

太赫兹技术发展及其应用于 6G 的挑战分析

Development and Challenges of Terahertz Technology for 6G Applications

刘利平 / LIU Liping^{1,2}, 菅梦楠 / JIAN Mengnan^{1,2}, 陈艺戩 / CHEN Yijian^{1,2}

(1. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518055;
2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)

(1. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China;
2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)



摘要: 作为 6G 潜在技术之一, 太赫兹技术对数据速率提升、超密集连接、低时延传输等具有积极作用。首先阐述了太赫兹技术的传播特性和信道建模方法。根据传播特性确定了大尺度、小尺度和微尺度 3 个维度的太赫兹应用场景。接着, 针对太赫兹特殊的频谱特性, 设计了物理层波形、调制编码、超大规模多输入多输出 (UM-MIMO), 以及媒体接入控制 (MAC) 层波束管理方案。最后, 关注了适用于太赫兹频段的智能超表面 (RIS) 技术, 探讨了 RIS 关键使能技术与方案设计。

关键词: 太赫兹; 传播模型; 应用场景; 基带处理; 智能超表面

Abstract: As one of the potential technologies for 6G system, terahertz technology facilitates data-rate improvement, ultra-dense connection and low-latency transmission. The propagation characteristics and channel modeling methods of terahertz band are studied in this paper. Based on the special spectrum characteristics of terahertz, three kinds of terahertz application scenarios including macro-scale, micro-scale and nano-scale are analyzed. Then, potential schemes to design physical layer waveform, modulation and coding, ultra-massive multiple-input multiple-output (UM-MIMO), and media access control (MAC) layer beam management in terahertz system schemes are given. Finally, the reconfigurable intelligent surface (RIS) technology is introduced which is applicable to the terahertz frequency. The key enabling technologies and solutions for RIS are discussed.

Keywords: terahertz; propagation model; application scenario; baseband signal processing; reconfigurable intelligent surface

DOI: 10.12142/ZTETJ.202102005

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210402.0959.004.html>

网络出版日期: 2021-04-02

收稿日期: 2021-02-25

在未来 6G 网络中, 增强现实、五感通信、万物互联等智能服务要求数据速率有千倍提升, 以实现低时延、高可靠、可扩展的无缝连接^[1]。作为 6G 潜在的基础技术, 太赫兹是指 100 GHz ~ 10 THz 的频段资源, 它被业界评为“改变未来世界的十大技术”之一^[2]。太赫兹具有连续可用的大带宽, 将有助于构建 6G 短距离、高速率的传输系统, 支持超高速率的数据传输, 满足超密集设备的连接需求, 增

强网络连接的可靠性, 并支撑高能效的终端网络^[3-4]。

2020 年, 国际电信联盟 (ITU) 启动 6G 研究工作。其中, 太赫兹技术发展及其在 6G 中的应用与挑战成为一个研究热点。此外, 美国联邦通信委员会 (FCC) 将对 95 GHz ~ 3 THz 进行为期 10 年的开放性测试; 欧盟制定了 Horizon 计划并已启动多项针对太赫兹频段的研究项目; 日韩等国也相继开展了对太赫兹器件和无线通信技术

的研究^[5]。太赫兹架构的设计和和相关硬件器件的研发是太赫兹技术发展的重点。由于缺乏有效的太赫兹波产生和检测技术, 目前业界对太赫兹的研究仍处于探索阶段。本文中, 我们针对太赫兹的传输特性、应用场景、基带处理和相关智能超表面 (RIS) 技术进行分析研究。

1 太赫兹传输特性

如图 1 所示, 太赫兹处于毫米波

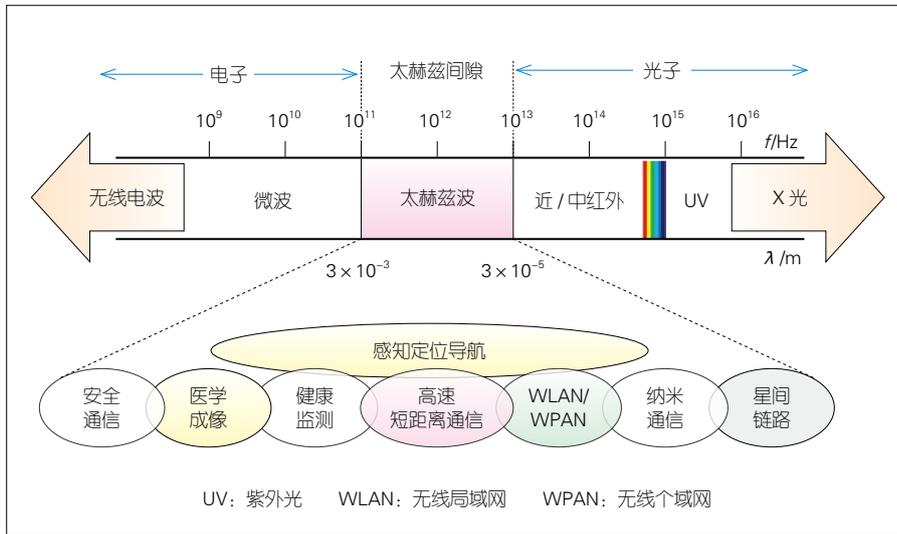
和红外光波之间，属于电子和光子的过渡区域。相比于毫米波，太赫兹具有频率更高、带宽更大、路径损耗大、分子吸收严重、漫散射丰富和波束极窄的特点。与毫米波存在宽带波束偏移现象不同，太赫兹存在波束宽带约束现象^[5]。

1.1 传播模型分析

频率的提高使传播路径损耗明显增大，室外通信在受到雨雾天气影响时也会带来额外损耗。此外，发射机功放功率低、低噪声放大器噪声系数高、高增益天线设计加工难度大等都极大地限制了太赫兹波的传输范围。太赫兹的典型应用场景是短距离通信。通过与多天线技术结合，太赫兹可借助极窄波束来克服路径衰落问题和扩展传播距离。

太赫兹的波长会引起分子吸收现象。这是因为太赫兹波长接近灰尘、雨、雪和大气中的气体分子尺寸，大气气体造成的共振会导致特定频段受到分子吸收的影响。在长距离的高频传输中，分子吸收损耗甚至会超过传播路径损耗。由于水蒸气衰减是分子吸收的主要原因之一，因此雨和云雾对太赫兹衰减的影响是不可忽略的。此外，对流层对太赫兹衰减的主要影响是折射效应^[6-7]。

太赫兹波段存在的噪声包括乘法器和混频器的热噪声、振荡器的相位噪声，以及由分子吸收产生的噪声等。由于各类分子的共振频率不同，噪声的功率谱密度会存在多个吸收峰值。分子吸收噪声仅在太赫兹信号传输时出现。我们可以利用这一性质来设计新型调制和信道编码。分子吸收效应导致多个路径损耗峰，这意味着会存在多个处于路径损耗峰之间的频谱窗口。表 1 分析了 0.1 ~ 1.03 THz 频段的频谱窗口及其对应的可用带宽^[3]。



▲ 图 1 基于块的混合编码框架

▼ 表 1 0.1 ~ 1.03 THz 频谱窗口及其对应的可用带宽

频谱范围 /THz	连续可用带宽 /GHz	频谱范围 /THz	连续可用带宽 /GHz
0.1 ~ 0.2	100	0.49 ~ 0.52	40
0.2 ~ 0.27	70	0.52 ~ 0.66	123
0.27 ~ 0.32	50	0.66 ~ 0.72	60
0.33 ~ 0.37	35	0.72 ~ 0.84	142
0.38 ~ 0.44	65	0.84 ~ 0.94	47
0.44 ~ 0.49	56	0.94 ~ 1.03	58

随着传播距离的增加，频谱窗口会变窄。为了获得更好的传输性能，短距离传输可以使用太赫兹，而长距离传输则采用中低频传输。针对不同频谱窗口，我们应当充分利用衰落平坦的频段来分段制定传输策略，并通过智能共享信道来实现对太赫兹大带宽、非连续频段的利用。

1.2 太赫兹信道建模

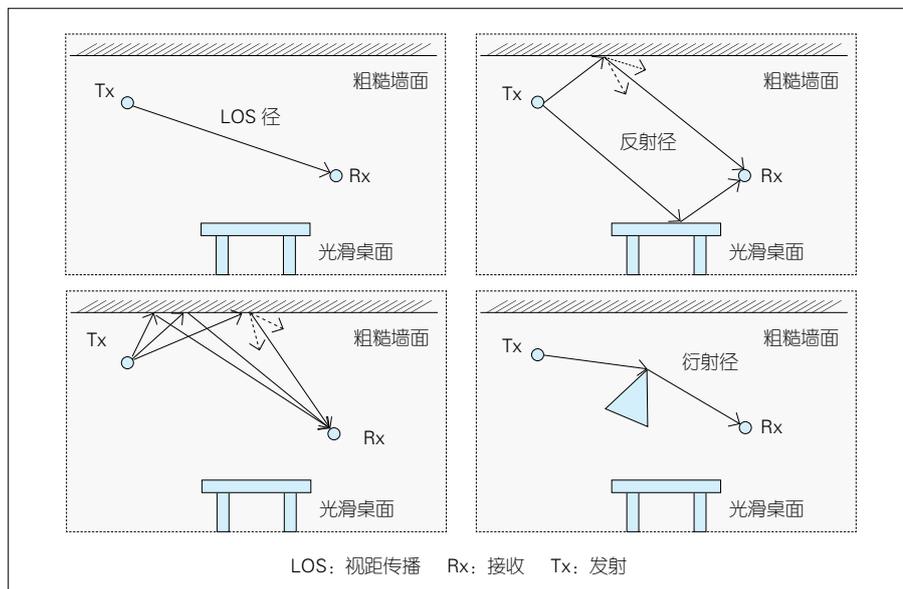
1.2.1 确定性信道模型

基于传播理论，确定性信道模型首先需要传播环境的详细几何信息，然后才可以准确地捕获电磁波传播以进行精确建模。

射线追踪（RT）方法利用了几何光学原理。太赫兹的极短波长使通过射线光学方法进行精确信道建模成为可能。太赫兹波在传播过程中容易受

到空间物体的阻挡，存在传播衰落和分子吸收问题。如图 2 所示，微粒特性使太赫兹波拥有多种传播路径：视距传播（LOS）、反射、漫散射和衍射等^[8-9]。与太赫兹入射波相比，低频下的光滑表面则呈现出粗糙的特点。漫反射径能量甚至超过镜面反射径能量。在散射测量中我们可以观察到反向散射波瓣。

时域有限差分（FDTD）方法能够借助数值方式来求解麦克斯韦方程，并且使用迭代方式来更新模拟区域。这种方法不仅可以很好地解决太赫兹中粗糙表面带来的复杂漫散射问题，还可以对小范围场景进行建模。然而，为了准确捕获太赫兹传播的几何特征，FDTD 方法除了需要应对极高的计算复杂度外，还需要确定材料特性，开发 3D RT 模拟器，分析时变特性等。



▲图 2 太赫兹传播路径分析

1.2.2 统计信道模型

统计信道建模方法通过随机分布对信道参数进行建模。常用的参数包括路径增益、到达方向、延迟、路径衰减和耦合等。该类方法借助经验信道测量的统计方式对太赫兹信道进行建模，避免了确定性信道建模的高计算复杂度。对此，一种广泛应用的处理方法为：用抽头延迟线公式来表征无线传输，并为路径参数（如到达角方向、到达时间和复路径增益）指定统计分布。统计信道建模需要满足时间展宽效应分析、群集行为建模、时空联合建模等要求。

1.2.3 混合信道模型

混合信道建模方法是确定性方法和统计方法的组合，旨在寻求准确性和复杂度之间的平衡。其中，随机分布和射线追踪混合方法（SSRTH）随机放置散射体，并使用 RT 技术对多径传播进行跟踪和建模，以构建基于几何的随机信道模型；RT-FDTD 混合方法使用 FDTD 来分析靠近复杂不连续点的区域，同时使用 RT 方法来跟

踪区域中不包含的射线，以解决 RT 方法在复杂不连续点区域中的不准确问题。如何实现在 FDTD 和 RT 方法之间的平稳转换并融合边界结果是当前亟待解决的问题。

2 太赫兹应用场景

未来 6G 网络中太赫兹系统的可能应用包括无线通信、认知、传感、成像、定位和导航等，如图 3 所示。本节将重点分析太赫兹技术在未来 6G 无线通信中的应用场景。

2.1 大尺度应用场景

太赫兹可应用于传输距离大于 100 m 的室外场景，包括回传 / 前传链路、太空应用、车载网络等。由于室外太赫兹传播容易受到水蒸气、雨、云雾等因素的影响，因此在设计时需要预留额外的链路增益。

超密集网络部署和多点传输协作驱动大容量无线回程链路的发展。因此，太赫兹无线回传应运而生。国际移动通信（IMT）2020 和下一代通信系统都要求前传链路的传输容量必须

远大于 10 Gbit/s，而太赫兹可以很好地满足这一要求。由于存在极高的传输损耗和器件限制，因此太赫兹在应用于室外回传 / 前传等时需要配备高增益指向性天线。

未来车与车、车与基础设施通信的大带宽连接，要求无人驾驶汽车具有实时信息服务和数据批量下载的能力。虽然太赫兹是支持车载网络通信的可靠技术，但它仍需要满足车辆调度、自主链路建立、区域间车辆控制切换、地图规划，以及太赫兹频谱的有效利用等需求。

为了满足空间通信网络的需求，我们可以使用太赫兹频谱资源以获得超高数据速率和较低能耗。将太赫兹应用于仅考虑自由空间损耗的卫星应用场景^[10]可以摆脱分子衰落等因素带来的衰减，并扩大可连续利用的频谱带宽。尽管如此，太赫兹目前仍然面临着高增益极窄定向波束难以对准的问题。

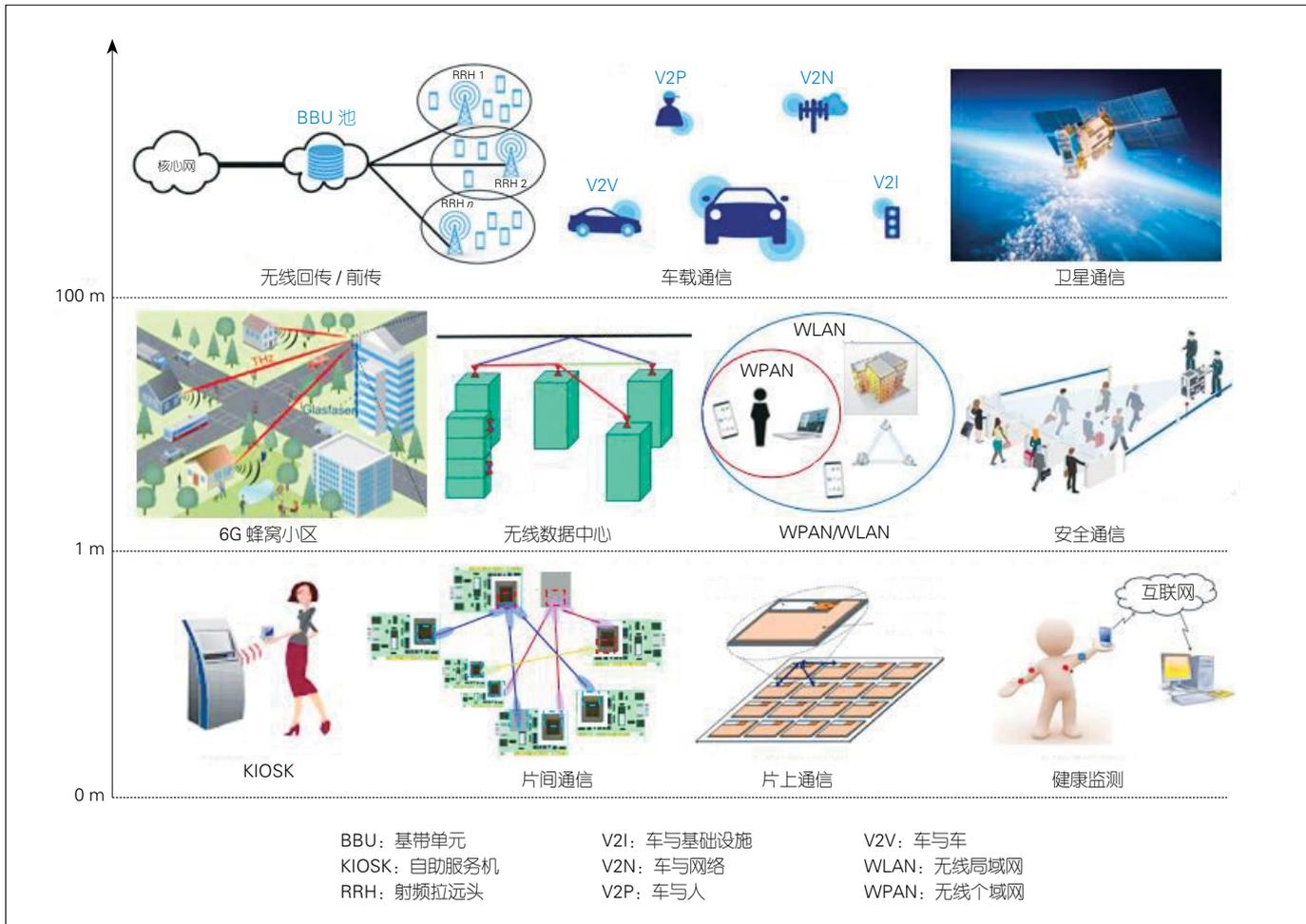
2.2 小尺度应用场景

小尺度应用场景是指太赫兹技术在 1 ~ 100 m 传播距离的应用场景。

太赫兹频段通信可用于 6G 蜂窝小区，在 10 m 的覆盖范围内能够提供超高速率的数据通信，并实现超高速有线网络与无线设备之间的无缝连接。此外，太赫兹还适用于室内和室外场景，可以支持静态和移动用户通信。

传统数据中心面临着复杂度、可靠性、功耗、维护成本、空间占用等多方面的挑战。引入无线太赫兹链路，并在数据中心内提供可重新配置的路由，可以增强系统的灵活性，并在不减少带宽的情况下降低布线成本。

太赫兹在实现超高速有线网络与个人无线设备之间的无缝高速互连时，能够提供太比特无线局域网（WLAN）、高清全息视频会议等服务^[11]。无线个



▲图 3 太赫兹应用场景分析

域网 (WPAN) 可以通过太赫兹建立附近设备间的太比特每秒链路, 在室内桌面等范围支持个人设备之间的超高速率数据传输。

在小尺度应用场景中, 太赫兹通信可以实现超宽带安全通信链路, 相关应用主要包括无人爆炸物探测、有毒气体检测、雷达通信和极窄波束防窃听等。

2.3 微尺度应用场景

通信距离小于 1 m 的微尺度通信是太赫兹通信的特色应用, 它可以有效避免由太赫兹波段高路径衰减和分子衰减带来的负面影响。

自助服务机 (KIOSK) 系统要

求终端具有高速率数据传输能力。KIOSK 可以将大量数据下载到用户终端, 并在火车站、购物中心等公共区域提供服务。用户与自助服务终端之间的距离通常小于 10 cm。在进行微尺度通信时, 太赫兹需要满足近距离传输范围和点对点 (P2P) 网络拓扑要求。

高速太赫兹无线链路可以连接多个印制电路板 (PCB), 也可以连接设备内部同一 PCB 上的芯片。通过平面纳米天线, 太赫兹可以实现无线片上网络的可扩展形式, 创建超高速链路, 以满足面积受限和通信密集片上场景的严格要求^[12]。

由于太赫兹波长与分子尺寸接近, 我们可以通过纳米传感器来监测胆固

醇、癌症生物标志物等, 还可以通过构造纳米传感器网络来收集有关用户的健康数据。通过纳米传感器与微型设备之间的无线接口, 可以实现健康数据的上报^[13]。与伽马射线等健康检测方法相比, 太赫兹健康监测具有更高的安全性。

3 太赫兹基带处理算法

太赫兹存在功率放大器非线性、同相/正交 (I/Q) 不平衡、相位噪声严重等问题。此外, 当前的物理层主要是针对 52.6 GHz 以下频谱进行优化的, 对太赫兹频段的优化比较少。因此, 太赫兹相应的器件设计优化和基带处理算法仍需要进一步研究。

3.1 波形设计

在进行太赫兹频段的波形设计时，我们应考虑太赫兹的特有性质，例如路径损耗极高、信道稀疏、时间扩展严重、延迟扩散大、载波频率偏移、相位噪声高、多普勒频移扩展变大等。这对带外发射等指标提出了更高的要求。此外，我们还需要充分考虑随距离变化的频谱窗口，以获得适用于特定传输距离的太赫兹波形。

由于太赫兹频段存在信道多径扩展的特点，多载波波形仍是太赫兹波形设计的重点。太赫兹通信系统面临相位噪声高、硬件受限严重的问题。这使得能够与现有系统更兼容的正交频分复用（OFDM）波形具有广阔的应用前景。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，带外泄露相对较低，是太赫兹频段重要的波形之一。为了进一步克服太赫兹多载波波形的高峰均功率比（PAPR），我们可以采用选择性映射、部分传输序列和选择合适码本等方法。

单载波正交幅度调制（QAM）^[14]可以降低频率偏移灵敏度、相位噪声和 PAPR，还可以通过频率均衡器降低信号处理的复杂度。然而，单载波 QAM 仅适用于全带宽方案。对此，载波聚合可能是一种解决方案，但会带来灵活性受限的问题。这是因为载波聚合有着更多的信令开销和更为复杂的处理过程。

单载波离散傅里叶变换（DFT）扩展 OFDM（DFT-s-OFDM）波形可以将单载波的低 PAPR 和多载波频域的资源灵活分配结合起来，但该方法面临着由相邻符号间过渡不连续造成的大量带外泄露等问题。特定码字 DFT-s-OFDM^[15]采用旁瓣较低的滤波器以抑制 DFT-s-OFDM 符号尾部泄露。在符号尾部生成特定码字是一种可行

的太赫兹单载波波形设计方案。表 2 给出了几种太赫兹波形的对比分析。

分析距离与太赫兹频谱窗口之间的关系对波形设计十分重要。由于单个频谱窗口带宽约为几十吉赫兹，因此我们可以将每个频谱窗口划分为一组子带来进行多宽带传输。为对抗频率选择性衰落并改善 SINR，子带信息符号可以通过一系列极短脉冲来表示。其中，极性随机化脉冲可提供更强的抗干扰能力，并有助于优化超宽带通信的频谱形状。针对多用户场景，子带中心频段将被分配给长距离和高要求的用户，子带边缘频段将被分配给小区中心和低要求的用户，以保证边缘用户传输性能，实现多用户传输和容量提升。

在帧结构设计中，一般循环前缀（CP）持续时间是固定的，并且是根据最坏情况来设计的。这会对时延扩展小的用户造成负面影响，这一点在时延扩展大的太赫兹通信中尤为严重。为此，一种解决方案是：使用内部保护间隔来替换 CP，使保护间隔和数据

传输的总持续时间固定，同时两者的比率可以灵活变动，如图 4 所示。内部保护间隔可以动态扩展以处理时序未对准问题，在不影响帧持续时间的情况下，为远近用户配置不同的保护间隔，从而避免符号间干扰。

3.2 调制编码

太赫兹功率放大器在饱和区工作时会产生高水平失真。高 PAPR 问题在太赫兹频率内表现得尤为突出。复杂基带信号包络的缓变会降低对功率放大器的线性要求。低复杂度的低包络变化调制是太赫兹调制的优先选择。

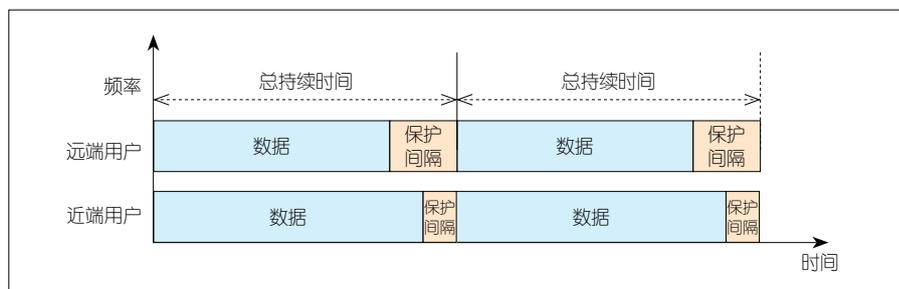
$\pi/4$ 正交相移键控（QPSK）是 QPSK 和偏置正交相移键控（OQPSK）的折中，它允许的最大相变为 135° 。经过带通滤波的 $\pi/4$ QPSK 信号的包络波动比带通 QPSK 信号小。 $\pi/4$ QPSK 旁瓣功率衰减速率比 QPSK 快，并且具有更高频谱效率。此外，基于相同设计方法的 $\pi/4$ 二进制相移键控（BPSK）也是一种低包络变化的信号调制方法。低阶调制在大带宽太赫兹

▼表 2 太赫兹波形对比分析

指标	W-OFDM	DFT-s-OFDM	UW-DFT-s-OFDM	SC-QAM
PAPR	高	低	低	低
相位噪声补偿	中	高	最高	高
带外泄露	高	低	最低	低
复杂度	高	高	最高	低
频谱灵活性	高	高	高	低
后向兼容	最优	优	优	差

DFT-s-OFDM: 离散傅里叶变换扩展正交频分复用
PAPR: 峰均功率比
SC-QAM: 单载波正交幅度调制

UW-DFT-s-OFDM: 特定码字 DFT-s-OFDM
W-OFDM: 加窗正交频分复用



▲图 4 帧结构设计

通信中受到更多关注。

太赫兹频段严重的器件损伤和相位噪声可能会给传输带来不利影响。因此,研究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。这有利于消除功率放大器的非线性失真。

针对太赫兹微尺度通信,基于上百飞秒长脉冲的通断键控(OOK)开关设计^[16]是一种可行的调制方案。该方法以静默方式来传输逻辑0信号,使用初始化前同步码和恒定长度的数据包来区分静默与非静默状态,对纳米器件之间的严格同步要求较低,能够避免分子吸收噪声带来的干扰,有效减少高频短脉冲下的复杂同步过程带来的干扰。

为设计低复杂度信道编码方案,我们需要研究传输速率与解码时间之间的权衡关系。编码方案需要充分分析太赫兹多分子吸收和多径衰落,并根据网络条件动态设置最佳编码权重。目前,IEEE 802.15.3e(电气与电子工程师协会标准)针对252~325 GHz的频率范围制定了前向纠错(FEC)方案,并指出在极高数据速率下FEC在硬件实现中具有很大的优势。

3.3 超大规模多输入多输出(UM-MIMO)技术

UM-MIMO能够解决太赫兹通信距离短的问题,进而提升太赫兹通信网络的可达容量。

表面等离极化激元(SPP)波属于受限电磁波,它常出现在金属和电介质间由电荷的整体振荡产生的界面上,其波长远小于自由空间波长。石墨烯SPP波通常适用于频率高于1 THz的通信场景。等离子体超材料天线在100 GHz~1 THz频段下可能会替代

传统天线。SPP波在石墨烯中的传播特性取决于结构尺寸和费米能量。动态调整限制因子能够使天线阵列谐振频率可调。

在UM-MIMO波束赋形中,大量纳米天线集成为小尺度阵列,同时高增益窄波束指向最强的传播路径,以补偿极高的路径衰减。在太赫兹波段,基于码本的混合波束赋形策略是可能的解决方案之一。该方案的过程大致包括:首先选择传输窗口,进行预扫描和用户分组,然后进行距离感知多载波传输,精确模拟波束赋形,最后选择天线子阵列,进行功率分配和混合波束成形。

在UM-MIMO空间复用中,我们可以将超大规模天线阵列划分为不同的子阵列。子阵列的数量、天线元素数目、星座图之间的权衡都有助于实现不同的传输目标。在短距离通信时,天线元素级空间复用更有优势。在长距离传输时,子阵列的数量需要根据实际需求来配置。基于空域太赫兹信道存在多条不相关传播路径的特点,通过空间多路复用可以提高用户数据的传输速率。

利用太赫兹传输多窗口可以实现更高的系统容量。等离子体纳米天线的谐振频率可调性使多传输窗口的协同应用成为可能。这种方法的基本思路是:首先以虚拟方式将纳米天线阵列分成多个子阵列,然后独立地调整每个子阵列元素的动态复电导率,可以使子阵列元素在不同的中心频率上工作,最后通过选择特定元素或交错方式来创建不同频率的虚拟子阵列^[17]。

3.4 波束管理

太赫兹波长短的特点使得在小面积内集成大量天线成为可能。虽然太赫兹波束极窄,但容易产生波束指向误差。由于射频链路数量受限且太赫

兹器件不成熟,因此部分具有混合波束赋形的连接结构更具有潜力。

太赫兹信道具有天然稀疏特性,可以通过两步波束子集优化和线性波束搜索来减少搜索空间。对此,一种可行的方案为:通过压缩感知等稀疏信号处理方法来减少波束选择的训练负担。具有较低复杂度的正交匹配追踪(OMP)算法、近似消息传递(AMP)算法都是候选方法。在波束极窄的情况下,原子范数超分辨率压缩感知的方法^[18]能够提升波束训练性能。此外,数据驱动波束选择方法可以降低波束管理的复杂度。数据模型双驱动的深度学习方法可以将无线传输模型和深度学习的优点进一步结合,是一种待挖掘的波束训练方法。

用户的移动性会导致太赫兹波束空间发生快速变化。因此,利用时变信道时间相关性的信道追踪方法是研究方向之一。基于先验信息的波束追踪方案通过实际用户运动模型,来挖掘基站与用户之间的物理方向时间变化规律,并利用先前时隙中获得的波束空间信道来预测时变波束空间信道。智能波束追踪方案^[19]借助机器学习的训练和预测过程,并利用过去信道状态信息(CSI)来有效地预测未来波束方向和用户CSI,使波束追踪精度得到进一步提升。

由于太赫兹信号衰减严重且衍射能力较弱,因此太赫兹出现阻塞的概率远高于毫米波波束。对此,我们可以采用基站间协作的方案来应对波束阻塞。越区切换和阻塞预测是这种方案的主要手段。该方案构造序列标记并解决相关问题,利用监督学习等方法来获取阻塞发生时下一次最可能切换的基站信息,以防止由阻塞导致的突然链路断开。太赫兹信道的多径特性使得波束间协作成为解决波束阻塞问题的另一种思路。基于这种思路的

方案可以建立针对 LOS 和（非视距传播）NLOS 路径的波束对列表。当检测到堵塞时，系统将首先选择一个新波束对，然后立即进行切换。RIS 的引入不仅使得改变传输环境和获得期望路径成为可能，还使波束协调方案的可行性得到进一步提升。当多个 RIS 协同工作时，可靠传输波束对将获得进一步增强。这使得波束协同方案在解决波束阻塞问题时更加具有吸引力。

4 RIS 技术

无线信道是一种不可控的随机连接，本身具有一定的不可靠性。此外，环境通常也会对通信效率产生负面影响。随着智能无线电磁环境概念的提出，控制无线环境成为超越传统通信的可行方法。这为无线通信系统增加了新的自由度。

RIS 由特殊设计的超材料单元按照一定规则排列组成，是一种具有可编程电磁特性的二维薄层人工电磁表面。改变 RIS 阵子的电磁特性可以控制无线电波的散射、反射和折射，克服多径衰落和自然环境无线传播的负面影响。无需复杂的编译码和射频处理，RIS 技术就可实现对入射电磁波的定向反射，并形成振幅、相位、频率可控的电场。

全球有不少高校和企业开展了对 RIS 技术的研究工作。例如，东南大学崔铁军院士团队和麻省理工大学 H. BALAKRISHNAN 教授团队等均对基于 RIS 的 6G 超大规模无线发射机、新型无线中继、智能电磁墙等新应用展开了深入研究^[20-22]。欧洲远程教学创作与销售网联盟（ARIADNE）正在通过 RIS 先进连接技术来探究 100 GHz 以上的 D 波段频率。

4.1 RIS 优势分析

RIS 技术不仅具有低成本、大面

积、易部署、连续表面、强兼容性、全双工的优点，还具有频谱效率增强、无源被动反射和全频段工作的突出特点^[23]。将 RIS 应用于太赫兹频段是未来的技术发展趋势。

太赫兹信号容易受到阻挡物干扰，同时严重的分子吸收和路损衰减会影响太赫兹信号的可靠性。对此，RIS 能够通过重新配置无线传播环境来补偿功率损耗，以克服非视距限制，进而构建智能可控的无线环境。RIS 技术可以显著增加复用层数和容量，提高异构网络的服务质量，改善移动边缘计算的延迟性能。

将 RIS 密集地分布在室内和室外空间中会对太赫兹覆盖空洞产生积极作用。具体来说，RIS 可以在用户与服务基站（或接入点）之间创建虚拟视线链接，以克服局部空洞问题，改善恶劣的传播环境。这种方法具有低成本和环境友好的优点。

太赫兹衰减严重的缺点限制了其覆盖范围，这使太赫兹面临小区边缘用户服务差和多小区同频干扰的问题。对此，我们可以将 RIS 部署在小区边缘，通过被动波束赋形来提高目标信号功率并抑制干扰，进而实现覆盖范围扩大和动态用户追踪。

对希望降低电磁干扰的场景（如医院、机场等），RIS 不仅可以通过智能控制无线环境来控制多径，还可以通过有效干扰控制来降低电磁辐射水平。作为发射机应用时，RIS 可以降低对射频链路和模数转换器/数模转换器（ADC/DAC）的高需求。这将有助于应对目前太赫兹面临的硬件技术难题。

此外，RIS 还可用于太赫兹频段的定位、感知，以及其他新场景。RIS 的极大阵子数目可以显著提高空间分辨率，从而获得超高定位精度^[24-25]。例如，RIS 不仅可以用于无人机太赫

兹通信，提升无人机网络性能，还可以用于增强太赫兹物联网场景，构建智能无线传感器网络。

4.2 RIS 关键技术分析

RIS 引入了从基站到 RIS、从 RIS 到用户的分段信道，具有不同于大规模 MIMO 的信道特征。根据实际网络的几何结构、超表面面积和工作波长等，RIS 包括近场工作模式和远场工作模式^[26]。这两种工作模式的信道具有不同的特征。这给 RIS 信道的表征与简化带来了新的挑战。双偏振反向散射信道模型和空间散射信道模型是 RIS 常用的模型。从发射机到 RIS，再到接收机，这一过程的路径损耗非常高。对这一损耗进行合理建模是十分必要的。

获取 RIS 与收发机之间的信道状态信息对基站主动波束赋形、RIS 被动波束赋形、安全传输，以及被动信息传输等至关重要。被动 RIS 不具备信号处理能力，且单元数量多导致下行链路反馈开销巨大。这可能会导致 I/Q 不平衡、相位噪声、放大器非线性等问题。因此，设计反馈开销友好的鲁棒信道估计方案是非常有必要的。由于太赫兹信道散射径比较丰富，并且受分子吸收影响严重，因此在设计信道估计算法时需要对此加以考虑。太赫兹信道稀疏特性为信道估计带来了便利。信道缺秩、双结构化稀疏等性质可以用来进行低导频开销的信道估计。同时，RIS 分块^[27]、信道估计和波束匹配协同方案可以适配更实际的应用场景。

RIS 独特的可编程特性为波束赋形提供了极大的便利。信道的分段特性需要对基站的主动波束赋形和 RIS 的被动波束赋形进行联合设计。对此，基本的处理思路为：从信号处理的角度出发，将波束赋形设计问题转化为

特定目标的优化问题，如使接收功率和数据速率达到最大化，使发射功率达到最小化等。此外，基于数据和数据模型双驱动的人工智能为 RIS 无线通信波束赋形的设计带来了新的处理方法。降维与分块是衡量波束赋形精度和计算复杂度的有效方法。集中式和分布式 RIS 部署与组网设计是下一步的研究方向。

5 结束语

探索新频段是 6G 研究的重点方向。随着新场景的引入和垂直行业的发展，探索太赫兹频段的高效利用方式显得愈加重要。探究太赫兹特殊频段特性、设计太赫兹基带处理算法、研究太赫兹与其他新技术的结合、发展新一代超高速率通信系统都是未来研究的重点。

参考文献

- [1] YANG P, XIAO Y, XIAO M, et al. 6G wireless communications: vision and potential techniques [J]. IEEE network, 2019, 33(4): 70–75. DOI: 10.1109/MNET.2019.1800418
- [2] 周泽魁, 张同军, 张光新. 太赫兹科学与技术 [J]. 自动化仪表, 2006, (3): 1–6
- [3] 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. DOI: 10.1109/MNET.2019.1800430
- [4] 彭琳, 段亚娟, 别业楠. B5G 毫米波和太赫兹技术的背景、应用和挑战 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(3): 82–86. DOI: 10.12142/ZTETJ.201903011
- [5] TAN J, DAI L. THz precoding for 6G: applications, challenges, solutions, and opportunities [EB/OL]. (2020-05-21)[2021-01-29]. <http://arxiv.org/abs/2005.10752>
- [6] ITU. ITU-R R. P. 676–5: attenuation by atmospheric gases [EB/OL]. (2001-02-13)[2021-01-29]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-5-200102-S/en>
- [7] ITU. ITU-R P. 838–3: specific attenuation model for rain for use in prediction methods [EB/OL]. (2005-03-08)[2021-01-29]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/en>
- [8] JU S H, SHAH S H A, JAVED M A, et al. Scattering mechanisms and modeling for terahertz wireless communications [C]//2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Shanghai, China: IEEE, 2019: 1–7. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761205
- [9] RAPPAPORT T S, XING Y C, KANHERE O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond [J]. IEEE access, 2019, 7: 78729–78757. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2921522
- [10] HWU S U, DESILVA K B, JIH C T. Terahertz (THz) wireless systems for space applications [C]//2013 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings. Galveston, TX, USA: IEEE, 2013: 171–175. DOI: 10.1109/SAS.2013.6493580
- [11] WANG C, LU B, LIN C X, et al. 0.34–THz wireless link based on high-order modulation for future wireless local area network applications [J]. IEEE transactions on terahertz science and technology, 2014, 4(1): 75–85. DOI: 10.1109/TTTHZ.2013.2293119
- [12] YALGASHEV O. Towards nanoscale interconnect for system-on-chip [D]. Tashkent University of Information Technology, 2015
- [13] AKYILDIZ I F, JORNET J M, HAN C. Terahertz band: next frontier for wireless communications [J]. Physical communication, 2014, 12: 16–32. DOI: 10.1016/j.phycom.2014.01.006
- [14] SAHIN A, YANG R, LA SITA F, et al. A comparison of SC-FDE and UW DFT-s-OFDM for millimeter wave communications [C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kansas City, MO, USA: IEEE, 2018: 1–7. DOI: 10.1109/ICC.2018.8422672
- [15] SAHIN A, YANG R, BALA E, et al. Flexible DFT-S-OFDM: Solutions and challenges [J]. IEEE communications magazine, 2016, 54(11): 106–112. DOI: 10.1109/mcom.2016.1600330cm
- [16] JORNET J M, AKYILDIZ I F. Femtosecond-long pulse-based modulation for terahertz band communication in nanonetworks [J]. IEEE transactions on communications, 2014, 62(5): 1742–1754. DOI: 10.1109/TCOMM.2014.033014.130403
- [17] SARIEDDEEN H, ALOUINI M S, AL-NAF-FOURI T Y. An overview of signal processing techniques for terahertz communications [EB/OL]. (2020-05-27)[2021-01-29]. <https://arxiv.org/abs/2005.13176v1>
- [18] TSAI Y, ZHENG L, WANG X D. Millimeter-wave beamformed full-dimensional MIMO channel estimation based on atomic norm minimization [J]. IEEE transactions on communications, 2018, 66(12): 6150–6163. DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2864737
- [19] GUO Y Q, WANG Z H, LI M, et al. Machine learning based mmWave channel tracking in vehicular scenario [C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Shanghai, China: IEEE, 2019: 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2019.8757185
- [20] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface: system design, analysis, and implementation [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2683–2699. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007055
- [21] ARUN V, BALAKRISHNAN H. RFocus: beamforming using thousands of passive antennas [C]//17th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI' 20). Santa Clara, CA, USA: USENIX, 2020: 1047–1061
- [22] SUBRT L, PECHAC P. Intelligent walls as autonomous parts of smart indoor environments [J]. IET communications, 2012, 6(8): 1004. DOI: 10.1049/iet-com.2010.0544
- [23] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network [J]. IEEE communications magazine, 2020, 58(1): 106–112. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900107
- [24] HU J Z, ZHANG H L, DI B Y, et al. Reconfigurable intelligent surface based RF sensing: design, optimization, and implementation [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2700–2716. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007041
- [25] ZHANG H B, ZHANG H L, DI B Y, et al. Towards ubiquitous positioning by leveraging reconfigurable intelligent surface [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(1): 284–288. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.3023130
- [26] GARCIA J C B, SIBILLE A, KAMOUN M. Reconfigurable intelligent surfaces: bridging the gap between scattering and reflection [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2538–2547. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007037
- [27] JIAN M N, ZHAO Y J. A modified off-grid SBL channel estimation and transmission strategy for RIS-assisted wireless communication systems [C]//2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Limassol, Cyprus: IEEE, 2020: 1848–1853. DOI: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148537

作者简介



刘利平, 中兴通讯股份有限公司无线软件算法研发中心副主任; 负责 4G/5G 无线基带系统方案的设计和开发工作, 具有 10 余年无线通信技术研究 and 产品研发经验; 拥有多项蜂窝移动通信授权专利。



管梦楠, 中兴通讯股份有限公司无线算法部技术预研工程师; 主要研究领域为 6G 技术预研; 发表论文 8 篇。



陈艺骥, 中兴通讯股份有限公司技术预研资深专家、青年领军人才、深圳市地方级领军人才; 主要研究领域为 6G 技术预研; 发表论文 10 篇, 获授权专利 50 项。