitter and Schottky-barrier-diode mixer receiver	720	N/A	12.50	N/A
Ref. [156] (2019)	2 × 2 MIMO and LUT predistortion	124–152	PS-64-QAM	1081.34	3.1
Ref. [157] (2020)	Heterodyne photomixer and sub-harmonic Schottky mixer	320–380	PS-64-QAM-OFDM	510.50	2.8
Ref. [158] (2020)	Kramers–Kronig receiver	300	16-QAM	115.00	110
Ref. [159] (2021)	UTC-PD and plasmonic RF-to-optical mixer	191.5–270.5	NFDM	240/190	5 / 115

PDM: polarization division multiplexing; LUT: look-up-table; PS: probabilistic shaping; OFDM: orthogonal frequency division multiplexing; DFB: distributed feedback; NFDM: nonlinear frequency domain multiplexing.

了更大的挑战。众所周知，天然材料不能有效和快速地操纵太赫兹波。因此，有必要确定一种合适的材料和结构来实现太赫兹波的高速调制。到目前为止，2DEG 复合材料（如 GaN HEMT）和 2D 材料（如石墨烯）已经被应用于太赫兹调制器。因此，未来可以开发在太赫兹波段响应时间小于 1 ps 的人造材料，用于器件的制造。

4.3.2. 功率效率和散热

目前基于电子的太赫兹系统产生的功率通常低于 10 mW。因此，除非采用高增益天线，否则传输距离非常短。随着功率和工作频率的提高，功耗和散热可能成为主要问题，因为导电材料的欧姆损耗与频率成正比，而太赫兹设备和系统的尺寸必然很小。功率效率和散热已经成为

毫米波系统的一个问题，包括 5G 毫米波移动站和基站。提高功率效率和处理散热问题是商用太赫兹无线通信系统的主要挑战。

4.3.3. 数字信号处理的速度

太赫兹通信系统需要低复杂性和高效的数字信号处理，以便在未来几十年内实现超过 100 Gbps 甚至 1 Tbps 的高速通信。模数转换器 (ADC) 的采样率不断提高，与太赫兹通信的较大带宽相对应。然而，建造满足尺寸、重量、功率和带宽要求的设备已不再可行。例如，具有高速采样率（如每秒超过 10 G 的样本量）和高精度（如 ≥ 6 位）特性的 ADC 要么没有，要么可能对设备来说成本太高、功耗太大。为了解决这个问题，低分辨率的 ADC 被

用来对接收信号进行量化。高效的太赫兹波段信号处理是至关重要的，原因有二：首先，有必要考虑大规模MIMO天线系统，以克服由于严重的功率限制和传播损失造成的通信距离很短的问题；其次，有必要克服太赫兹信道和数字基带系统带宽不匹配的问题，因为这样做将有效地降低硬件成本和功耗[161]。

4.3.4. 设计、仿真和测量工具

通信系统的计算机辅助设计已经成为一种行业标准实践，大大减少了开发时间和成本。然而，目前的设计和仿真工具只对100 GHz左右的频率相对准确，因为许多更高频率的器件模型并不准确或未知。随着半导体器件的工作频率进入太赫兹频段，半导体材料的影响和器件封装的分布式参数影响变得比低频时更加显著。非线性模型和半导体器件参数提取的准确性直接影响电路设计，并决定了系统的性能。此外，混频器、放大器和乘法器是具有复杂特性的高精度非线性器件。改进目前的设计和仿真工具以支持太赫兹通信设备和系统设计是非常具有挑战性的。此外，对太赫兹的操作性质涉及多物理层面（电子、电磁、热等），为了更好地模拟实际情况，多物理仿真可能是不可避免的。

其他相关的研究和开发工具包括测量设备和设施，但他们价格昂贵且功能有限。所以，对即经济且准确的仿真和测量工具的需求越来越大。

4.3.5. 太赫兹波的传播和三维信号覆盖

太赫兹通信系统带来了新的挑战，这在较低的频率下是从未见过的。例如，太赫兹频段有非常高的传播损耗（在1 THz下1 m距离内超过94 dB）和高度频率选择性的分子吸收损耗，正如第2节所讨论的，这极大地降低了太赫兹的传输距离[18]。此外，高反射和散射损耗使非视线射线明显衰减，短波长使太赫兹信号的传播非常容易受阻。诸如用户、行走的人类和固有的室内建筑（如墙壁和家具）等物体可以作为不可穿透的障碍物。因此，太赫兹频段的传播特性是独特的，与射频/微波的传播特性不同。这促使人们研究和开发新的通信模式和新的信号处理及信道建模工具来应对这些挑战。确保所需应用的三维信号覆盖是太赫兹无线通信系统的另一个主要挑战。

5. 讨论和结论

本文详细介绍和回顾了太赫兹成像和太赫兹无线通信系统，并介绍了最先进的系统性能。虽然这两个系统看起

来很不一样，但实际上它们是紧密相连的。本节将对这两个系统进行比较，然后讨论如何将它们联系或整合起来，以加速太赫兹技术的发展。

5.1. 太赫兹成像和无线通信系统的比较

就像太赫兹成像系统一样，太赫兹无线通信系统由一个信号发射器/发生器和一个信号探测器（接收器）组成。目前，使用锁模激光器和光电导开关的飞秒脉冲源是最流行的宽带太赫兹信号生成的商业系统。这种系统主要应用于基于时间和深度分辨率的高分辨率三维成像。它们消耗较大功率（如1 kW或更多），并且能源效率不高。此外，大多数短脉冲系统并不便宜，而且尺寸会非常大。然而，大多数无线通信和相关应用需要紧凑、低功耗的太赫兹源和高光谱纯度。用于光通信系统的光子技术的最新进展，使得使用紧凑和高功率效率的相干太赫兹系统产生所需的太赫兹信号成为可能。最有前途的太赫兹信号生成的光子技术是两个具有不同波长的光源在光电二极管或光混频器中混合后的异相作用。太赫兹信号的频率是两个光源的频率差[88]。

许多为全电子太赫兹成像应用开发的太赫兹源和检测器也可用于太赫兹无线通信，反之亦然[162–163]。这使得将太赫兹成像和太赫兹通信结合到单个集成太赫兹系统中成为可能。高功率的太赫兹源对于太赫兹成像和太赫兹无线通信都是非常理想的，并且在这两个研究领域都吸引了很多研究兴趣。对于太赫兹成像，重点是开发太赫兹探测器阵列（如视频速率的太赫兹相机），而对于太赫兹无线通信，能够与互补金属氧化物半导体（CMOS）技术兼容的太赫兹发射器和接收器更具有优势。表4给出了太赫兹成像和无线通信系统的详细比较，涵盖了两种系统的重要组件。

5.2. 太赫兹传感和通信系统的集成

太赫兹成像的最简单形式是探测或传感。传感和通信的集成（ISAC）已经成为一个热门话题[164]。作为超越简单共享频谱的一步，传感和通信的共同设计显然是对资源的有效利用，因为这将在频谱、能源、空间和成本方面提供巨大的收益。因此，ISAC是一个范式的改变，通过共享使用硬件平台和联合信号处理框架来优化以前相互竞争的传感和通信操作。ISAC系统将通过高分辨率的传感和定位提供物体和环境信息，这反过来将有利于通信性能，因为它将有助于完善信道估计。这些想法已经被应用于一些新颖的应用，包括车辆网络、室内定位和秘密通信[165–166]。除了学术研究，工业界对ISAC的研究也在顺

表4 太赫兹成像和无线通信系统的比较

Item	Aspects										
	Aim and objectives	Sources/oscillators	Antennas	Beam scanning/steering	Amplifiers	Filters	Mixers/modulator	Other devices	Propagation channel	Coding/modulation	Software
THz imaging	To produce imaging from typically reflected signals	CW or short pulses	High-gain antennas or lens antennas	Essential, achieved by moving antenna or object	Desirable but not essential	Desirable but not essential	Not essential, depending on the method	BS and delay-line may be required	Line of sight required	Not necessary	Mainly imaging processing and data interpretation
THz wireless communication system	To achieve ultra-high-data-rate communications	Mainly CW	High gain and/or MIMO antennas	Not essential, desirable for some applications	Necessary, different types may be required	Necessary	Essential	Phase shifter, circulator, ADC, DSP, ASIC, and so on may be required	Line of sight desirable; but not essential; channel information may be required	Essential	Very complex DSP required

DSP: digital signal processor; ASIC: application-specific integrated circuit.

利进行中。有理由认为，ISAC正在成为5.5G、6G和下一代无线局域网（WLAN）标准的新兴技术。

尽管有很大的吸引力，但联合设计并不是一件容易的事。在建立系统结构、网络和硬件以及信号处理方面存在许多挑战。对于系统和硬件的部署，在传感和通信方面找到联合块可以促进ISAC的实现。参考文献[167]对无线通信系统和频率调制连续波（FMCW）雷达系统中典型的直接转换收发器架构进行了总结。这两个系统共享许多硬件组件，如压控振荡器（VCO）、锁相环（PLL）、低噪声放大器（LNA）和功率放大器。然而，共享组件必须满足双方的要求。例如，通信系统中的VCO应该有一个宽的调谐范围，以解决大批量的数据，而非线性变阻器引入的非线性将使FMCW系统中的线性调频脉冲波形失真。因此，ISAC需要一个宽调谐范围和线性VCO。至于信号波形和处理，有几种候选波形，取决于不同的估值因素[168]。现有的4G和5G通信系统的主导波形是正交频分复用（OFDM）。对于雷达传感，典型的波形是基于线性调频脉冲信号的FMCW传输。线性调频信号拥有固有的低峰均功率比（PAPR），这在通信系统中是有利的，它的缺点是承载大量数据的能力有限。

5.3. 结论

本文对太赫兹成像系统和无线通信系统进行了全面回顾。太赫兹成像正在变得成熟，而太赫兹通信仍处于早期阶段，但具有强劲的发展势头。这两种技术都面临着类似的挑战，因为它们使用相同的太赫兹频谱，并有一些共同的硬件组件，而且都可以使用基于光子、电子或二者结合

的方法来实现。开发商业上可行的大功率室温太赫兹源仍然是该领域的最大挑战。尽管射频/微波通信系统的一般原则和设计方法可以应用于太赫兹通信系统，但太赫兹面临一系列需要处理的特殊功能和问题，包括元件和设备制造、传播渠道、设计和仿真工具、测量、算法和软件开发。据设想，电子集成电路将在太赫兹系统中发挥重要作用，而ISAC可能是实现将目前的太赫兹成像与太赫兹无线通信系统结合起来的绝佳方式。相信在不久的将来，经济且高性能的太赫兹成像和太赫兹无线通信系统将成为现实。

Compliance with ethics guidelines

Yi Huang, Yaochun Shen, and Jiayou Wang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Tataria H, Shafi M, Molisch AF, Dohler M, Sjöland H, Tufvesson F. 6G wireless systems: vision, requirements, challenges, insights, and opportunities. *Proc IEEE* 2021;109(7):1166–99.
- [2] Hajiyat ZRM, Ismail A, Sali A, Hamidon MN. Antenna in 6G wireless communication system: specifications, challenges, and research directions. *Optik* 2021;231:166415.
- [3] Nguyen DC, Ding M, Pathirana PN, Seneviratne A, Li J, Niyato D, et al. 6G Internet of Things: a comprehensive survey. *IEEE Internet Things J* 2022;9(1):359–83.
- [4] White paper on 6G vision and candidate technologies. Report. Beijing: IMT-2030 (6G) Promotion Group. 2021 Jun.
- [5] Siegel PH. Terahertz technology. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2002;50(3):

- 910–28.
- [6] Terahertz technology is set to enable higher performance in a wide range of applications [Internet]. San Jose:TeraSense; 2015 Aug 25 [cited 2022 Apr 11]. Available from: <http://terasense.com/news/terahertz-technology/>.
 - [7] Xie J, Ye W, Zhou L, Guo X, Zang X, Chen L, et al. A review on terahertz technologies accelerated by silicon photonics. *Nanomaterials* 2021;11(7):1646.
 - [8] Valušis G, Liasuskas A, Yuan H, Knap W, Roskos HG. Roadmap of terahertz imaging 2021. *Sensors* 2021;21(12):4092.
 - [9] Piesiewicz R, Kleine-Ostmann T, Krumbholz N, Mittleman D, Koch M, Schoebel J, et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives. *IEEE Antennas Propag Mag* 2007;49(6):24–39.
 - [10] Federici J, Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications. *J Appl Phys* 2010;107(11):6.
 - [11] Song HJ, Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2011;1(1):256–63.
 - [12] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A review on terahertz communications research. *J Infrared Millim Terahertz Waves* 2011;32(2):143–71.
 - [13] Kürner T, Priebe S. Towards THz communications—status in research, standardization and regulation. *J Infrared Millim Terahertz Waves* 2014;35(1):53–62.
 - [14] Akyildiz IF, Jornet JM, Han C. Terahertz band: next frontier for wireless communications. *Phys Commun* 2014;12:16–32.
 - [15] Petrov V, Pyattaev A, Moltchanov D, Koucheryvy Y. Terahertz band communications: applications, research challenges, and standardization activities. In: *Proceedings of 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT); 2016 Oct 18–20; Lisbon, Portugal; 2016.*
 - [16] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud CC. Advances in terahertz communications accelerated by photonics. *Nat Photonics* 2016;10(6):371–9.
 - [17] Chen Z, Ma X, Zhang B, Zhang Y, Niu Z, Kuang N, et al. A survey on terahertz communications. *China Commun* 2019;16(2):1–35.
 - [18] Rappaport TS, Xing Y, Kanhere O, Ju S, Madanayake A, Mandal S, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond. *IEEE Access* 2019;7:78729–57.
 - [19] Lemic F, Abadal S, Tavernier W, Stroobant P, Colle D, Alarcón E, et al. Survey on terahertz nanocommunication and networking: a top – down perspective. *IEEE J Sel Areas Commun* 2021;39(6):1506–43.
 - [20] Chaccour C, Soorki MN, Saad W, Bennis M, Popovski P, Debbah M. Seven defining features of terahertz (THz) wireless systems: a fellowship of communication and sensing. *IEEE Commun Surv Tutor* 2022;24(2):967–93.
 - [21] Sareddeen H, Saeed N, Al-Naffouri TY, Alouini MS. Next generation terahertz communications: a rendezvous of sensing, imaging, and localization. *IEEE Commun Mag* 2020;58(5):69–75.
 - [22] Petrov V, Kurner T, Hosako I. IEEE 802.15.3d: first standardization efforts for sub-terahertz band communications toward 6G. *IEEE Commun Mag* 2020;58(11):28–33.
 - [23] Huang Y. *Antennas: from theory to practice*. 2nd ed. London: Wiley; 2021.
 - [24] Chen Y, Li Y, Han C, Yu Z, Wang G. Channel measurement and ray-tracing-statistical hybrid modeling for low-terahertz indoor communications. *IEEE Trans Wirel Commun* 2021;20(12):8163–76.
 - [25] Ma J, Shrestha R, Moeller L, Mittleman DM. Invited article: channel performance for indoor and outdoor terahertz wireless links. *APL Photonics* 2018;3(5):051601.
 - [26] Room-temperature THz-QCL source [Internet]. Hamamatsu: Hamamatsu Photonics; [cited 2022 Apr 11]. Available from: <https://www.hamamatsu.com/eu/en/our-company/business-domain/central-research-laboratory/optical-materials/qcl.html>.
 - [27] Booske JH, Dobbs RJ, Joye CD, Kory CL, Neil GR, Park GS, et al. Vacuum electronic high power terahertz sources. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2011;1(1):54–75.
 - [28] Parker RK, Abrams RH, Danly BG, Levush B. Vacuum electronics. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2002;50(3):835–45.
 - [29] Dobroui A, Yamashita M, Ohshima YN, Morita Y, Otani C, Kawase K. Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator. *Appl Opt* 2004;43(30):5637–46.
 - [30] Bhattacharjee S, Booske JH, Kory CL, van der Weide DW, Limbach S, Gallagher S, et al. Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation. *IEEE Trans Plasma Sci* 2004;32(3):1002–14.
 - [31] Freund H, Neil G. Free-electron lasers: vacuum electronic generators of coherent radiation. *Proc IEEE* 1999;87(5):782–803.
 - [32] Desmaris V, Rashid H, Pavolotsky A, DesignBelitsky V., simulations and optimization of micromachined Golay-cell based THz sensors operating at room temperature. *Procedia Chem* 2009;1(1):1175–8.
 - [33] Müller R, Gutschwager B, Hollandt J, Kehrt M, Monte C, Müller R, et al. Characterization of a large-area pyroelectric detector from 300 GHz to 30 THz. *J Infrared Millim Terahertz Waves* 2015;36(7):654–61.
 - [34] Hesler JL, Crowe TW. Responsivity and noise measurements of zero-bias Schottky diode detectors. In: *Proceedings of 18th International Symposium on Space Terahertz Technology; 2007 Mar 21–23; Pasadena, CA, USA; 2007.*
 - [35] Han R, Zhang Y, Coquillat D, Videlier H, Knap W, Brown E, et al. A 280 GHz Schottky diode detector in 130 nm digital CMOS. *IEEE J Solid State Circuits* 2011;46(11):2602–12.
 - [36] Daghestani N, Parow-Souchon K, Pardo D, Liu H, Brewster N, Frogley M, et al. Room temperature ultrafast InGaAs Schottky diode based detectors for terahertz spectroscopy. *Infrared Phys Technol* 2019;99:240–7.
 - [37] Sun J, Sun YF, Wu DM, Cai Y, Qin H, Zhang BS. High-responsivity, low-noise, room-temperature, self-mixing terahertz detector realized using floating antennas on a GaN-based field-effect transistor. *Appl Phys Lett* 2012;100(1):013506.
 - [38] Bauer M, Venckevičius R, Kašalynas I, Boppel S, Mundt M, Minkevičius L, et al. Antenna-coupled field-effect transistors for multi-spectral terahertz imaging up to 4.25 THz. *Opt Express* 2014;22(16):19235–41.
 - [39] Ryu MW, Lee JS, Kim KS, Park K, Yang JR, Han ST, et al. High-performance plasmonic THz detector based on asymmetric FET with vertically integrated antenna in CMOS technology. *IEEE Trans Electron Devices* 2016; 63(4):1742–8.
 - [40] Bauer M, Rämmer A, Boppel S, Chevtchenko S, Liasuskas A, Heinrich W, et al. High-sensitivity wideband THz detectors based on GaN HEMTs with integrated bow-tie antennas. In: *Proceedings of 10th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC); 2015 Sep 7–8; Paris, France; 2015.*
 - [41] Čibiraite D, Bauer M, Rämmer A, Chevtchenko S, Liasuskas A, Matukas J, et al. Enhanced performance of AlGaIn/GaN HEMT-based THz detectors at room temperature and at low temperature. In: *Proceedings of 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz); 2017 Aug 27–Sep 1; Cancun, Mexico; 2017.*
 - [42] Blin S, Nouvel P, Pénarier A, Hesler J. Terahertz heterodyne communication using GaAs field-effect transistor receiver. *IEEE Electron Device Lett* 2017;38(1):20–3.
 - [43] Hartwick TS, Hodges DT, Barker DH, Foote FB. Far infrared imagery. *Appl Opt* 1976;15(8):1919–22.
 - [44] Hu BB, Nuss MC. Imaging with terahertz waves. *Opt Lett* 1995;20(16):1716–8.
 - [45] Ferguson B, Zhang XC. Materials for terahertz science and technology. *Nat Mater* 2002;1(1):26–33.
 - [46] Chan WL, Deibel J, Mittleman DM. Imaging with terahertz radiation. *Rep Prog Phys* 2007;70(8):1325.
 - [47] Jansen C, Wietzke S, Peters O, Scheller M, Vieweg N, Salhi M, et al. Terahertz imaging: applications and perspectives. *Appl Opt* 2010;49(19):E48–57.
 - [48] Mittleman DM. Twenty years of terahertz imaging. *Opt Express* 2018;26(8):9417–31.
 - [49] Siebert KJ, Quast H, Leonhardt R, Löffler T, Thomson M, Bauer T, et al. Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging. *Appl Phys Lett* 2002;80(16):3003–5.
 - [50] Song H, Hwang S, An H, Song HJ, Song JI. Continuous-wave THz vector imaging system utilizing two-tone signal generation and self-mixing detection. *Opt Express* 2017;25(17):20718–26.
 - [51] Smith PR, Auston DH, Nuss MC. Subpicosecond photoconducting dipole antennas. *IEEE J Quantum Electron* 1988;24(2):255–60.
 - [52] Shen YC, Upadhyaya PC, Beere HE, Linfield EH. Generation and detection of ultrabroadband terahertz radiation using photoconductive emitters and receivers. *Appl Phys Lett* 2004;85(2):164–6.
 - [53] Shen YC, Taday PF. Development and application of terahertz pulsed imaging for nondestructive inspection of pharmaceutical tablet. *IEEE J Sel Top Quantum Electron* 2008;14(2):407–15.
 - [54] Zeitler JA, Shen Y, Baker C, Taday PF, Pepper M, Rades T. Analysis of coating structures and interfaces in solid oral dosage forms by three dimensional terahertz pulsed imaging. *J Pharm Sci* 2007;96(2):330–40.
 - [55] Ho L, Müller R, Römer M, Gordon KC, Heinämäkik J, Kleinebudde P, et al. Analysis of sustained-release tablet film coats using terahertz pulsed imaging. *J Control Release* 2007;119(3):253–61.
 - [56] Yasui T, Yasuda T, Sawanaka K, Araki T. Terahertz paintmeter for noncontact monitoring of thickness and drying progress in paint film. *Appl Opt* 2005;44(32):6849–56.
 - [57] Su K, Shen Y, Zeitler JA. Terahertz sensor for non-contact thickness and quality measurement of automobile paints of varying complexity. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2014;4(4):432–9.

- [58] Tu W, Zhong S, Shen Y, Incecik A. Nondestructive testing of marine protective coatings using terahertz waves with stationary wavelet transform. *Ocean Eng* 2016;111:582–92.
- [59] Yu C, Fan S, Sun Y, Pickwell-MacPherson E. The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: a review of investigations to date. *Quant Imaging Med Surg* 2012;2(1):33–45.
- [60] Woodward RM, Cole BE, Wallace VP, Pye RJ, Arnone DD, Linfield EH, et al. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue. *Phys Med Biol* 2002;47(21):3853–63.
- [61] Woodward RM, Wallace VP, Pye RJ, Cole BE, Arnone DD, Linfield EH, et al. Terahertz pulse imaging of ex vivo basal cell carcinoma. *J Invest Dermatol* 2003;120(1):72–8.
- [62] Pickwell E, Cole BE, Fitzgerald AJ, Pepper M, Wallace VP. In vivo study of human skin using pulsed terahertz radiation. *Phys Med Biol* 2004;49(9):1595–607.
- [63] Wallace VP, Fitzgerald AJ, Pickwell E, Pye RJ, Taday PF, Flanagan N, et al. Terahertz pulsed spectroscopy of human basal cell carcinoma. *Appl Spectrosc* 2006;60(10):1127–33.
- [64] Fitzgerald AJ, Wallace VP, Jimenez-Linan M, Bobrow L, Pye RJ, Purushotham AD, et al. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors. *Radiology* 2006;239(2):533–40.
- [65] Sim YC, Ahn KM, Park JY, Park CS, Son JH. Temperature-dependent terahertz imaging of excised oral malignant melanoma. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2013;3(4):368–73.
- [66] Wahaia F, Valusis G, Bernardo LM, Oliveira A, Macutkevicius J, Kasalynas I, et al. Detection of colon and rectum cancers by terahertz techniques. In: Popp J, Drexler W, Tuchin VV, Matthews DL, editors. *Biophotonics: photonic solutions for better health care II*. Bellingham: SPIE; 2010. p. 536–49.
- [67] Oh SJ, Kim SH, Ji YB, Jeong K, Park Y, Yang J, et al. Study of freshly excised brain tissues using terahertz imaging. *Biomed Opt Express* 2014;5(8):2837–42.
- [68] Yamaguchi S, Fukushi Y, Kubota O, Itsuji T, Ouchi T, Yamamoto S. Brain tumor imaging of rat fresh tissue using terahertz spectroscopy. *Sci Rep* 2016;6:30124.
- [69] Brahm A, Kunz M, Riehemann S, Notni G, Tünnermann A. Volumetric spectral analysis of materials using terahertz-tomography techniques. *Appl Phys B* 2010;100(1):151–8.
- [70] Santos IP, van Doorn R, Caspers PJ, Bakker Schut TC, Barroso EM, Nijsten TEC, et al. Improving clinical diagnosis of early-stage cutaneous melanoma based on Raman spectroscopy. *Br J Cancer* 2018;119(11):1339–46.
- [71] Chen HT, Kersting R, Cho GC. Terahertz imaging with nanometer resolution. *Appl Phys Lett* 2003;83(15):3009–11.
- [72] Astley V, Mendis R, Mittleman DM. Characterization of terahertz field confinement at the end of a tapered metal wire waveguide. *Appl Phys Lett* 2009;95(3):031104.
- [73] Mitrofanov O, Viti L, Dardanis E, Giordano MC, Ercolani D, Politano A, et al. Near-field terahertz probes with room-temperature nanodetectors for subwavelength resolution imaging. *Sci Rep* 2017;7:44240.
- [74] Okada K, Serita K, Cassar Q, Murakami H, MacGrogan G, Guillet JP, et al. Terahertz near-field microscopy of ductal carcinoma *in situ* (DCIS) of the breast. *J Phys Photonics* 2020;2(4):044008.
- [75] Beck M, Plötzting T, Maussang K, Palomo J, Colombelli R, Sagnes I, et al. High-speed THz spectroscopic imaging at ten kilohertz pixel rate with amplitude and phase contrast. *Opt Express* 2019;27(8):10866–72.
- [76] Berry CW, Wang N, Hashemi MR, Unlu M, Jarrahi M. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes. *Nat Commun* 2013;4:1622.
- [77] Yang SH, Hashemi MR, Berry CW, Jarrahi M. 7.5% optical-to-terahertz conversion efficiency offered by photoconductive emitters with three-dimensional plasmonic contact electrodes. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2014;4(5):575–81.
- [78] Jiang Z, Zhang XC. 2D measurement and spatio-temporal coupling of few-cycle THz pulses. *Opt Express* 1999;5(11):243–8.
- [79] Ushakov A, Chizhov P, Bukin V, Savel'ev A, Garnov S. Broadband in-line terahertz 2D imaging: comparative study with time-of-flight, cross-correlation, and Fourier transform data processing. *J Opt Soc Am* 2018;35(5):1159–64.
- [80] Chan WL, Moravec ML, Baraniuk RG, Mittleman DM. Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval. *Opt Lett* 2008;33(9):974–6.
- [81] Chan WL, Chen HT, Taylor AJ, Brener I, Cich MJ, Mittleman DM. A spatial light modulator for terahertz beams. *Appl Phys Lett* 2009;94(21):213511.
- [82] Guerboukha H, Nallappan K, Skorobogatiy M. Exploiting *k*-space/frequency duality toward real-time terahertz imaging. *Optica* 2018;5(2):109–16.
- [83] Shen YC, Gan L, Stringer M, Burnett A, Tych K, Shen H, et al. Terahertz pulsed spectroscopic imaging using optimized binary masks. *Appl Phys Lett* 2009;95(23):231112.
- [84] Watts CM, Shrekenhamer D, Montoya J, Lipworth G, Hunt J, Sleasman T, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators. *Nat Photonics* 2014;8(8):605–9.
- [85] Verghese S, McIntosh KA, Calawa S, Dinatale WF, Duerr EK, Molvar KA. Generation and detection of coherent terahertz waves using two photomixers. *Appl Phys Lett* 1998;73(26):3824–6.
- [86] Matsuura S, Blake GA, Wyss RA, Pearson JC. A traveling-wave THz photomixer based on angle-tuned phase matching. *Appl Phys Lett* 1999;74(19):2872–4.
- [87] Baker C, Gregory I, Evans MJ, Tribe WR, Linfield EH, Missous M. All-optoelectronic terahertz system using low-temperature-grown InGaAs photomixers. *Opt Express* 2005;13(23):9639–44.
- [88] Safian R, Ghazi G, Mohammadian N. Review of photomixing continuous-wave terahertz systems and current application trends in terahertz domain. *Opt Eng* 2019;58(11):110901.
- [89] Li B, Wang D, Rong L, Zhai C, Wang Y, Zhao J. Application of continuous-wave terahertz computed tomography for the analysis of chicken bone structure. *Opt Eng* 2018;57(2):023105.
- [90] Deninger AJ, Roggenbuck A, Schindler S, Preu S. 2.75 THz tuning with a triple-DFB laser system at 1550 nm and InGaAs photomixers. *J Infrared Millim Terahertz Waves* 2015;36(3):269–77.
- [91] Appleby R, Anderton RN. Millimeter-wave and submillimeter-wave imaging for security and surveillance. *Proc IEEE* 2007;95(8):1683–90.
- [92] Knipper R, Brahm A, Heinz E, May T, Notni G, Meyer HG, et al. THz absorption in fabric and its impact on body scanning for security application. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2015;5(6):999–1004.
- [93] Kowalski M. Real-time concealed object detection and recognition in passive imaging at 250 GHz. *Appl Opt* 2019;58(12):3134–40.
- [94] Luukanen A, Grönberg L, Grönholm M, Lappalainen P, Leivo M, Rautiainen A, et al. Real-time passive terahertz imaging system for standoff concealed weapons imaging. In: Wikner DA, Luukanen AR, editors. *Passive millimeter wave imaging technology XIII*. Bellingham: SPIE; 2010. p. 24–31.
- [95] Hassel J, Dabirnezare SO, Gandini E, Grönberg L, Sipola H, Rautiainen A, et al. Dual-band submillimeter-wave kinetic inductance bolometers and an imaging system for contraband object detection. In: Wikner DA, Robertson DA, editors. *Passive and active millimeter-wave imaging XXI*. Bellingham: SPIE; 2018.
- [96] Mehdi I, Siles JV, Lee C, Schlecht E. THz diode technology: status, prospects, and applications. *Proc IEEE* 2017;105(6):990–1007.
- [97] Petkie DT, Casto C, De Lucia FC, Murrill SR, Redman B, Espinola RL, et al. Active and passive imaging in the THz spectral region: phenomenology, dynamic range, modes, and illumination. *J Opt Soc Am B* 2008;25(9):1523–31.
- [98] thruvision.com [Internet]. Ashburn: thruvision; [cited 2022 Apr 11]. Available from: <https://thruvision.com>.
- [99] Kasjoo SR, Mokhar MBM, Zakaria NF, Juhari NJ. A brief overview of detectors used for terahertz imaging systems. *AIP Conf Proc* 2020;2203:020020.
- [100] Javadi E, But DB, Ikamas K, Zdanavičius J, Knap W, Lissauskas A. Sensitivity of field-effect transistor-based terahertz detectors. *Sensors* 2021;21(9):2909.
- [101] Miyamoto T, Yamaguchi A, Mukai T. Terahertz imaging system with resonant tunneling diodes. *Jpn J Appl Phys* 2016;55(3):032201.
- [102] Rowe S, Pascale E, Doyle S, Dunscombe C, Hargrave P, Papageorgio A, et al. A passive terahertz video camera based on lumped element kinetic inductance detectors. *Rev Sci Instrum* 2016;87(3):033105.
- [103] Dill S, Peichl M, Schreiber E, Anglberger H. Improved characterization of scenes with a combination of mmw radar and radiometer information. In: Wikner DA, Robertson DA, editors. *Passive and active millimeter-wave imaging XX*. Bellingham: SPIE; 2017.
- [104] Dolganova IN, Zaytsev KI, Metelkina AA, Yakovlev EV, Karasik VE, Yurchenko SO. Combined terahertz imaging system for enhanced imaging quality. *Opt Quantum Electron* 2016;48(6):325.
- [105] Garcia-Rial F, Montesano D, Gómez I, Callejero C, Bazus F, Grajal J. Combining commercially available active and passive sensors into a millimeter-wave imager for concealed weapon detection. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2019;67(3):1167–83.
- [106] Koch-Dandolo CL, Filtenborg T, Fukunaga K, Skou-Hansen J, Jepsen PU. Reflection terahertz time-domain imaging for analysis of an 18th century neoclassical easel painting. *Appl Opt* 2015;54(16):5123–9.
- [107] Adam AJL, Planken PCM, Meloni S, Dik J. Terahertz imaging of hidden paint layers on canvas. *Opt Express* 2009;17(5):3407–16.
- [108] Buron JD, Petersen DH, Boggild P, Cooke DG, Hilke M, Sun J, et al. Graphene

- conductance uniformity mapping. *Nano Lett* 2012;12(10):5074–81.
- [109] Buron JD, Mackenzie DMA, Petersen DH, Pesquera A, Centeno A, Bøggild P, et al. Terahertz wafer-scale mobility mapping of graphene on insulating substrates without a gate. *Opt Express* 2015;23(24):30721–9.
- [110] Lin H, Burton OJ, Engelbrecht S, Tybussek KH, Fischer BM, Hofmann S. Through-substrate terahertz time-domain reflection spectroscopy for environmental graphene conductivity mapping. *Appl Phys Lett* 2020;116(2):021105.
- [111] Whelan PR, Shen Q, Luo D, Wang M, Ruoff RS, Jepsen PU, et al. Reference-free THz-TDS conductivity analysis of thin conducting films. *Opt Express* 2020;28(20):28819–30.
- [112] Rao L. Realization of temperature measurement by passive terahertz imaging. In: *Proceedings of 13th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT)*; 2020 Aug 29–Sep 1; Tianjin, China; 2020.
- [113] Ellrich F, Bauer M, Schreiner N, Keil A, Pfeiffer T, Klier J, et al. Terahertz quality inspection for automotive and aviation industries. *J Infrared Millim Terahertz Waves* 2020;41(4):470–89.
- [114] Dandolo CLK, Guillet JP, Ma X, Fauquet F, Roux M, Mounaix P. Terahertz frequency modulated continuous wave imaging advanced data processing for art painting analysis. *Opt Express* 2018;26(5):5358–67.
- [115] Jorret JM, Akyildiz IF. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band. *IEEE Trans Wirel Commun* 2011;10(10):3211–21.
- [116] Shafie A, Yang N, Durrani S, Zhou X, Han C, Juntti M. Coverage analysis for 3D terahertz communication systems. *IEEE J Sel Areas Commun* 2021;39(6):1817–32.
- [117] Scalari G, Walther C, Fischer M, Amanti MI, Terazzi R, Hoyler N, et al. Recent progress on long wavelength quantum cascade lasers between 1–2 THz. In: *Proceedings of IEEE Lasers and Electro–Optics Society Annual Meeting Conference Proceedings*; 2007 Oct 21–25; Lake Buena Vista, FL, USA; 2007.
- [118] Nagatsuma T, Ito H, Ishibashi T. High-power RF photodiodes and their applications. *Laser Photonics Rev* 2009;3(1–2):123–37.
- [119] Hayashi S, Ito A, Hitaka M, Fujita K. Room temperature, single-mode 1.0 THz semiconductor source based on long-wavelength infrared quantum-cascade laser. *Appl Phys Express* 2020;13(11):112001.
- [120] Kleine-Ostmann T, Pierz K, Hein G, Dawson P, Koch M. Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator. *Electron Lett* 2004;40(2):124–6.
- [121] Hirata A, Takahashi H, Kukutsu N, Kado Y, Ikegawa H, Nishikawa H, et al. Transmission trial of television broadcast materials using 120 GHz-band wireless link. *NTT Tech Rev* 2009;7(3):1–6.
- [122] Hirata A, Kosugi T, Takahashi H, Yamaguchi R, Nakajima F, Furuta T, et al. 120 GHz-band millimeter-wave photonic wireless link for 10 Gb/s data transmission. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2006;54(5):1937–44.
- [123] Hirata A, Takahashi H, Yamaguchi R, Kosugi T, Murata K, Nagatsuma T, et al. Transmission characteristics of 120 GHz-band wireless link using radio-on-fiber technologies. *J Lightwave Technol* 2008;26(15):2338–44.
- [124] Kosugi T, Tokumitsu M, Murata K, Enoki T, Takahashi H, Hirata A, et al. 120 GHz Tx/Rx waveguide modules for 10 Gbit/s wireless link system. In: *Proceedings of IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium*; 2006 Nov 12–15; San Antonio, TX, USA; 2006.
- [125] Yamaguchi R, Hirata A, Kosugi T, Takahashi H, Kukutsu N, Nagatsuma T, et al. 10 Gbit/s MMIC wireless link exceeding 800 meters. In: *Proceedings of IEEE Radio and Wireless Symposium*; 2008 Jan 22–24; Orlando, FL, USA; 2008.
- [126] Hirata A, Yamaguchi R, Kosugi T, Takahashi H, Murata K, Nagatsuma T, et al. 10 Gbit/s wireless link using InP HEMT MMICs for generating 120-GHz-band millimeter-wave signal. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2009;57(5):1102–9.
- [127] Song HJ, Ajito K, Hirata A, Wakatsuki A, Muramoto Y, Furuta T, et al. 8 Gbit/s wireless data transmission at 250 GHz. *Electron Lett* 2009;45(22):1121–2.
- [128] Kuo FM, Huang CB, Shi JW, Chen NW, Chuang HP, Bowers JE, et al. Remotely up-converted 20 Gbit/s error-free wireless on-off-keying data transmission at W-band using an ultra-wideband photonic transmitter-mixer. *IEEE Photonics J* 2011;3(2):209–19.
- [129] Song HJ, Ajito K, Muramoto Y, Wakatsuki A, Nagatsuma T, Kukutsu N. 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications. *Electron Lett* 2012;48(15):953–4.
- [130] Yu X, Asif R, Piels M, Zibar D, Galili M, Morioka T, et al. 400 GHz wireless transmission of 60 Gb/s nyquist-QPSK signals using UTC-PD and heterodyne mixer. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2016;6(6):765–70.
- [131] Nagatsuma T, Horiguchi S, Minamikata Y, Yoshimizu Y, Hisatake S, Kuwano S, et al. Terahertz wireless communications based on photonics technologies. *Opt Express* 2013;21(20):23736–47.
- [132] Seeds AJ, Shams H, Fice MJ, Renaud CC. Terahertz photonics for wireless communications. *J Lightwave Technol* 2015;33(3):579–87.
- [133] Rodríguez-Vázquez P, Grzyb J, Heinemann B, Pfeiffer UR. A QPSK 110 Gb/s polarization-diversity MIMO wireless link with a 220–255 GHz tunable LO in a SiGe HBT technology. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2020;68(9):3834–51.
- [134] Koenig S, Boes F, Lopez-Diaz D, Antes J, Henneberger R, Schmogrow R, et al. 100 Gbit/s wireless link with mm-wave photonics. In: *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference* 2013; 2013 Mar 17–21; Anaheim, CA, USA; 2013.
- [135] Antes J, Koenig S, Lopez-Diaz D, Boes F, Tessmann A, Henneberger H, et al. Transmission of an 8-PSK modulated 30 Gbit/s signal using an MMIC-based 240 GHz wireless link. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*; 2013 Jun 2–7; Seattle, WA, USA; 2013.
- [136] Ducournau G, Sziroczak P, Beck A, Bacquet D, Pavanello F, Peytavit E, et al. Ultrawide-bandwidth single-channel 0.4 THz wireless link combining broadband quasi-optic photomixer and coherent detection. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol* 2014;4(3):328–37.
- [137] Ducournau G, Sziroczak P, Bacquet D, Beck A, Akalin T, Peytavit E, et al. Optically power supplied Gbit/s wireless hotspot using 1.55 μm THz photomixer and heterodyne detection at 200 GHz. *Electron Lett* 2010;46(19):1349–51.
- [138] Lee M, Wanke MC. Searching for a solid-state terahertz technology. *Science* 2007;316(5821):64–5.
- [139] Takahashi H, Kosugi T, Hirata A, Murata K, Kukutsu N. 10 Gbit/s BPSK modulator and demodulator for a 120 GHz-band wireless link. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2011;59(5):1361–8.
- [140] Takahashi H, Kosugi T, Hirata A, Takeuchi J, Murata K, Kukutsu N. 120 GHz-band fully integrated wireless link using QPSK for realtime 10 Gbit/s transmission. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2013;61(12):4745–53.
- [141] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, Boes F, Henneberger H, Leuther A, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate. *Nat Photonics* 2013;7(12):977–81.
- [142] Boes F, Messinger T, Antes J, Meier D, Tessmann A, Inam A, et al. Ultra-broadband MMIC-based wireless link at 240 GHz enabled by 64GS/s DAC. In: *Proceedings of IEEE 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*; 2014 Sep 14–19; Tucson, AZ, USA; 2014.
- [143] Hamada H, Fujimura T, Abdo I, Okada K, Song HJ, Sugiyama H, et al. 300-GHz 100-Gb/s InP-HEMT wireless transceiver using a 300 GHz fundamental mixer. In: *Proceedings of IEEE/MTT-S International Microwave Symposium—IMS*; 2018 Jun 10–15; Philadelphia, PA, USA; 2018.
- [144] Fritsche D, Stärke P, Carta C, Ellinger F. A low-power SiGe BiCMOS 190 GHz transceiver chipset with demonstrated data rates up to 50 Gbit/s using on-chip antennas. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2017;65(9):3312–23.
- [145] Hara S, Katayama K, Takano K, Dong R, Watanabe I, Sekine N, et al. A 32 Gbit/s 16QAM CMOS receiver in 300 GHz band. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*; 2017 Jun 4–9; Honolulu, HI, USA; 2017.
- [146] Lee S, Dong R, Yoshida T, Amakawa S, Hara S, Kasamatsu A, et al. 9.5 an 80 Gb/s 300 GHz-band single-chip CMOS transceiver. In: *Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference—(ISSCC)*; 2019 Feb 17–21; San Francisco, CA, USA; 2019.
- [147] Rodríguez-Vázquez P, Grzyb J, Heinemann B, Pfeiffer UR. Optimization and performance limits of a 64-QAM wireless communication link at 220–260 GHz in a SiGe HBT technology. In: *Proceedings of IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*; 2019 Jan 20–23; Orlando, FL, USA; 2019.
- [148] Eissa MH, Malignaggi A, Wang R, Elkholy M, Schmalz K, Ulusoy AC, et al. Wideband 240 GHz transmitter and receiver in BiCMOS technology with 25 Gbit/s data rate. *IEEE J Solid State Circuits* 2018;53(9):2532–42.
- [149] Rodríguez-Vázquez P, Grzyb J, Heinemann B, Pfeiffer UR. A 16-QAM 100 Gb/s 1M wireless link with an EVM of 17% at 230 GHz in a SiGe technology. *IEEE Microw Wirel Compon Lett* 2019;29(4):297–9.
- [150] Yu X, Jia S, Hu H, Galili M, Morioka T, Jepsen PU, et al. 160 Gbit/s photonics wireless transmission in the 300–500 GHz band. *APL Photonics* 2016;1(8):081301.
- [151] Pang X, Jia S, Ozolins O, Yu X, Hu H, Marcon L, et al. Single channel 106 Gbit/s 16QAM wireless transmission in the 0.4 THz band. In: *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*; 2017 Mar 19–23; Los Angeles, CA, USA; 2017.
- [152] Liu K, Jia S, Wang S, Li W, Pang X, Zheng S, et al. Enhanced accessibility of 350 GHz 100 Gbit/s 16-QAM photonic wireless link. In: *Proceedings of 11th UK–Europe–China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies*

- (UCMMT); 2018 Sep 5–7; Hangzhou, China; 2018.
- [153] Li X, Yu J, Wang K, Kong M, Zhou W, Zhu Z, et al. 120 Gb/s wireless terahertz-wave signal delivery by 375 GHz–500 GHz multi-carrier in a 2×2 MIMO system. *J Lightwave Technol* 2019;37(2):606–11.
- [154] Jia S, Lo MC, Zhang L, Ozolins O, Udalcovs A, Kong D, et al. Integrated dual-DFB laser for 408 GHz carrier generation enabling 131 Gbit/s wireless transmission over 10.7 meters. In: *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2019*; 2019 Mar 3–7; San Diego, CA, USA; 2019.
- [155] Nagatsuma T, Sonoda M, Higashimoto T, Yi L, Hesler J. 12.5 Gbit/s wireless link at 720 GHz based on photonics. In: *Proceedings of IEEE 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*; 2019 Sep 1–6; Paris, France; 2019.
- [156] Li X, Yu J, Zhao L, Wang K, Wang C, Zhao M, et al. 1 Tb/s millimeter-wave signal wireless delivery at D-band. *J Lightwave Technol* 2019;37(1):196–204.
- [157] Jia S, Zhang L, Wang S, Li W, Qiao M, Lu Z, et al. 2×300 Gbit/s line rate PS-64QAM-OFDM THz photonic-wireless transmission. *J Lightwave Technol* 2020;38(17):4715–21.
- [158] Harter T, Füllner C, Kemal JN, Ummethala S, Steinmann JL, Brosi M, et al. Generalized Kramers-Kronig receiver for coherent terahertz communications. *Nat Photonics* 2020;14(10):601–6.
- [159] Horst Y, Blatter T, Kulmer L, Bitachon BI, Baeuerle B, Destraz M, et al. Transparent optical-THz-optical link transmission over 5/115 m at 240/190 Gbit/s enabled by plasmonics. In: *Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*; 2021 Jun 6–10; San Francisco, CA, USA; 2021.
- [160] Yi X, Wang C, Hu Z, Holloway JW, Khan MIW, Ibrahim MI, et al. Emerging terahertz integrated systems in silicon. *IEEE Trans Circuits Syst I Regul Pap* 2021;68(9):3537–50.
- [161] Sarrieddeen H, Alouini MS, Al-Naffouri TY. An overview of signal processing techniques for terahertz communications. *Proc IEEE* 2021;109(10):1628–65.
- [162] Dhillon SS, Vitiello MS, Linfield EH, Davies AG, Hoffmann MC, Booske J, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap. *J Phys D* 2017;50(4):043001.
- [163] Yazgan A, Jofre L, Romeu J. The state of art of terahertz sources: a communication perspective at a glance. In: *Proceedings of 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*; 2017 Jul 5–7; Barcelona, Spain; 2017.
- [164] Tan DKP, He J, Li Y, Bayesteh A, Chen Y, Zhu P, et al. Integrated sensing and communication in 6G: motivations, use cases, requirements, challenges and future directions. In: *Proceedings of 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S)*; 2021 Feb 23–24; Dresden, Germany; 2021.
- [165] Chiriyath AR, Paul B, Bliss DW. Radar-communications convergence: coexistence, cooperation, and co-design. *IEEE Trans Cognit Commun Netw* 2017;3(1):1–12.
- [166] Rahman ML, Zhang JA, Huang X, Guo YJ, Heath RW. Framework for a perceptive mobile network using joint communication and radar sensing. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst* 2020;56(3):1926–41.
- [167] Bozorgi F, Sen P, Barreto AN, Fettweis G. RF front-end challenges for joint communication and radar sensing. In: *Proceedings of 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S)*; 2021 Feb 23–24; Dresden, Germany; 2021.
- [168] Wild T, Braun V, Viswanathan H. Joint design of communication and sensing for beyond 5G and 6G systems. *IEEE Access* 2002;9:30845–57.