

# 太赫兹通信感知一体化波形：现状与展望

尉志青, 冯志勇, 李怡恒, 马昊, 贾锦竹

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 面向 6G 时代机器通信、沉浸式业务对高精度感知与高速率通信的需求, 通信感知一体化技术应运而生。基于此, 针对太赫兹通信感知一体化波形的场景、波形设计方法和未来展望进行了阐述和总结。首先, 概括了太赫兹通信感知一体化波形设计所面临的场景与需求, 包括感知辅助通信场景、感知催生的新业务场景等。然后, 从太赫兹电磁波的传播特点、太赫兹器件的特点、通信与感知对波形的要求等方面, 分析了太赫兹通信感知一体化波形的特点, 综述了太赫兹通信感知一体化波形的研究现状。最后, 指出了太赫兹通信感知一体化波形的未来研究方向。

**关键词:** 太赫兹; 通信感知一体化; 波形设计

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2022007

## Terahertz joint communication and sensing waveform: status and prospect

WEI Zhiqing, FENG Zhiyong, LI Yiheng, MA Hao, JIA Jinzhu

Key Laboratory of Universal Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract:** To meet the requirements of machine communication and immersive service in the 6G era for high precision perception and high speed communication, communication perception integration technology emerges at the right moment. Based on this, the scenarios, waveform design methods and future prospects of terahertz communication perception integrated waveform were described and summarized. First of all, the scenarios and requirements of terahertz integrated waveform design were summarized, including perception-assisted communication scenarios, new business scenarios generated by perception, etc. Then, from the propagation characteristics of terahertz electromagnetic wave, the characteristics of terahertz devices, and the requirements of communication and perception on waveform, the characteristics of terahertz communication and perception integrated waveform were analyzed, and the research status of terahertz communication integrated waveform was summarized. Finally, the future research direction of terahertz synesthesia integrated waveform was pointed out.

**Keywords:** terahertz, joint communication and sensing, waveform design

### 0 引言

频段范围为 0.1~10 THz 的电磁波被称为太赫兹电磁波<sup>[1]</sup>。太赫兹电磁波由于具备穿透性、低能性、瞬态性、“指纹”谱、宽带性等特点<sup>[1]</sup>, 被视作

6G 的潜在频段, 获得了学术界和产业界的广泛关注<sup>[2]</sup>。各频段电磁波承载的业务如图 1 所示。太赫兹电磁波具备超大带宽超低时延通信的能力, 在自动驾驶等场景将获得广泛的应用; 太赫兹波长短, 太赫兹器件具备小型化潜力, 在物联网等场景有应

收稿日期: 2021-10-27; 修回日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U21B2014); 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2020YFA0711302)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.U21B2014), The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFA0711302)

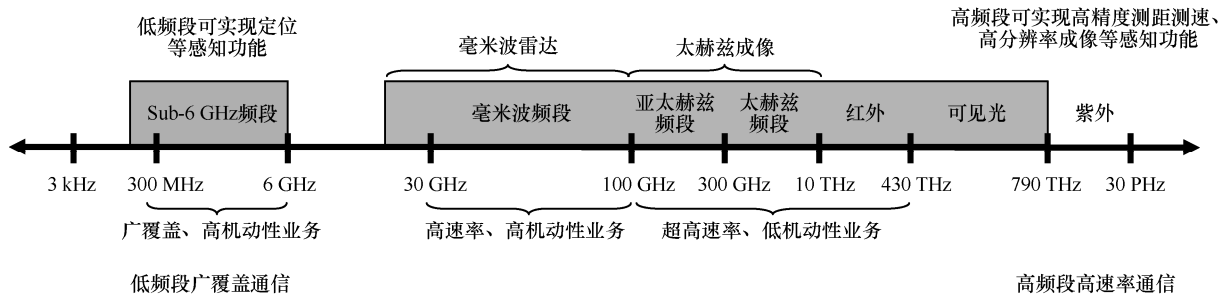


图 1 各频段电磁波承载的业务

用潜力；太赫兹带宽较大，结合超大规模天线，将获得极高的距离、速度和角度分辨率，在感知方面具备较大的潜力，可以广泛应用于机器通信、数字孪生、沉浸式业务等方面。

IMT 2030(6G)推进组将通信感知一体化技术视作未来 6G 的潜在技术之一<sup>[3]</sup>。与目前的移动通信系统相比，通信感知一体化技术有望同时实现高精度感知与高速率通信<sup>[4]</sup>。这将极大推动未来 6G 时代机器通信、沉浸式业务等的发展。而太赫兹电磁波由于具备大带宽通信和高精度感知的能力，是通信感知一体化技术最有潜力应用的频段之一，因此太赫兹通信感知一体化技术获得了广泛的关注。

在太赫兹通信感知一体化技术的研究中，通信感知一体化波形设计至关重要。通信感知一体化波形的研究面临如下挑战：1) 通信感知一体化技术的应用场景是多样的，不同场景对感知与通信的性能需求具有较大差异，因此，需要设计面向多样化场景的灵活可重构通信感知一体化波形；2) 通信信号的随机性与感知信号所需要的强自相关性存在矛盾，一体化波形设计需要权衡两者的性能；3) 通信感知一体化信号设计需要与数据链路层、网络层调度相匹配，需要考虑到多节点的组网能力。

面向太赫兹通信感知一体化的需求和研究挑战，本文综述了太赫兹通信感知一体化技术的应用场景、波形设计方法，并展望了未来太赫兹通信感知一体化技术的研究方向。

## 1 场景与需求

太赫兹结合超大规模天线，一方面提供了极高的传输速率和频谱效率，另一方面超窄波束成形也给波束对准和跟踪带来极大的挑战。太赫兹通信感知一体化技术有望通过感知信息的辅助降低波束

训练的复杂度，提高通信性能。此外，太赫兹通信感知一体化技术有助于催生一些新的业务应用，并降低设备的体积和功耗，提高设备的成本效率。太赫兹通信感知一体化具备如下优势。

1) 感知辅助通信性能提升。对于高度移动的太赫兹通信环境，波束对准与跟踪的难度极大，而感知信息可以加快波束对准与跟踪的速度<sup>[5]</sup>；精准态势感知也可用于对通信资源进行预测性分配；太赫兹通信感知一体化的本质是感知和通信功能的动态频谱共享，在足够大的太赫兹带宽的基础上可提高频谱效率。

2) 催生新业务场景。机器通信、沉浸式业务等需要物理空间与数字空间的高度统一，该类业务同时需要在物理空间的感知和数字空间的通信<sup>[6]</sup>。太赫兹通信感知一体化技术可以服务于这些业务，能够同时提供即时高分辨率感知以及高数据速率的通信，加速这些新业务的落地实施。

3) 提高成本效率。通信与感知功能通过复用硬件，可降低设备成本<sup>[7]</sup>，促进设备的快速推广。

因此，太赫兹通信感知一体化有丰富的场景与技术需求，亟须进行深入的研究。下文针对其中的基础性技术，即太赫兹通信感知一体化波形设计进行综述。

## 2 太赫兹通信感知一体化波形设计

频段的宽度在很大程度上决定了数据的传输速度，信道宽度越宽，数据传输速率越快。与毫米波和 Wi-Fi 频段相比，太赫兹频段具有更大带宽、更窄波束，具有更优秀的传输能力和更好的方向性。太赫兹通信感知一体化波形设计的目标是同时实现环境中的目标感知和信息传输<sup>[8]</sup>，从而实现高数据传输速率和高精度感知<sup>[9]</sup>。感知信号通常是一些高发射功率的脉冲信号或周期连续波信号，接收端仅需要简单的信号处理；但是通信信号通常是一

些随机的调制信号，接收端的复杂度高<sup>[3]</sup>。因此设计一体化波形时，需要权衡两者的性能，根据不同的需求对调制方式、发射功率、带宽等进行自适应调整<sup>[10]</sup>。

## 2.1 基于通信波形的太赫兹通信感知一体化波形

太赫兹通信感知一体化技术有利于实现感知和通信的相互促进，具有广阔的应用前景<sup>[11]</sup>。但太赫兹的频段较高，会带来较大的路径损耗，更适用于短距通信感知一体化场景。在基于通信波形的太赫兹通信感知一体化波形的设计中，峰值平均功率比（PAPR, peak to average power ratio）将是设计过程中考虑的重点。

基于通信波形的太赫兹一体化波形有许多可能的选择，并对射频子系统的实施具有深远的影响。总体来看，需要考虑的因素包含功率放大器（PA, power amplifier）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<sup>[12]</sup>。在 PA 补偿方面，波形所产生的时域信号动态范围直接影响功率放大器的性能及其最大输出功率的工作范围；振荡器所产生的输出频率不稳定导致的相位噪声现象会导致发射和接收信号的相位随时间变化，由此产生的相位噪声不容小觑<sup>[13]</sup>；同样地，对于太赫兹范围内的载波频率，子载波间隔和循环前缀长度的选择对整体系统的设计至关重要<sup>[14]</sup>。下面将从基于通信波形的太赫兹通信感知一体化波形在单载波和多载波 2 个分类下进行描述。

### 2.1.1 单载波波形

单载波比多载波具有更小的功率放大器回退，单载波波形具有 PAPR 较低、节能、实施简单、可延长用户设备的电池寿命、适用于小范围覆盖场景等优点<sup>[15]</sup>。二进制相移键控（BPSK, binary phase-shift keying）、正交相移键控（QPSK, quadrature phase-shift keying）、M 进制正交幅度调制（MQAM, multiple quadrature amplitude modulation）等调制方式在通信波形中经常被采用。总之，基于通信波形的太赫兹一体化波形在单载波方面有以下几种波形。

1) 单载波频域均衡（SC-FDE, single carrier frequency domain equalization）波形

SC-FDE 波形是简单的基于时域的调制信号<sup>[16]</sup>。与基于正交频分复用（OFDM, orthogonal frequency division multiplexing）的一体化波形相比，SC-FDE 波形降低了 PAPR，瞬时功率更稳定，提高了系统

对功率放大器引入的非线性稳健性，同时可以抵抗频率偏移<sup>[17]</sup>。当系统发送复杂信号时，利用 SC-FDE 可以简单发送 PSK 或 QAM 调制信号，因此，发射机可实现极大简化，不需要多余的模数转换器<sup>[18]</sup>。

2) 离散傅里叶变换扩频正交频分复用（DFT-s-OFDM, discrete fourier transform-spread orthogonal frequency division multiplexing）波形

DFT-s-OFDM 波形中，数据符号利用 DFT 块进行扩展，然后映射到 IDFT 块的输入<sup>[19-20]</sup>。为了避免由于信道的多径而引起的符号间干扰（ISI, intersymbol interference），并且允许在接收机处进行频域均衡，循环前缀（CP, cyclic prefix）会被预先设置到符号的开头。通过改变 DFT 扩展块的大小，能够合成具有不同带宽的基于块的单载波波形。当使用多个 DFT 扩展块时，可以允许在基于块的多载波和单载波方案之间进行转换。文献[21]证明 DFT-s-OFDM 波形还可以包含内部保护周期，该保护周期在不影响符号持续时间的情况下提供保护周期的持续时间的灵活性。

与基于 OFDM 的一体化波形相比，基于 DFT-s-OFDM 的一体化波形 PAPR 较低、实施简单，同时保留了 OFDM 的主要优点，即允许在接收机处使用多用户联合处理的频分多址（FDMA, frequency division multiple access）和频域均衡，同时降低每个用户的 PAPR，因此获得更大的覆盖范围<sup>[22]</sup>。同时也可将基于 DFT-s-OFDM 一体化技术与多输入多输出（MIMO, multi-input multi-output）相结合<sup>[23]</sup>，在多接收天线的条件下，可以获得较好的传输性能。然而，对于使用 QAM 调制下低调制阶数的情况，此方案仍会表现出较高的 PAPR。考虑到 5G 和 6G 的极高数据速率要求，尤其是在高阶调制不适用的情况下，如何保持基于 DFT-s-OFDM 一体化波形的低 PAPR 并提高其频谱效率是波形设计的难点。

### 2.1.2 多载波波形

多载波波形的 PAPR 值比较高，因此在波形设计时经常需要辅以降低 PAPR 的波形优化算法。例如，新增多载波距离感知（DMAC, distance-aware multi-carrier）调制方式，可以利用与距离和频率有关的传输窗口，并提供自适应的超广域利用太赫兹波段的带宽<sup>[24]</sup>。多载波波形主要包括循环前缀正交频分复用（CP-OFDM, cyclic prefix orthogonal frequency division multiplexing）和滤波器组多载波

(FBMC, filter bank multi-carrier) 2 种。

### 1) CP-OFDM 波形

OFDM 波形不受高频率选择性太赫兹信道的影响, 有较高的频谱利用率和较低的计算复杂度, 并且可以在频域内对子载波进行编码和交织, 使 OFDM 系统在面对突发错误时有较强的稳定性<sup>[25]</sup>。而 CP-OFDM 在 OFDM 波形的基础上加入了循环前缀 CP, 插入了 CP 后有较高的频谱效率, 能够抵抗多径效应, 被广泛应用于许多通信标准, 诸如 LTE、5G NR 和 IEEE 802.11 系统<sup>[26]</sup>。采用 CP-OFDM 技术的通信感知一体化信号中各子载波具有良好的正交性, 同时其子载波的数量与频率间隔可灵活调整, 理想情况可以得到“图钉形”的模糊函数, 改善距离-多普勒的模糊性, 可满足对通信传输效率较高要求下的高性能感知。但是 CP-OFDM 的 PAPR 较高, 对于功率受限的太赫兹系统具有挑战性。因此需要设计降低 PAPR 的算法, 但同时也增加了计算复杂度, 在波形设计中需要权衡复杂度与波形的性能。

### 2) FBMC 波形

FBMC 波形的特点是没有循环前缀。因此, 通过避免 CP 开销, FBMC 波形可以具备更高的传输效率。FBMC 波形在发射端和接收端添加滤波器来处理相邻多载波符号之间的重叠, 使子载波不需要保持正交性, 带外频谱衰减快, 降低了子载波间的干扰<sup>[25]</sup>。FBMC 波形由于滤波器组的存在具有较好的时延分辨率, 同时滤波器组的存在保证 FBMC 波形不存在多普勒旁瓣, 提高测速的准确性。但多普勒频移分辨率受到滤波器组的影响, 在设计时需要进行优化<sup>[27]</sup>。

### 3) OTFS 波形

正交时频空 (OTFS, orthogonal time frequency space) 波形是面向高速移动场景下的一体化波形设计方案, 通常应用于 V2X (vehicle-to-everything) 通信, 它通过将信道映射到时延-多普勒域对抗高多普勒频移对信号的影响, 同时 OTFS 波形可以满足高吞吐量、高数据速率、低时延的通信需求<sup>[28]</sup>。作为一种频谱高效的波形设计方案, 相比于 CP-OFDM, OTFS 一个帧结构中只需要加入一个 CP<sup>[28]</sup>。

OTFS 波形的 PAPR 和参与 OTFS 调制的符号个数有关, 可以通过对符号个数的调整优化波形的 PAPR, 与 CP-OFDM 相比降低了 PAPR<sup>[29]</sup>。OTFS 波形的 PAPR、复杂度、解码时延、误码率 (BER, bit

error rate) 与每帧中 OTFS 符号数成正相关, 因此需要在 PAPR、复杂度、解码时延和 BER 之间权衡, 针对不同场景选择每帧中最优的 OTFS 符号数<sup>[30]</sup>。

从 sub-6G 到 THz 频段, 多普勒频移随之显著提高, 高多普勒频移不仅对 CP-OFDM 波形的同步产生影响, 而且容易破坏子载波之间的正交性。OTFS 在时延-多普勒域的信道提升了波形对多普勒频移的容忍性, 这对 THz 下的通信感知一体化波形设计具有重要意义<sup>[31]</sup>。

## 2.2 基于感知波形的太赫兹通信感知一体化波形

目前, 学术界对太赫兹通信感知一体化波形的研究较少, 绝大多数太赫兹感知波形均围绕调频连续波 (FMCW, frequency-modulated continuous wave) 展开研究。感知波形相较于通信波形 PAPR 较低<sup>[32]</sup>, 因此设计复杂度低。基于感知波形的太赫兹通信感知一体化波形设计通过对感知波形调制通信信息来完成通信功能<sup>[33]</sup>。

调频连续波雷达发射功率低, 容易实现高距离分辨率, 且不存在距离盲区, 由于太赫兹具有大带宽特性, 利用 FMCW 波形的太赫兹雷达具有极高的距离分辨率, 且具有一定的透视性, 应用前景广泛<sup>[34]</sup>。国内外许多研究机构都在对利用 FMCW 波形的太赫兹雷达展开深入研究。实际上, 绝大多数太赫兹雷达采用 FMCW 波形<sup>[35-39]</sup>来实现目标测距。

在太赫兹雷达波形的设计和优化中, 大量的文献研究补偿波形中的非线性相位误差<sup>[35,40-41]</sup>。例如, 根据校准器的回波进行相位补偿<sup>[41]</sup>, 使用直接数字波形合成技术进行预失真补偿<sup>[42]</sup>; 在波形设计方面, 太赫兹 FMCW 雷达波形广泛采用锯齿波与三角波的结合或者梯形波与三角波的结合<sup>[43]</sup>。锯齿波容易产生较严重的距离-速度耦合问题, 三角波在多目标检测时容易产生虚假目标, 而梯形波与三角波的结合可以解决上述问题<sup>[43]</sup>。FMCW 体制的太赫兹雷达具备工作稳定、成本低等优点, 是太赫兹雷达的主要波形。

FMCW 信号时带宽积较大, 且 PAPR 较低。此外, 相较于微波频段的 FMCW 波形, 太赫兹频段的 FMCW 波形具有更高的距离分辨率, 感知性能更高。因此, 在基于感知波形的太赫兹通信感知一体化波形设计方向, 可以优先考虑 FMCW 波形。

## 2.3 通感融合的太赫兹通信感知一体化波形

太赫兹通信感知一体化波形的设计需要综合考虑太赫兹电磁波的传播特点、太赫兹器件的特

点、通信与感知对波形的要求等因素，以此来评估并选择通信感知一体化波形方案。

文献[44]分析了几种通信感知一体化波形，包括 FMCW 信号和 OFDM 信号及其单边带谱信号在太赫兹一体化条件下的性能。OFDM 信号被广泛用于 4G 和 5G 系统中，但是其较高的 PAPR 会降低发射机的能效。6G 预计将包括超过 100 GHz 的高载波频段，即亚太赫兹频率范围<sup>[45]</sup>，在这些频段中功率放大器功率效率低，输出功率有限，更加需要解决 PAPR 问题。传统的 FMCW 信号也具有很低的 PAPR，同样可以作为太赫兹一体化信号的候选波形。FMCW 雷达在太赫兹频段的优势在于其较宽的频率摆幅范围<sup>[46]</sup>，比微波频段的 FMCW 雷达具有更好的距离分辨率<sup>[47]</sup>。但是 FMCW 波形在通信方面的数据速率较低，随机性较差，导致信号处理难度较 OFDM 波形更大。半周期单载波波形 SC-OFDM 在 OFDM 上添加了 DFT 扩展，适用于 NR Rel-16 中定义的 52.6 GHz 高频段<sup>[48]</sup>。单载波频域均衡技术可以降低其 PAPR，这是 SC-OFDM 之外另一个具有低 PAPR 的波形变体方案<sup>[49]</sup>。

波形可以分为单载波波形和多载波波形。FMCW 和 OFDM 在进行雷达信号处理时，基于多载波技术和二维傅里叶变换<sup>[50]</sup>可以获得时延或多普勒信息，进而实现对目标节点的感知。但单载波波形只能使用基于相关的接收处理，此时时延和多普勒不能通过相关处理解耦，增加了雷达信号处理的复杂度。短程雷达要求在同一频率上发射和接收，而 OFDM 和单载波信号<sup>[51]</sup>都是时分双工（TDD, time-division duplex）或频分双工（FDD, frequency-division duplex）体制，不会以相同的频率同时发射和接收，这就产生了大量需要处理的自干扰。立足于移动通信系统，通信感知一体化波形优先选择 OFDM，而较高的 PAPR 是 OFDM 存在的问题，因此波形优化必不可少。此外，单载波波形可能也适合用来设计太赫兹通信感知一体化波形<sup>[44]</sup>。太赫兹波段进行波形一体化设计还需考虑信道的稀疏性和时延扩展引起的大相干带宽和时间展宽效应等特点<sup>[52]</sup>。

文献[52]对比了 OFDM 和 FMCW-SC 一体化信号的性能，发现二者具有相似的测距性能，但 OFDM 信号的距离分辨率较差，且旁瓣幅度值较大，因此较 FMCW-SC 波形具有更高的 PAPR，不利于目标感知。因为当噪声过大时，主瓣有可能会

被较高幅度的旁瓣淹没。且波束宽度更宽，不利于方位角的测量，会带来较大的测角误差。考虑到不同场景对感知的性能要求，基于 FMCW-SC 的太赫兹通信感知一体化波形更具优势<sup>[53]</sup>。然而，该信号体制与目前移动通信的信号体制差异较大。在太赫兹测距和成像领域，使用 FMCW 波形进行通信时，信号的非线性会导致模糊和离焦现象，影响感知性能<sup>[22,54]</sup>。

综上所述，太赫兹通信感知一体化波形的设计需要综合考虑场景需求和不同波形体制在通信与感知方面的性能。在空间通信场景，利用基于 OFDM 的太赫兹一体化技术进行无损传输，用较小发射功率实现远距离通信任务，并获取相应的感知性能。为保证通信性能，可考虑使用 OFDM 波形进行太赫兹一体化信号的设计。对于室内场景，为实现成像级别的定位精度，可使用 FMCW-SC 实现太赫兹一体化波形的设计。

### 3 未来展望

#### 3.1 太赫兹通信感知一体化波形设计

OFDM 仍然是移动通信系统的主流信号体制。与现有移动通信系统更兼容的 OFDM 在通信感知一体化波形设计方面具有广阔的应用前景，然而，该方案需要进行波形优化，以提升感知性能。其中加窗 OFDM 采用具有平滑边缘的非矩形脉冲形状来改善 OFDM 波的频谱形状，具有相对较低的带外泄露<sup>[55]</sup>，为了进一步克服太赫兹多载波波形的高峰均功率比，还可以采用选择性映射、部分传输序列和选择合适码本<sup>[56]</sup>等方法进行波形优化。

关于调制方法，太赫兹调制方法优先选择低包络变化调制。 $\pi/4$  QPSK、 $\pi/4$  BPSK 是一种低包络变化的信号调制方法，低阶调制在大带宽太赫兹通信中受到更多关注<sup>[57]</sup>。在相位噪声抑制方面，太赫兹频段的相位噪声可能会给传输带来不利影响<sup>[56]</sup>，降低相位噪声影响的调制方案是十分必要的。振幅移相键控属于线性调制，它的星座点被限制在一组同心环上，对非线性失真的敏感度较低<sup>[58]</sup>。

在面向 6G 的通信感知一体化设计中，基于移动通信信号实现感知功能的同时，通信仍为首要任务。为保证通信功能不受影响，未来基于收发分离的感知系统设计将会取得广泛应用。使用不同天线阵列分别进行感知与通信信号的接收与处理，以此获取通信和感知功能的同时优化。在感知性能提升

方面, 将太赫兹雷达波形 FMCW 与 OFDM 进行结合是一个可行的研究方向。FMCW 信号时带宽积较大, 有助于提升感知性能; OFDM 频谱效率较高, 有助于提升通信性能, 而两者的结合可以联合提升通信与感知的性能<sup>[59]</sup>。

### 3.2 结合超大规模天线阵列的波形优化

为了增加通信距离, 太赫兹需要结合超大规模阵列天线技术, 以满足实际移动通信系统的覆盖需求。但是超大规模天线需要超窄波束成形, 超窄波束成形一方面提升了感知的角度分辨率性能, 另一方面提高了波束训练的开销。因此, 可以将感知信息和波束训练相结合, 以加快波束对准与跟踪<sup>[60]</sup>, 提升通信性能。在太赫兹波段, 利用超大规模天线形成感知与通信多功能波束, 通过分配 OFDM 时频资源和波束资源, 可以根据任务的不同, 灵活优化时频空资源, 从而实现面向任务的波形优化。

## 4 结束语

本文从场景、波形设计方法、未来展望的角度总结了太赫兹通信感知一体化波形的研究。首先, 本文概括了太赫兹一体化波形设计所面临的场景与需求, 包括感知辅助通信场景、感知催生的新业务场景等。然后, 本文从体现通信与感知功能的太赫兹通信感知一体化波形入手, 从太赫兹电磁波的传播特点、太赫兹器件的特点、通信与感知对波形的要求等方面, 分析了太赫兹通信感知一体化波形的特点, 综述了太赫兹通信感知一体化波形的研究现状。最后, 本文指出了太赫兹通信感知一体化波形的未来研究方向。

### 参考文献:

- [1] 中国联通. 中国联通太赫兹通信技术白皮书[R]. 2020. China Unicom. China Unicom terahertz communication technology white paper[R]. 2020.
- [2] INOMATA M, YAMADA W, KUNO N, et al. Scattering effect up to 100 GHz band for 6G[C]//Proceedings of 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 749-750.
- [3] RUFINO HENRIQUE P S, PRASAD R. The road for 6G multimedia applications[C]//Proceedings of 2020 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [4] IMT-2030(6G)推进组. 通信感知一体化技术研究报告[R]. 2021. IMT-2030(6G) Promotion Group. Research report of communication perception integration technology[R]. 2021.
- [5] CHACCOUR C, SOORKI M N, SAAD W, et al. Seven defining features of terahertz (THz) wireless systems: a fellowship of communication and sensing[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2102.07668, 2021.
- [6] WANG Z Q, HAN K F, JIANG J M, et al. Symbiotic sensing and communications towards 6G: vision, applications, and technology trends[C]//Proceedings of 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [7] NI R, LV Y, ZHU Q, et al. Electromagnetic field fingerprint method for circularly polarized OAM[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [8] WU Y Z, HAN C, CHEN Z. THz ISCI: terahertz integrated sensing, communication and intelligence[C]//Proceedings of 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-2.
- [9] WU Y Z, LEMIC F, HAN C, et al. Sensing integrated DFT-spread OFDM waveform and deep learning-powered receiver design for terahertz integrated sensing and communication systems[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2109.14918, 2021.
- [10] CHEN Z, HAN C, WU Y Z, et al. Terahertz wireless communications for 2030 and beyond: a cutting-edge frontier[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(11): 66-72.
- [11] 李玲香, 谢郁馨, 陈智, 等. 面向 6G 的太赫兹通信感知一体化[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 698-705. LI L X, XIE Y X, CHEN Z, et al. Integrated communication and sensing technologies at THz for 6G[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(6): 698-705.
- [12] FORMICONE G, BURGER J, CUSTER J, et al. A study for achieving high power and efficiency based on high bias operation in C- and X-band GaN power amplifiers[C]//Proceedings of 2018 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 39-42.
- [13] CORDERO A, RUIZ M N, VEGAS D, et al. Outphasing class-E/F<sub>2</sub> power amplifier using a quadrature hybrid as non-isolating combiner[C]//Proceedings of 2021 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-4.
- [14] JANG K, KIM D, AN C, et al. Window processing of SSB CP-OFDM system for the OOB spectrum reduction[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [15] SINOP H, YAŞAR S, TUNA E B, et al. Comparison of single carrier and multi carrier communication systems over large intelligent reflecting surfaces[C]//Proceedings of 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-4.
- [16] LIU J, LIU W J, HOU X L, et al. Non-orthogonal waveform (NOW) for 5G evolution and 6G[C]//Proceedings of 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [17] QIAO Y J, LI J, HE B, et al. A novel signal detection scheme based on adaptive ensemble deep learning algorithm in SC-FDE systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 123514-123523.
- [18] PARK H S. Phase noise compensation method in sub-THz SC-FDE systems[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1428-1430.

- [19] LEE D, DAVYDOV A, MONDAL B, et al. From sub-terahertz to terahertz: challenges and design considerations[C]//Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-8.
- [20] HUQ K M S, BUSARI S A, RODRIGUEZ J, et al. Terahertz-enabled wireless system for beyond-5G ultra-fast networks: a brief survey[J]. IEEE Network, 2019, 33(4): 89-95.
- [21] BERARDINELLI G. Generalized DFT-s-OFDM waveforms without cyclic prefix[J]. IEEE Access, 2018, 6: 4677-4689.
- [22] HA Y, NIU W Q, CHI N. Post equalization scheme based on deep neural network for a probabilistic shaping 128 QAM DFT-S OFDM signal in underwater visible light communication system[C]//Proceedings of 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [23] SHI M, WANG F M, ZHANG M J, et al. PAPR reduction of 2.0 Gbit/s DFT-S OFDM modulated visible light communication system based on interleaved sub-banding technique[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 337-342.
- [24] HAN C, AKYILDIZ I F. Distance-aware multi-carrier (DAMC) modulation in terahertz band communication[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2014: 5461-5467.
- [25] SCHRAM V, WU Y F, KOLLESHI M, et al. Comparison of transmission concepts for indoor THz communication systems[C]//Proceedings of 2020 Third International Workshop on Mobile Terahertz Systems (IWMTS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [26] YUAN H, YANG N, YANG K, et al. Hybrid beamforming for terahertz multi-carrier systems over frequency selective fading[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(10): 6186-6199.
- [27] CAO W, ZHU J H, LI X T, et al. Feasibility of multi-carrier modulation signals as new illuminators of opportunity for passive radar: orthogonal frequency division multiplexing versus filter-bank multi-carrier[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(6): 1080-1087.
- [28] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation[C]//Proceedings of 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [29] SUVRA S D, RAMJEE P. OTFS: orthogonal time frequency space modulation a waveform for 6G[M]. [S.l.]: River Publishers, 2021: 191-194.
- [30] TARBOUSH S, SARIEDDEENET H, ALOUINI M S, et al. Single-versus multi-carrier terahertz-band communications: a comparative study[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2111.07398, 2021.
- [31] JI H, KIM Y, KIM T, et al. Compressed OTFS transmission over millimeter-wave and terahertz spectrum[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [32] HYUN E, JIN Y S, LEE J H. Moving and stationary target detection scheme using coherent integration and subtraction for automotive FMCW radar systems[C]//Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference (Radar Conf). Piscataway: IEEE Press, 2017: 476-481.
- [33] ALI A, GONZALEZ-PRELCIC N, HEATH R W, et al. Leveraging sensing at the infrastructure for mmWave communication[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(7): 84-89.
- [34] HAMIDI S, SAFAVI-NAEINI S. Single channel mmWave FMCW radar for 2D target localization[C]//Proceedings of 2021 IEEE 19th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-2.
- [35] JIANG Y W, DENG B, WANG H Q, et al. An effective nonlinear phase compensation method for FMCW terahertz radar[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(15): 1684-1687.
- [36] YANG Q, WANG H Q, DENG B, et al. High resolution ISAR imaging of targets with complex motions in the terahertz region[C]//Proceedings of 2019 12th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [37] STATNIKOV K, ÖJEFORS E, GRZYB J, et al. A 0.32 THz FMCW radar system based on low-cost lens-integrated SiGe HBT front-ends[C]//Proceedings of the ESSCIRC (ESSCIRC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 81-84.
- [38] COOPER K B, CHATTOPADHYAY G. Submillimeter-wave radar: solid-state system design and applications[J]. IEEE Microwave Magazine, 2014, 15(7): 51-67.
- [39] HOMMES A, SHOYKHETBROD A, POHL N. A fast tracking 60 GHz radar using a frequency scanning antenna[C]//Proceedings of 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-2.
- [40] COOPER K B, DENGLER R J, LLOMBART N, et al. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 169-182.
- [41] 章航垵. 基于光子学的太赫兹线性调频脉冲产生[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- ZHANG H K. Generation of THz linear frequency modulated pulse based on terahertz photonics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [42] 卢铮, 李超, 方广有. 调频连续波太赫兹雷达方案研究及系统验证[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 58-63.
- LU Z, LI C, FANG G Y. Scheme research and system verification of the terahertz LFMCW radar[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(8): 58-63.
- [43] 江锋, 李跃华, 刘国庆. 基于改进波形太赫兹雷达的多目标检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(6): 954-958.
- JIANG F, LI Y H, LIU G Q. Multi-target detection of terahertz radar based on improved waveform[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(6): 954-958.
- [44] WILD T, BRAUN V, VISWANATHAN H. Joint design of communication and sensing for beyond 5G and 6G systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 30845-30857.
- [45] BAUDUIN M, BOURDOUX A. Code diversity for range sidelobe attenuation in PMCW and OFDM radars[C]//Proceedings of 2021 IEEE Radar Conference (RadarConf21). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [46] FIGUEROA A, JORAM N, ELLINGER F. Automatic delay and phase mismatch calibration in FMCW MIMO radar[C]//Proceedings of 2020 17th Euro-pean Radar Conference (EuRAD). Piscataway: IEEE Press, 2021: 402-405.
- [47] AHARON AKRAM A, ROZBAN D, ABRAMOVICH A, et al. Terahertz frequency modulated continuous wave radar using glow discharge detector[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(23): 8440-8447.
- [48] GUNTURU A, TIJORIWALA V S, REDDY C A K. Optimal confi-

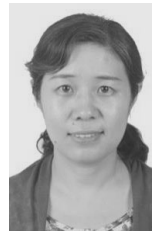
- gured grant selection method for NR rel-16 uplink URLLC[C]//Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [49] JAIN N, SHRIVASTAVA M, AGWEKAR A. PAPR and BER reduction of 5G MIMO systems based on modified SLM and DCT technique[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-4.
- [50] LIU X S, LI J F, LI J K, et al. Analysis of the single-FFT receiver for layered ACO-OFDM in visible light communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(17): 4757-4764.
- [51] SINGH S P, RAHKONEN T, LEINONEN M E, et al. A 290 GHz low noise amplifier operating above  $f_{\max}/2$  in 130 nm SiGe technology for sub-THz/THz receivers[C]//Proceedings of 2021 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2021: 223-226.
- [52] LI O P, HE J, ZENG K, et al. Integrated sensing and communication in 6G: a prototype of high resolution THz sensing on portable device[C]//Proceedings of 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). Piscataway: IEEE Press, 2021: 544-549.
- [53] ZHANG J A, RAHMAN M L, WU K, et al. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks-a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, PP(99): 1.
- [54] SHEN Y C, YANG X Y, ZHANG Z J. Broadband terahertz time-domain spectroscopy and fast FMCW imaging: principle and applications[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(7): 078705.
- [55] OHNO K. Performance improvement for windowed OFDM using pre-coding and sub-carriers interleaving[C]//Proceedings of 2021 Twelfth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 311-315.
- [56] FUJIYA Y, IZUKA N. PAPR reduction of transmitted signal using modified root roll-off filter[C]//Proceedings of 2021 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile. Piscataway: IEEE Press, 2021: 105-108.
- [57] STEFANOVA P, KLEIN A K, LEES R, et al. Optically controlled THz metamaterial modulators[C]//Proceedings of 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [58] HOBERG C, OCKELMANN T, BALZEROWSKI P, et al. Studying solvation by non-linear THz spectroscopy[C]//Proceedings of 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [59] WANG W Q. An orthogonal frequency division multiplexing radar waveform with a large time-bandwidth product[J]. Defence Science Journal, 2012, 62(6): 427-430.
- [60] LIU F, YUAN W J, MASOUIROS C, et al. Radar-assisted predictive beamforming for vehicular links: communication served by sensing[J].

IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7704-7719.

#### [作者简介]



尉志青 (1987- )，男，山西大同人，博士，北京邮电大学副教授、博士生导师，主要研究方向为面向智能机器的通信感知一体化技术。



冯志勇 (1971- )，女，山西大同人，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为无线网络架构设计及无线资源管理、通信感知一体化技术等。



李怡恒 (1997- )，女，河北衡水人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为通信感知一体化信号处理。



马昊 (1996- )，男，北京人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为无线通信网络技术、无线接入技术等。



贾锦竹 (1999- )，女，山西太原人，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为通信感知一体化信号设计。