

太赫兹通信技术综述

谢莎, 李浩然, 李玲香, 陈智, 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731)

摘 要: 太赫兹频段 (0.1~10 THz) 信号在空气中传播衰减大、传输距离短, 在太赫兹通信技术得到广泛应用之前, 这些关键问题需要攻克。首先, 介绍了当前太赫兹信道的研究进展, 包括信道建模、信道测量及信道估计。在此基础上, 分析了单用户基本通信场景和多用户复杂通信场景, 并针对各个场景中存在的问题列举了可能的解决方案。最后, 展望了太赫兹通信未来可行的研究方向。

关键词: 太赫兹通信; 太赫兹信道模型; 超高数据速率; 高定向窄波束; 点到点通信; 多用户通信; 第六代移动通信技术

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020107

Survey of terahertz communication technology

XIE Sha, LI Haoran, LI Lingxiang, CHEN Zhi, LI Shaoqian

National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: There are some challenges that need to be overcome before terahertz communication technology is widely applied, such as large propagation attenuation in the air and short transmission distance. Research progresses of terahertz channel, such as terahertz channel model, terahertz channel measurement and terahertz channel estimation, were first reviewed. Based on these characteristics of terahertz channel, the underlying problems in basic single-user communication scenarios and more complicated multi-user communication scenarios were respectively analyzed. For each scenario possible solutions were concluded. Last but not least, some prospect future research directions on terahertz communications were discussed.

Key words: terahertz communication, terahertz channel model, ultra-high data rate, high directional narrow beam, point-to-point communication, multi-user communication, 6G

1 引言

随着智能手机的不断普及, 无线网络用户数量急剧增加。根据爱立信的物联网预测, 到 2022 年, 全球将有 290 亿台物联网设备。智能终端应用的快速发展要求未来通信系统能在各种复杂环境中实现无处不在的超高速访问。为此, 一种解决方案是通过先进的调制方案和信号处理技术来提高频谱效率。然而, 由于当前工作频段(窄带宽)的基本限制, 很难达到 100 Gbit/s, 更别提太比特每秒级

别了。另一种解决方案是使用更高的载波频率来增加信道带宽, 以提供足够的传输容量。

毫米波 (millimeter wave) 和太赫兹频段是高频通信的候选频段, 能很好地应对当前无线通信系统所面临的问题^[1-5]。相比之下, 太赫兹频段比毫米波频段具有更大的潜力。首先, 太赫兹频段的带宽为 0.1~10 THz, 比毫米波的带宽高出一个数量级, 可以提供太比特每秒级别数据传输速率的支持。其次, 由于减小了天线孔径, 太赫兹比毫米波具有更高的方向性, 更不易发生自由空间衍射。最后, 太

收稿日期: 2020-03-03; 修回日期: 2020-04-06

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFB1801500)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1801500)

赫兹频段下收发机之间的距离要比毫米波频段中的距离短得多,这将带来电力消耗的降低,从而减少二氧化碳的排放^[6]。

综合当前通信系统存在的不足与太赫兹频段独特的优势,太赫兹通信技术引起了学术界和工业界的广泛关注,被认为是满足移动异构网络系统实时流量需求的关键无线技术,可缓解当前无线系统的容量瓶颈问题,实现超高速无线通信^[7-9]。太赫兹频段巨大的带宽和可支持的超高速数据传输速率,将使大量的新应用和服务变成现实,如车辆通信、虚拟现实(VR, virtual reality)/增强现实(AR, augmented reality)、健康监测、卫星通信等。

通过部署太赫兹无线通信系统,能够实现车辆网络中的高速信息交互,进一步提高行车安全,减少交通拥堵和交通事故,提高交通系统的总体效率。AR/VR带给人们前所未有的体验,但目前的发展受到无线通信低数据速率的限制。幸运的是,一旦太赫兹频段被用于无线通信系统,将带来比有线通信系统更好的用户体验。在健康监测场景中,与高辐射的伽马射线相比,太赫兹射线对人体的伤害更小。因此,可以将大量纳米级传感器注入人体,使其分布在血液中,收集人体的健康信息,然后利用纳米传感器监测一些人体必需物质(如葡萄糖、钠)或癌症生物标志物;同时也可以感知人体不可达部位的相关运行状态信息,并通过纳米通信网络将监测的信息传递给外部设备。因此,健康监测(如病毒或肿瘤检测)可以以非侵入性的方式进行,并以实时的方式进行疾病检测^[10]。不仅如此,由于在太空中(无大气环境)没有太赫兹吸收损耗问题,因此太赫兹频段下的卫星通信传输速度快、传输距离远,且太赫兹通信终端具有小型化的优点,因此太赫兹卫星通信极具应用前景^[11-13]。

当前研制的太赫兹无线通信装备,根据太赫兹频段射线产生的方法分为2种:第一种方法是使用光电子技术将光学频率转换成太赫兹频率,即由半导体的激发产生连续或脉冲的太赫兹辐射;第二种方法是使用频率倍增器,将电子设备的工作频率从毫米波增加到太赫兹范围^[9]。基于光电子组合的方法在太赫兹无线通信系统中的应用往往受制于光学元件,不利于芯片的集成化和小型化,因此,目前应用较多的是基于倍频器的通信系统。其中,日

本电报电话公司(NTT, Nippon Telegraph & Telephone)在800 m以上实现了10 Gbit/s的双向数据传输速率和20 Gbit/s的单向数据传输速率。德国卡尔斯鲁厄理工学院实现了0.237 5 THz的全固态无线通信系统,当传输距离为1 km时,最大传输速率可达40 Gbit/s^[9]。但是,目前研制的太赫兹通信系统的规模化应用仍然存在一些需要攻克的难点问题,如太赫兹器件体积较大、集成度不高,太赫兹信号的传输损耗大,太赫兹射频器件的发射功率有限等。这些问题要求业界探索发展新的半导体材料和集成电路工艺、研发先进的天线技术、优化系统资源分配等,进而实现太赫兹通信的小型化、低功耗和低成本,达到增强太赫兹通信覆盖、提升太赫兹通信传输速率的目的。

为了更好地应用太赫兹通信技术支持未来超高速低时延的新型应用,在深入研究之前,需要更好地捕捉太赫兹频段的特性,理解太赫兹通信存在的问题与技术挑战,以构建更稳健、高效的太赫兹无线通信系统。本文首先综述了太赫兹信道的研究现状,包括当前太赫兹信道传播模型、太赫兹信道测量与信道估计。然后在太赫兹信道的基础上,分析了单用户基本通信场景,从收发端和中继两方面分析了存在问题,并给出了解决方案。进一步地,将通信场景延伸到多用户复杂通信场景,具体包括点到多点通信和多点到多点通信,针对每个场景中的问题列举了可能的解决方案。最后展望了未来太赫兹频段可能的重要研究方向。

2 太赫兹信道

捕获太赫兹信号传播特性的信道模型,对太赫兹通信的实际应用和具体部署有着深远的现实意义。设计太赫兹无线通信系统,首先要研究自由空间中太赫兹信号的传播特性,然后进行信道测量。太赫兹信号传播的主要问题在于大气中水蒸气吸收所造成的大幅度衰减。根据ITU-R P.676-9建议书^[4],可以得到因大气原因造成的太赫兹频段无线电波衰减率,如图1所示。其中,气压为1 013 hPa,温度为15℃,水汽密度为7.5 g/m³。

由图1可以观察到,在太赫兹频段有多个太赫兹传输窗口(2个水汽吸收峰之间的频率范围为传输窗)。本节将相继介绍当前太赫兹信道模型、信道测量和信道估计的研究现状,并总结未来这3个方面还需要解决的问题。

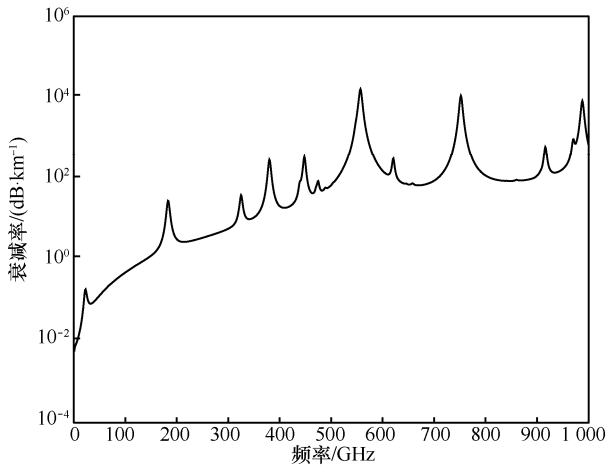


图 1 太赫兹频段衰减率

2.1 太赫兹信道模型

太赫兹频段具有频率高、波长短的特点，这使太赫兹信号在无线空间传输过程中会受到极大的自由空间损耗。也正是由于波长短这一特点，使大量天线可以放置在一个非常小的区域^[7]。如何充分利用太赫兹频段的优越性，建立有效、准确的太赫兹信道模型是关键的一步。

文献[15]中指出，太赫兹信号具有类光性，可以利用光学几何原理对其进行描述，因此射线追踪技术被广泛应用。文献[16]指出，在 300 GHz 处太赫兹存在一个带宽约为 47 GHz 的传输窗，目前大量的太赫兹信道模型的建立工作都依托于此频段。目前，业界研究的太赫兹信道模型主

要分为 2 种：一种是靠射线追踪技术得到的确定性信道模型^[17]；另一种是基于射线追踪技术，结合收发端的地理位置信息，经过大量数据测量得到的统计信道模型。

2.1.1 确定性信道模型

针对第一种确定性信道模型，文献[18-19]利用射线追踪技术充分考虑太赫兹信道的多条传输路径，包括视线 (LoS, line of sight) 路径和非视线 (NLoS, none line of sight) 路径。其中，非视线路径又包括反射路径、折射路径及衍射路径。在此，对文献[18]中太赫兹信道模型进行简单描述，太赫兹信道的多径模型如图 2 所示。

考虑多径传输模型由许多独立的子信道构成，且每一个子信道足够窄，因此每一个子信道具有平坦的频率响应；每一个子信道视为由 N_i 个射线叠加而成，其中， $i \in [1, M]$ ， M 表示每个子信道射线的数目。对于发送和接收设备固定环境为静态时，每个多径信道的子信道响应表示为

$$h_i(\tau) = \sum_{n=1}^{N_i} \alpha_{i,n} \delta(\tau - \tau_n) \quad (1)$$

其中， $\alpha_{i,n}$ 表示第 n 条射线的衰减因子， τ 表示射线到达时间， δ 表示单位脉冲函数。

假设多径信道中包含一条 LoS 路径、 $N_{Ref}^{(i)}$ 条反射路径， $N_{Sca}^{(i)}$ 条折射路径，以及 $N_{Dif}^{(i)}$ 条衍射路径，则多径信道模型可以表示为

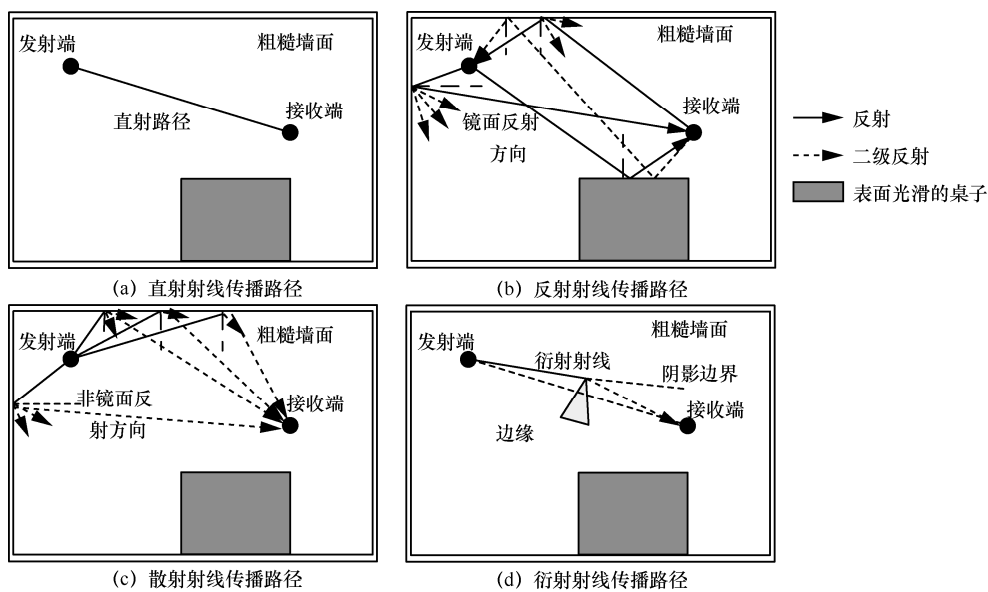


图 2 太赫兹信道的多径模型

$$h_i(\tau) = \alpha_{\text{LoS}}^{(i)} \delta(\tau - \tau_{\text{LoS}}) \Xi_{\text{LoS}} + \sum_{p=1}^{N_{\text{Ref}}^{(i)}} \alpha_{\text{Ref}}^{(i,p)} \delta(\tau - \tau_{\text{Ref}}^{(p)}) + \sum_{q=1}^{N_{\text{Sca}}^{(i)}} \alpha_{\text{Sca}}^{(i,q)} \delta(\tau - \tau_{\text{Sca}}^{(q)}) + \sum_{u=1}^{N_{\text{Dif}}^{(i)}} \alpha_{\text{Dif}}^{(i,u)} \delta(\tau - \tau_{\text{Dif}}^{(u)}) \quad (2)$$

其中, Ξ_{LoS} 表示 LoS 路径是否存在, 当取值为 1 时, 表示路径存在, 当取值为 0 时, 表示路径不存在; α_{Ref} 、 α_{Sca} 和 α_{Dif} 分别表示反射路径、散射路径及衍射路径的路径衰减; τ_{Ref} 、 τ_{Sca} 和 τ_{Dif} 分别表示反射路径、散射路径及衍射路径的时延。由维纳-辛钦定理可知, 第 i 条路径的路径损耗如式(3)所示。

$$\begin{pmatrix} \alpha_{\text{LoS}}^{(i)} \\ \alpha_{\text{Ref}}^{(i,p)} \\ \alpha_{\text{Sca}}^{(i,q)} \\ \alpha_{\text{Dif}}^{(i,u)} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} |H_{\text{LoS}}(f_i)| \\ |H_{\text{Ref}}^{(i,p)}(f_i)| \\ |H_{\text{Sca}}^{(i,q)}(f_i)| \\ |H_{\text{Dif}}^{(i,u)}(f_i)| \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, H_{LoS} 、 $H_{\text{Ref}}^{(p)}$ 、 $H_{\text{Sca}}^{(q)}$ 、 $H_{\text{Dif}}^{(u)}$ 为传输方程。

根据文献[18]可知, 太赫兹信号在进行传播时, 除了要经历自由空间衰减、分子吸收外, NLoS 路径还会存在由于反射体或折射体表面的粗糙问题造成的反射衰减。这是因为在微波频段下可以视为光滑的表面, 在太赫兹频段下由于波长短, 可能呈现出表面微粗糙特性^[20]。

具体地, 对于 LoS 路径, 传输方程表示为

$$H_{\text{LoS}}(f) = H_{\text{Spr}}(f) H_{\text{Abs}}(f) e^{-j2\pi f \tau_{\text{LoS}}} \quad (4)$$

$$H_{\text{Spr}} = \frac{c}{4\pi fr} \quad (5)$$

其中, c 表示光速, f 表示频率, r 表示发送端到接收端的距离, $\tau_{\text{LoS}} = \frac{r}{c}$ 表示到达时间。

$$H_{\text{Abs}}(f) = e^{-\frac{1}{2}k(f)r} \quad (6)$$

其中, k 表示与频率相关的分子吸收系数。

对于 NLoS 路径, 以反射路径为例, 其传输方程如式(7)所示。折射路径和衍射路径的传输方程表示及其推导过程见文献[18]。

$$H_{\text{Ref}}(f) = \left(\frac{c}{4\pi f(r_1 + r_2)} \right) e^{-2j\pi f \tau_{\text{Ref}} - \frac{1}{2}k(f)(r_1 + r_2)} R(f) \quad (7)$$

其中, r_1 和 r_2 分别表示发射端到反射点及反射点到接收端的距离, $\tau_{\text{Ref}} = \tau_{\text{LoS}} + \frac{r_1 + r_2 - r}{c}$ 表示反射路径的时延, $R(f) = \gamma_{\text{TE}}(f) \rho(f)$ 表示反射系数, 其中 $\gamma_{\text{TE}}(f)$ 表示菲涅耳方程, $\rho(f)$ 表示瑞利粗糙因子。

2.1.2 统计信道模型

前文所述射线追踪技术对于描述太赫兹信号传输虽然可靠, 但是对太赫兹信道进行描述时存在无法避免的问题, 即信道模型应用场景唯一, 不存在普适性。当环境发生微小变化时, 需要重新进行信道测量。但是, 由于进行射线追踪时需要大量的计算, 信道环境中复杂度稍有提高, 就可能带来计算复杂度的指数增长。为此, 学者们提出了结合场景中用户地理位置信息的太赫兹统计模型。

对于太赫兹信道统计模型, 首先建立信道理论模型; 然后在确定场景下, 利用射线追踪方法, 进行大量实验; 最后根据实验数据得出统计模型。文献[21-23]结合 MIMO 技术研究了经典的 S-V (Saleh-Valenzuela) 模型。在 S-V 模型中, 传播路径分为许多簇, 每一个簇中又包含了许多路径, 因此, 一个子天线接收到的信道响应表示为

$$H_s(d, f) = \sum_{i=0}^{N_{\text{clu}}-1} \sum_{l=0}^{N_{\text{ray}}^i-1} \alpha_{il}(f, d) G_t(\phi_{il}^t, \theta_{il}^t) \cdot G_r(\phi_{il}^r, \theta_{il}^r) \mathbf{a}_r(\phi_{il}^r, \theta_{il}^r) \mathbf{a}_t^+(\phi_{il}^t, \theta_{il}^t) \quad (8)$$

其中, N_{clu} 和 N_{ray}^i 分别表示簇的数量和第 i 个簇中射线的数量, $\alpha_{il}(f, d)$ 表示第 i 个簇中第 l 条射线的路径增益, $\frac{\phi_{il}^r}{\theta_{il}^r}$ 和 $\frac{\phi_{il}^t}{\theta_{il}^t}$ 分别参考到达和离开的方位角/仰角 (AoA/AoD, angle of arrival/ angle of departure), $G_t(\phi_{il}^t, \theta_{il}^t)$ 和 $G_r(\phi_{il}^r, \theta_{il}^r)$ 分别表示发射和接收天线增益, $\mathbf{a}_t(\phi_{il}^t, \theta_{il}^t)$ 和 $\mathbf{a}_r(\phi_{il}^r, \theta_{il}^r)$ 分别表示发射端和接收端相关的阵列方向矢量, $(\cdot)^+$ 代表矩阵的共轭转置。在此仅对模型进行简单阐述, 具体模型参阅文献[22]。

文献[24-26]在经典的 S-V 模型基础上做出了改进, 忽略了衍射路径对信道模型的影响。具体地, 文献[24-25]考虑 LoS 路径以及 NLoS 路径中一阶反射、二阶反射对太赫兹信道造成的影响, 并根据所部署的场景给出了确定的一阶反射、二阶反射的表达式。文献[26]则基于文献[24-25], 进一步考虑了衍射路径。

目前, 太赫兹信道模型仍然是对某一具体场景

进行信道测量后建立，虽然太赫兹统计信道模型在模型的灵活性方面有所提升，但是一旦场景发生巨大改变，仍然需要重新进行测量。另外，由于 NLoS 路径的太赫兹信号衰减还包括反射材料造成的反射衰减，且太赫兹信号对于不同的反射材料的衰减情况有所不同，因此太赫兹信道模型的建立还需考虑反射材料带来的影响。

2.2 太赫兹信道测量

与传统的无线局域网 (WLAN, wireless local area network) 信道相比，太赫兹信道的超高频率特点 (比如极大的自由空间衰减、不可忽略的高反射损失、通信波束易受阻断，以及动态射线阴影等) 使太赫兹信道的通信条件与传统 WLAN 信道相比出现很大不同。传统的 WLAN 频率模型无法在太赫兹范围内使用，为了更加准确地描述太赫兹信道特点，信道测量不可或缺。随着技术的不断推进，曾经受到器件物理条件的制约而难以满足太赫兹信道超高衰减的输出功率，已通过选择合适的天线增益解决。随着满足太赫兹高方向性、可操纵的天线不断问世，太赫兹信道测量不断受到人们关注。

要进行太赫兹实验，太赫兹射线的形成是首要问题。文献[13]指出，目前产生太赫兹频段射线的方法主要有 2 种。第一种方法是使用光电子技术将光学频率转换成太赫兹频率，即由半导体的激光激发产生连续或脉冲的太赫兹辐射。第二种方法是使用频率倍增器，将电子设备的工作频率从毫米波增加到太赫兹范围。基于这 2 种方法的太赫兹射线产生方案诸多，本文不详细介绍。相比之下，目前使用第二种方法的更多，主要有两方面的原因：1) 相比于第一种方法需要使用的光学元件，第二种方法所用的硅组件成本较低；2) 由于硅基组件相比光学

元件，尺寸更小，系统排列将更紧凑^[26]。

目前多数的信道测量工作皆在文献[16]提出的频段 (300 GHz) 完成^[17]。文献[27]基于第二种方法，给出了在 300 GHz 传输窗、20 GHz 带宽的室内太赫兹信道的详细测量方案，以及相应的测量结果：在 2 m 以内，太赫兹信道可以提供 90.31 Gbit/s 的数据传输速率，具体的测量方案如图 3 所示。收发端各个模块的选择是实验设计的重要环节。对于天线增益的选择，需要提前对信道的衰减及噪声进行估计，根据衰落值选择天线增益。由于接收端的高敏感性，因此需要选择低噪声放大器。在接收端，需要将信号从高频搬移到低频进行数字化处理，在此解调过程中，外插接收机需将太赫兹射频信号及本地振荡信号作为输入。然而由于产生的本地振荡信号频率过高，其成本及实现难度都很大，因此通常使用平面肖基特二极管进行 N 次谐波混迭。本地振荡信号频率根据混频器的性能进行选择，如文献[27]中混频器型号为 WR2.85HM，属于次谐波混频器，故所需的本地振荡信号频率为 130~200 GHz，功率范围为 3~6 dBm。发送端的模块选择与接收端相似，信号产生模块选择 Keysight 的 M8195A 65 GSa/s 任意信号发生器，可以产生 25 GHz 带宽的模拟信号。

当频率为 300 GHz 时，文献[15]指出太赫兹频段信号特征可以由光学几何原理很好地描述，并使用射线追踪方法针对具体的场景进行太赫兹信道测量。具体地，在室内场景中，文献[24-26,28]根据大量测试数据建立了太赫兹信道统计模型。文献[29-30]使用射线追踪方法，以火车站室外场景为例，分别对火车到火车、火车到车站为收发端进行了太赫兹信道测量。文献[29-30]中的研究场景分别如图 4 和图 5 所示，均在火车静止的场景中进行太赫兹信道测量。测量结果显示，当频率为 300 GHz、

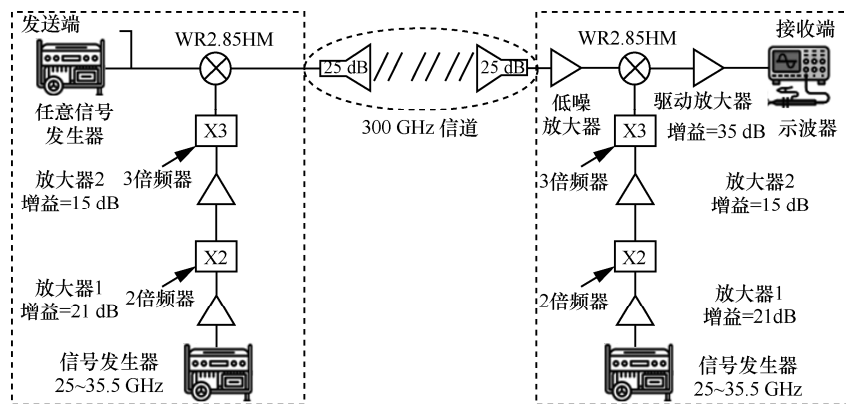


图 3 太赫兹信道测量方案

带宽为 8 GHz 时，均方根时延扩展等参数都优于一般 WLAN 信道的情况。

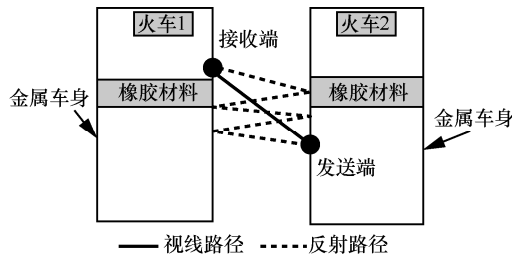


图 4 火车静止场景下太赫兹信道测量

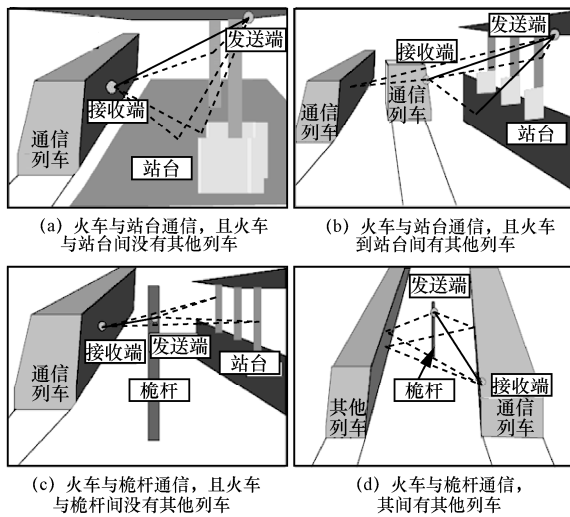


图 5 火车到基础设施的太赫兹信道测量

多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 技术由于可以进一步提高数据吞吐量及保证通信的可靠性而被广泛研究，太赫兹通信频段却鲜有文章涉及。目前只有文献[31]考虑了在室内 LoS 场景的 298~313 GHz 频段使用 2×2 MIMO 信道进行太赫兹信道测量。测试结果显示，当收发端相距 25 cm 时，使用 MIMO 系统的数据传输速率可达 7 Gbit/s，优于不使用 MIMO 系统的数据传输速率 5.55 Gbit/s。

针对目前的太赫兹信道测量方面的研究，可以在以下几方面进行扩展。1)扩大场景，除了文献 [29-30]中收发端距离达到 6.584 m，文献[27]中收发端相距 2 m，其余研究的测试场景收发端相距均不超过 1 m。2)设置不同的测试场景，诸如设置不同的反射材料。由于太赫兹频段射线对于不同的反射材料的反射损耗不同，设置不同的反射材料可以观察到不同的信道多径特征。3)将 MIMO 系统加入太赫兹研究中，MIMO 信道可以进一步提高信道的数据吞吐量，更好地保证通信的

可靠性。以上几种扩展均可与太赫兹信道统计模型进行联合，得到针对某一具体场景下的太赫兹统计信道模型。

2.3 太赫兹信道估计

根据太赫兹的信道模型可知，目前提出的无论是通过射线追踪技术实现的确定性太赫兹信道模型，还是通过信道测量后得到的统计太赫兹信道模型，都是在用户静态情况下得到的。而在实际生产生活中，移动性较高已成为当前用户的一大特性。因此通过信道估计技术对用户的状态进行预判，确保通信质量就显得尤其重要。目前对太赫兹频段的信道估计分为两类：不使用大规模 MIMO 系统的信道估计和使用大规模 MIMO 系统的信道估计。

针对不使用大规模 MIMO 系统的信道估计，目前研究以 AoA 估计为主。为了补偿太赫兹通信中信号极高的自由空间衰减，保证接收端接收信号的强度，在收发端配备具有高方向性的高增益天线设备是必不可少的。然而，实际应用中，由于用户的实时移动性，使接收端的 AoA 实时改变。为了保证接收端可以实现高天线增益，通过提前估计 AoA 的变化，调整接收端的自适应定向天线接收方向，来保证接收端天线增益。由于太赫兹射线的高方向性导致的高分辨率，使系统需要长时间的扫描，降低了 AoA 估计带来的实用性，文献[33-36]针对用户的 AoA 特性建立三维坐标进行描述，利用贝叶斯滤波器，结合多项技术对移动用户的 AoA 进行了高效率的估计。文献[33]结合强化学习方法对移动用户的 AoA 进行估计。文献[34]中考虑到实时 AoA 信息可以看作一阶马尔可夫过程，因此考虑贝叶斯滤波器结合似然和先验信息，并证实了似然和先验信息的结合提供了比单独使用似然更精确的估计。文献[35]考虑使用多个接入点对用户移动造成的 AoA 改变进行协同估计。由于同一个用户的 AoA 改变对于不同接入点而言存在空间上的关联性，文献[35]提出结合空间概率算法对 AoA 进行了实时估计。文献[36-37]考虑到 AoA 的角增益特性可以由功率角谱进行表示，即需要使 AoA 的估计结果落在接收端的主瓣范围内，且太赫兹通信设备具有低频射频频前端的特点，作者提出了两阶段 AoA 估计算法：首先，在低频范围进行粗略但快速的角频率估计；然后，进行 AoA 精确搜索。由于天线主瓣较宽，因此可以将阶段 1 中较低频率处的近似

估计作为阶段 2 中有限的搜索范围,并分别在不同的室内场景进行测试,这不仅通过精确搜索得到更准确的估计结果,同时低频估算有效地缩减了精确搜索的范围,从而减少了估计时间。

而针对大规模 MIMO 系统的信道估计,研究相对较少。大规模 MIMO 系统的使用,可以有效提高太赫兹通信的信号增益。然而针对用户的高移动性,若要完全获取大规模 MIMO 实时、高速变化的信道信息,极具挑战。文献[38]针对太赫兹移动通信场景,考虑太赫兹信道的稀疏特性,在终端进行直线运动情况下,结合移动用户相对于基站的物理空间特征,利用波束空间技术,选择充分代表大规模 MIMO 信道的波束,对用户的波束空间信道进行信道估计与追踪。波束空间技术在得到完整的大规模 MIMO 信道信息的前提下,最大限度地节省了 MIMO 系统中射频链的使用数量,有效降低了 MIMO 系统的能量损耗。可见波束空间 MIMO 系统将成为太赫兹通信发展重要的技术支撑。

针对目前太赫兹信道估计技术,有一些方向可以深入研究。首先,前文所述信道估计中多是仅依托于 LoS 路径进行太赫兹通信模型建立,然后进行信道估计,而考虑 NLoS 路径的仅有文献[35]。其次,前文所述信道估计目前都是针对室内场景进行的,且结果验证也是结合室内的太赫兹信道进行测量,因此在室外场景中进行太赫兹信道估计也值得深入探索。再次,针对波束空间 MIMO 系统的太赫兹信道估计,相比于太赫兹通信,毫米波通信在波束空间 MIMO 信道估计研究更广泛,因此可以参考毫米波通信中波束空间 MIMO 的信道估计相关研究。文献[39]利用多信号分类法(MUSIC, multiple signal classification)对波束的 AoA 进行估计,利用最小二乘法对路径增益进行估计;文献[40]针对毫米波通信波束空间信道估计提出了自适应的支持检测(SD, support detection)算法,然而文献[40]是在窄带通信下提出的;文献[41]则针对宽带通信下波束空间信道估计提出了连续支持检测(SSD, successive support detection)算法,该算法不仅减小了导频序列的开销,还提高了信道估计的精确度;文献[42]采用深度学习技术进行信道估计。最后,可以结合机器学习对太赫兹信道参数进行估计。文献[32]利用太赫兹通信多径传输的稀疏特点,通过使用压缩感知(CS, compress sensing)技术对太赫

兹信道进行估计。然而当感知序列中存在可变参数时,传统的 CS 技术不能很好地解决此类问题。文献[43]提出了改进意见,文献[42]中提到在毫米波情况下,设计动态可调节网格对信道中的 AoD、AoA,以及接收端的信号到达时间进行估计。为了得到精确的信道参数估计值,文献[43]利用毫米波通信中角域及多径时延的稀疏性设计了稀疏贝叶斯学习方法,以此改善了传统的 CS 技术不能解决可变参数的问题。

因 5G 技术的发展,毫米波通信技术在大规模 MIMO、信道估计等方面有很多研究成果,这些研究成果对太赫兹通信中信道估计的研究有极大的启发意义。但需要注意的是,在太赫兹通信系统中,由于天线尺寸变小及更高的路径损耗,天线数量会远远高于毫米波通信系统的天线数量,从而出现超大规模 MIMO^[44](ultra massive MIMO)。正如文献[44]提到的,在 1~10 THz 频段,石墨烯基等离子体纳米天线阵列可在几平方毫米内嵌入数千个阵列单元(例如在 1 THz 频段,1 mm²可嵌入 1 024 个阵列单元)。因此,在借鉴毫米波大规模 MIMO 系统中相关研究技术的同时,需要考虑超大型天线阵列的分组和控制,以及超大阵列在收发两端中的特性,以实现频谱效率、能量效率和距离增强之间的性能权衡^[45]。具体地,文献[44]提出,在阵列方面,需要考虑相邻纳米天线之间的相互耦合,以及所需的信号分配网络和时延/相位控制器的性能;同时,还需要开发新的机制及适应信道特性的新型导频信号,以有效地估计成千上万的并行信道,实现阵列的实时动态操作。另一方面,由于太赫兹频段中传输窗的出现,不同的传输窗在路径损耗和时延扩展方面表现出明显不同的传播特性,因此涉及太赫兹通信多频段 MIMO 技术,需要采取一种混合机制,结合载波之间的相关性,对各传输窗进行分析,此时信道的具体参数和实时信道估计都变得更具挑战性。

3 单用户基本通信场景

由于较大的路径损耗和较差的穿透能力限制了通信性,太赫兹频段长期以来一直被认为不适合蜂窝通信。然而近年来,太赫兹信道测量和太赫兹无线通信性能研究显示出它在实际蜂窝系统中的优势。在前文太赫兹信道传播模型的基础上,本节分析了太赫兹频段下点到点通信这一基本场景。

3.1 太赫兹覆盖范围内通信

相比微波频段,太赫兹频段信号由于自由空间

损耗和水分子吸收, 路径损耗问题显得尤其突出, 这极大地限制了有效通信的距离。近年来, 学者们尝试引入调制技术和波束成形技术来解决这一问题。

3.1.1 直接调制技术

调制技术可以实现远距离的太赫兹频段数据传输, 也可以解决太赫兹频段通信距离有限的问题。太赫兹无线通信的调制方式主要分为直接调制和变频调制两大类。直接调制是直接载波上进行内部或外部调制。变频调制包括光调制之后下变频, 以及基带/中频调制之后上变频 2 种。

文献[9]提出了源输入的直接振幅调制(如图6所示), 并针对太赫兹的高速调制器展开了相关研究。首先, 太赫兹发射机(固体电子源或真空电子源)产生连续的太赫兹载波。其次, 将带有串行数字高清视频信号的基带幅移键控(ASK, amplitude shift keying)调制信号加载到调制器上, 实现对太赫兹载波的直接开关键控(OOK, on-off keying)调制。与此同时, 太赫兹波传输到太赫兹调制器, 使 OOK 调制信号加载到载波上。再次, 调制后的太赫兹波由抛物面镜天线在空间中辐射, 并由另一抛物面镜天线接收。由于 OOK 调制后的太赫兹波可以直接采样, 因此在此系统中可采用太赫兹检波器或太赫兹混频器作为接收端。最后, 对接收到的信号进行解调、数字串行解码等信号处理。

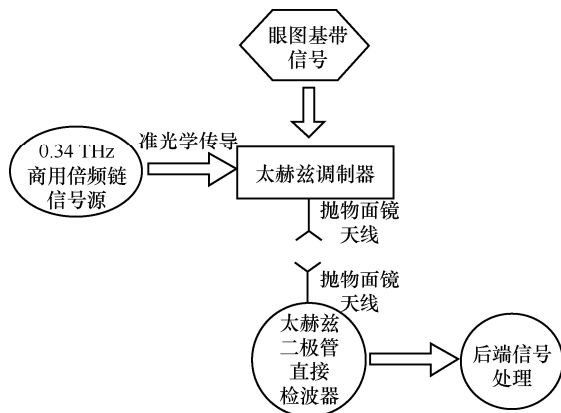


图6 源输入的直接振幅调制

3.1.2 高增益天线

针对太赫兹频段较大的路径损耗问题, 可以通过有效的天线技术和功率控制来解决。天线技术是无线通信中提高信号质量、减少干扰、产生分集和降低发射功率的重要支撑。将发射功率集中在期望的方向上, 可以增强接收机的接收信噪比。较高的发射功率则通过功率放大器来实现, 但是一般情况

下, 太赫兹功率放大器需要消耗比较高的直流功率。因此, 从能耗和性能提升的角度, 采用高效的的天线技术更加适合太赫兹无线通信系统。

太赫兹具有极高的频率、极短的波长, 因此在收发机相同的物理区域内可以部署更多的天线。在太赫兹通信中部署高增益天线, 可以进一步增强对抗高路径损耗的能力。在各种高增益天线中, 相控阵天线由于具有较好的性能及较高的灵活性而备受青睐^[46]。相控阵天线由相同的天线单元组成, 可以在高路径损耗下改善接收信号质量^[47]。

目前相控阵天线的相关研究存在 2 个主要挑战。1) 相控阵天线的各个单元接收信号存在不同程度的时延, 这种时延差异会导致相长重叠或相消重叠。通过引入人为的时延来改变重叠的方向, 即运用波束成形技术可以解决这一问题(波束成形技术见 4.1.1 节)。2) 由于器件精度的要求随频率的增加而增加, 用于太赫兹通信的相控阵天线精度将远远高于用于低频通信的天线精度, 而相控阵天线不精确的相移会导致在期望方向上不完整的信号重叠, 从而导致天线增益的降低, 这对硬件实现提出了更高的要求。文献[47]研究了相控阵相移误差对天线方向性的影响。

3.2 太赫兹通信增强覆盖技术

由于太赫兹信号较大的路径损耗和较差的穿透能力限制了通信性能, 当发射端与接收端之间的实际距离大于太赫兹频段的有效通信范围或者通信链路受到遮挡时, 需要从中继的角度出发, 引入智能反射面(IRS, intelligent reflecting surface)/可重构智能表面(RIS, reconfigurable intelligent surface)^[48-51]、无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)辅助通信, 增强太赫兹通信覆盖范围。

3.2.1 IRS/RIS 辅助通信

由于 IRS 与 RIS 在外形、工作原理、用途等方面相似, 因此本文只对 IRS 的相关原理和特性展开介绍。

IRS 是由大量低成本、相位可调的无源反射元件组成的平面阵列, 可以显著提高无线通信系统的能效和频谱效率^[52]。IRS 的每个元件接收来自发射机的叠加多路径信号, 然后将振幅和(或)相位可调的组合信号从单一点源散射。相位调整通过 IRS 控制器执行, 并在 2 种工作模式之间切换, 即用于环境感知的接收模式(如信道状态信息估计)和用于反射信号的反射模式^[53]。具体地, IRS 控制器对

同一无源阵列进行周期性传感，然后根据学习到的传播环境，动态调整每个反射元件的相移。因此，通过适当调整 IRS 中所有元件的相移，反射信号可以在期望的接收端增加相干性以提高接收信号的功率，或者在非期望的接收端进行破坏以避免干扰，以此增强无线通信系统的安全性和私密性^[54]。

相比大规模 MIMO 技术，由于 IRS 所有反射元件的相移都可调，IRS 不需要使用有源发射机就可以实现信号增强和干扰抑制的功能，降低系统能耗。相比传统的放大转发 (AF, amplify forward) 中继^[55]，IRS 将接收到的信号通过无源阵列进行反射，这种方式没有自干扰，也不会产生发射功耗^[56]。此外，由于 IRS 具有轻量级的特点，因此它们可以很容易附着在墙上或天花板上，或者移除，这为实现提供了高度的灵活性和卓越的兼容性^[57]。

所有这些优点使 IRS/RIS 成为提高未来一代无线网络性能的一个有吸引力的解决方案，特别是在体育馆、购物中心、展览中心、机场等用户密度高的室内应用场景中具有巨大的前景。

目前，IRS/RIS 辅助的太赫兹通信，主要研究的场景为室内/室外 LoS 路径不可得的 IRS/RIS 辅助通信^[58-61]，以及联合 LoS 路径和 IRS/RIS 辅助链路的通信^[53,62-66]，其系统模型如图 7 所示。

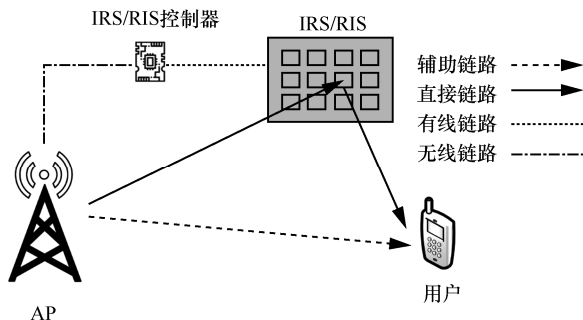


图 7 IRS/RIS 辅助的太赫兹通信

通过联合优化发射端的发射波束成形矩阵和 IRS/RIS 的反射矩阵（相移矩阵），实现最大化和速率/最大化接收信号功率、最大化加权和速率及最小化总发射功率^[58,61,64,66]。同时在物理层安全上，最大限度地提高保密速率和最小化安全传输功率^[62-63]。文献[60]对比了同一条件下 IRS 与中继系统的性能。同时以上研究都是基于 IRS/RIS 反射元件的连续相移（比较理想状态），但由于硬件的限制，实际实现起来比较困难。因此针对离散相移（有限数目相移）IRS/RIS 的研究，文献[58-59,65-66]更加符合实

际运用的情况。

3.2.2 UAV 辅助通信

UAV 以其自主性、灵活性和适应性在无线通信系统中显示出了极大优势，并得到了广泛的应用。UAV 被认为是空中基站/中继，可以被优化放置以避免障碍物，并且通过建立与地面用户的视距连接来支持超可靠和低时延的通信^[67]。由于在空中特定位置按需部署的能力，使它可以提供潜在的高容量无线服务。此外，IRS 具有相位可调、无源反射、轻量级等优势。因此，可将 IRS 与 UAV 联合，将 IRS 附着在 UAV 表面，以此构建太赫兹室外可移动辅助通信链路，缓解通信距离有限和易受遮挡问题，进而提高通信系统的可靠性与实用性。具体模型建立如图 8 所示。

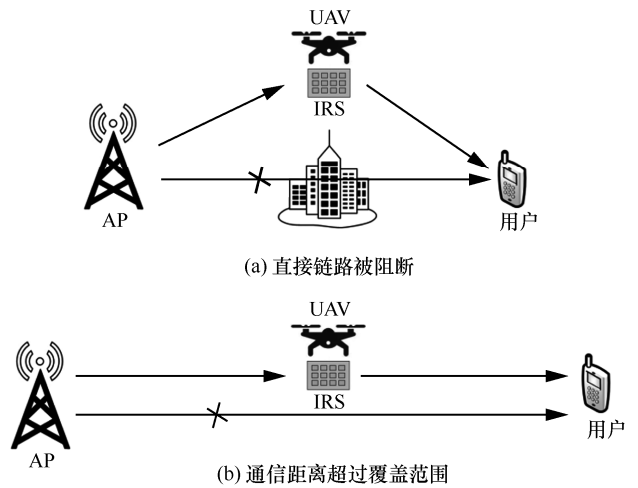


图 8 UAV 和 IRS 辅助的太赫兹通信

当用户与接入点 (AP, access point) 之间 LoS 路径被遮挡时，附有 IRS 的 UAV 可以通过调整位置来建立辅助通信链路，并且随着用户的移动，无人机也动态调整位置，以此提供高性能的通信辅助。当用户与 AP 的距离超出太赫兹通信范围时，也可以通过 IRS 与 UAV 联合的方法来应对。值得注意的是，虽然这与 IRS 中思路类似，但是相比之下，由于可以动态调整 UAV 位置，使 AP、用户与 UAV 在同一条直线上，因此图 8 所示的系统可实现的通信覆盖范围更广。

4 多用户复杂通信场景

在通信网络系统中，除了简单的点到点通信外，还涉及多用户的复杂通信场景。接下来，本文分析了点到多点通信场景，以及多点到多点通信场景。

4.1 点到多点通信

由于太赫兹波束具有极高的方向性与高路径损耗，引入波束成形技术可以集中发射功率，提高无线通信的效率。同时，不同用户由于到发射端的距离不同，可通信的频段也不同，因此引入资源分配技术，也可以优化无线资源的利用效率。

4.1.1 波束成形技术

波束成形需要发射端为阵列天线，通过改变与每个天线连接的移相器的相位，利用波的干涉原理，使整个天线阵列感应出一个或几个指定方向的主波瓣，即将电磁波能量集中在某个或某几个指定的方向^[68]。这可以对抗太赫兹通信中高路径损耗及阵列天线存在的时延差异问题。同时波束成形技术形成的高增益波束，可以减少用户设备之间的信号干扰。

较早使用的波束成形技术有数字波束成形和模拟波束成形。前者需要的射频链数与天线数相等，这在天线数量极高的太赫兹通信系统中，会造成硬件制作造价高昂及系统运行的巨大能耗^[69]。后者只需要一根射频链控制所有的天线，但这会造成系统性能的严重不足，如数据速率和频谱效率不够高。因此，有学者提出将数字波束成形和模拟波束成形结合，由此得到了混合波束成形。其在以上2种技术中进行了折中，在硬件成本和系统能耗可接受的同时，满足通信性能的要求^[70-73]。混合波束成形的核心思想是将全数字预编码器分解成一个大尺寸的模拟波束成形器（通过模拟电路实现）和一个小尺寸的数字波束成形器（需要少量射频链）。混合波束成形的设计需要假设终端接收到了完美的信道状态信息，这在算法中体现为已知信道矩阵，设计发射端波束成形矩阵和接收端的解码矩阵。

现有的混合波束成形结构大多在模拟波束成形部分采用移相器网络，射频链通过移相器与天线阵列相连^[74]。为了进一步降低能耗，一种用开关网络代替移相器网络的体系结构被提出，这种结构由于波束选择的限制，降低了系统的硬件复杂度^[75-76]。其中，模拟预编码部分由逆变器和开关网络实现并连接到子阵列，数字预编码部分具有少量的射频链（包括模数转换器、混频器等）。

4.1.2 基于距离的自适应资源分配

太赫兹通信频段为0.1~10 THz，超高的通信频率使太赫兹通信不仅经历极大的自由空间损耗，还遭受信号传播过程中分子吸收带来的能量损耗。显

然，太赫兹通信频段应选择在没有遭受分子吸收的频段。在这些频段进行通信时，路径损失会相对较小，这些通信频段就称为传输窗。太赫兹频段传输窗带宽各不相同且各个传输窗频谱资源丰富，能完全满足全球无线通信设备所需要的频谱资源^[77]，根据ITU-R P.676-9建议书及自由空间损耗公式，太赫兹频段路径损耗如图9所示。因此，在多用户接入的场景中如何对传输窗资源进行合理划分利用成为目前的研究热点。

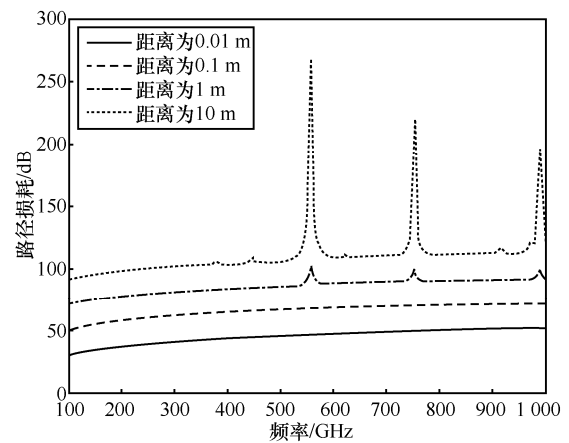


图9 路径损耗

文献[78]发现传输窗的大小不仅与频率有关，还与通信距离有关。具体地，通信距离越远，传输窗就越小，由此文献[4,78-79]提出了距离感应的多载波（DAMC, distance-aware multi-carrier）调制。令每个子传输窗带宽为1 GHz，按照通信距离从远到近分配传输窗中从中心到两边的子传输窗通信频段。其中，文献[4,78-79]分别研究了单发送端多接收端、单发送端多接收端且接收端动态接入的场景，DAMC调制一定程度上增大了太赫兹通信距离。为了进一步抵抗太赫兹路径损耗，增大通信距离，利用MIMO混合波束调制是太赫兹通信发展的一项重要技术。文献[22-23]结合MIMO混合波束调制和DAMC调制，进一步增大通信距离，且相比于文献[4,78-79]，文献[22-23]不限定子传输窗的带宽，且允许较远距离的通信使用靠近中心的子传输窗，调制更加灵活，效率更高。

4.2 多点到多点通信

近年来，由于移动通信和移动互联网技术的飞速发展，智能无线设备的技术及数量都呈现出显著增长。因此网络中的用户间干扰与协同变得极其突出。针对这个问题，点对点定向组网技术和媒体访

问控制 (MAC, media access control) 层及上层架构重新设计在多点到多点通信场景中极其重要。

4.2.1 点对点定向组网技术

由于太赫兹波束比较窄,且在传输过程中会产生严重的路径损耗,因此在太赫兹无线通信系统中部署全向天线显得不适用,原因是全向天线易受干扰,且干扰强度大。此外,由全向天线实现的全向组网技术不能满足快速发现网络节点、完成全向组网、节约系统能耗等要求^[9]。相反,定向天线的使用具有提高网络吞吐量和降低能量损耗的能力,能提供更长的传输距离和更高的数据传输速率^[80]。通过限制能量在期望区域的分散和检测,有效地减少了信号在不必要方向上的干扰,且由于能同时调度多个节点对的传输,大大提高了空间重用的能力^[81-82]。基于以上多重考虑,在太赫兹无线通信系统中,需要部署定向天线完成点对点定向组网。

对于定向天线自组网,如果需要通信的 2 个节点的定向天线不指向对方,通信链路就不能建立。因此,节点应该首先发现周围的邻居,获取邻居的位置,并在网络中保留自己的通信,这个过程称为邻居发现^[83-84]。邻居发现是建立网络节点间连接的关键初始步骤,节点应该尽可能快地发现邻居,由此允许其他协议(如拓扑控制、媒体访问和路由协议)快速执行,使系统保持较高的能效。邻居发现算法可分为非盲算法和盲算法。在非盲算法中,邻居的位置信息可以通过 GPS 提前获得;在盲算法中,邻居的位置信息通过节点对网络中各个天线方向的扫描来获取^[85]。

考虑到节点对邻居没有任何先验知识,即使使用全向天线,邻居发现也不是一件容易的事情。在定向天线的网络中,这一点更具挑战性,因为节点必须将天线对准邻居所在位置,才能发送或接收数据包。因此,使用定向天线的邻居发现算法的效率不仅取决于节点发送和接收的频率,还取决于节点的方向和波束宽度等天线特性。

同时,由于太赫兹频段下信号易被阻断,以及传输距离有限,因此室外场景和室内场景的组网会存在一定程度的差异。

由于太赫兹频段有限的传输距离,因此可以将其应用到室内通信场景,如无线个人区域网(WPAD, wireless personal area network)和无线局域网。但是相比室内环境,室外环境中对太赫兹通信产生干扰

的因素更多。且在室外环境中,需要达到的通信距离往往会比在室内环境中更远。因此,相比低频通信,室外环境中的远距离太赫兹通信更具挑战性。

综上所述,太赫兹频段下的点对点定向组网技术极其重要,并且需要根据场景条件进行区分设计,以最大限度地满足通信系统的性能。

4.2.2 MAC 层及上层架构重新设计

由于太赫兹频段严重的路径损耗,有限的发射功率与极高的数据速率,现有的 MAC 层及上层协议在太赫兹频段不再适用,需要重新设计满足太赫兹频段的协议及网络部署方案。

对于低频系统的可用 MAC 解决方案不能直接用于太赫兹频段,主要是因为它们不能捕获太赫兹信道的特性、太赫兹通信和设备的能力。

而在毫米波系统中,如 IEEE 802.11ad 和无线 HD (high definition),使用准全向天线模式来发现和发送信号。但由于太赫兹更强的方向性与所需的更高天线增益,需要强制使用射频波束成形,因此毫米波系统中的方案不能满足太赫兹天线增益要求^[8]。

由于定向传输及太赫兹信道和物理层的特性,增加了 MAC 设计的难度。虽然,通过使用定向天线,节点可以只接收来自特定期望方向的信号,使接收节点能够避免来自干扰用户的干扰,从而提高抗干扰的能力。但是,由于选择性地接收信号,节点 A 可能不知道其他节点(如节点 B)正在尝试与它进行通信。节点 B 没有收到来自节点 A 的响应,会继续重传,因此无效的控制数据在传输中占用信道容量。并且,定向传输由于其更大的传输范围,可能会潜在地对邻近区域的通信产生干扰。

目前已经有一部分研究设计了用于太赫兹频段的 MAC 协议^[86-93]。文献[86]中的太赫兹频段 MAC 协议利用转向天线来克服收发机之间的“听不见”问题。在文献[87]中,提出了一种用于太赫兹通信的角分复用的 MAC 协议。随着多无线电收发技术的发展,通过分离控制面和数据面工作频率来实现控制面和数据面之间的解耦,是宽带网络中 MAC 设计的一种新颖而有吸引力的方法。这个想法已经被用于毫米波通信^[88-89]和太赫兹系统^[90]。文献[91]提出了一种分布式太赫兹网络中的多无线电辅助的 MAC 层设计方案。在第一阶段,节点使用全向的低频段无线电(如 2.4 GHz 或 5 GHz)交换控制信息,建立网络关联。在第二阶段,基于对

AoA 的处理,启动超高速数据传输。同时在未来的网络系统中,会出现低频段和高频段通信共存的情况,由于不同的数据传输速率、网络容量及发起请求服务要求,需要各个频段协同,最大化整个网络的能效。由此,文献[93]描述一个传统的微波、毫米波和太赫兹共存的网络体系结构,设计了一种 MAC 协议,用于在频段之间切换,进行数据传输。

不仅如此,太赫兹信号易被阻断且经历较高的路径损耗,通信链路存在着极高的不可靠性风险。因此应该结合太赫兹频段的具体特性,研究新的错误控制机制(例如编码或重传),开发新的网络策略来提高覆盖率,支持无缝连接。

5 未来研究方向

前面描述了太赫兹频段的多个优势,通过在该频段进行通信有望有效缓解日益紧张的频谱资源和当前无线系统的容量限制。本节列举了太赫兹通信的未来几个研究方向,包括太赫兹传播信道模型的标准化、太赫兹通信器件、太赫兹通信的安全、基于太赫兹的边缘计算、未来通信系统中高低频共存、机器学习辅助的太赫兹通信和太赫兹频段下的室内定位和追踪。

5.1 太赫兹传播信道模型的标准化

根据调研,目前还没有公认的太赫兹传播模型。因此,在未来的工作中,极大部分工作需要聚焦在这个问题上。由于室内、室外环境考虑的因素各有不同,因此针对太赫兹的传播模型需要结合具体场景考虑。

如前所述,目前有2种方法得到信道传播模型,即基于射线追踪或射线发射方法准确捕获太赫兹波的传播现象,得到确定性信道模型,以及收集平均环境影响,基于随机过程和随机分布理论建立的太赫兹统计信道模型。前者可以提供比较精确的结果,但计算量较大,可扩展性不好。后者具有极大的可移植性,总的工作量可以大幅度降低,但由于结果是基于经验测量得到的,因此,准确性不高,不能显示出具体通信场景的特有特征。

由于以上2种建模方法各有优缺点,文献[19]提出将2种方法结合,以此在计算量和准确性上进行折中。例如,在太赫兹里面的主要路径,如直射和反射路径通过确定捕获建模方法来捕获真实的波传播,而其他路径,如折射路径和衍射路径通过统计方法建模。这种方案是合理的,因为在太赫兹

传播的过程中,主要是通过直射和反射路径传输,即使其他路径的统计存在较小误差,也不会对最后的结果产生很大影响。

5.2 太赫兹通信器件

作为新的频谱资源,太赫兹通信应用的发展极大地依赖于太赫兹器件的创新和突破;同时,太赫兹通信应用也成为太赫兹器件发展的最大驱动力之一。目前的太赫兹器件还不足以满足超高性能的太赫兹通信技术要求,需要继续突破。

首先,太赫兹射频器件的发射功率有限,这制约了传输距离的提升。以太赫兹固态器件为例,工作在0.2 THz以下的射频功放输出功率处于百毫瓦水平,工作在0.2 THz以上的射频功放输出功率处于十毫瓦水平,均不足以满足室外较远距离传输的功率要求。

然后,由于太赫兹信号的传输损耗大,需要太赫兹天线具有较高的增益。目前的高增益太赫兹天线主要采用反射面天线技术,不能实现灵活的波束成形,限制了太赫兹通信的宽带移动接入应用。因此,太赫兹相控阵列天线是迫切需要突破的技术难题,这需要从材料、器件和加工工艺等多个方面开展创新研究和技术攻关。

最后,太赫兹核心芯片的发展对于太赫兹通信规模化应用至关重要。第六代移动通信技术(6G, sixth-generation mobile communication network)等应用对太赫兹通信的小型化、低功耗和低成本都提出了高要求。目前的太赫兹器件体积较大、集成度不高,而成熟的硅基芯片在太赫兹高频段的工作性能尚不能满足通信系统要求,需要探索发展新的半导体材料和集成电路工艺。

5.3 太赫兹通信的安全

安全性是整个通信系统中重要的支撑,具有不可替代的作用,因此太赫兹安全通信的研究极具现实意义与价值。

太赫兹通信有限的传输距离和高定向的窄波束,使太赫兹频段在保密通信系统中具有独特的优势^[19,94-96]。与较低频率相比,这种技术的主要优势是,攻击者为了解码数据,必须处在发射波束的范围内^[96],而攻击者很难从较窄的太赫兹波束中进行窃听^[97],这保证了消息的机密性。因此,传输数据的安全性不仅可以通过适当的加密方案来保证,还可以通过网络本身的几何形状来加强。另一方面,太赫兹通信具有超高可用带宽,可以

很好地利用扩频技术、跳频技术来对抗干扰攻击，这增大了攻击者阻塞系统的难度^[98]。文献[98-99]已经表明，使用窄波束和物理层安全特定的编码可以极大地降低数据在 LoS 和 NLoS 条件下被窃听的概率。文献[100]介绍了太赫兹安全链路运用到民用领域的例子，即从带有无线身份验证的自动取款机 (ATM, automatic teller machine) 进行数据下载的 kiosk 系统。

考虑一个简单的物理层安全问题。与传统的窃听信道模型相比，系统引入了 IRS，可以根据环境的变化通过被动波束成形动态地调整相位，在期望用户端增加相干性以提高接收信号的功率，而在窃听端进行破坏以增强安全性和私密性，以对抗通信中存在的安全性问题。图 10 所示的 IRS 辅助的物理层安全系统模型只是一个简单例子，太赫兹通信安全考虑的因素更复杂，需要长期深入研究。

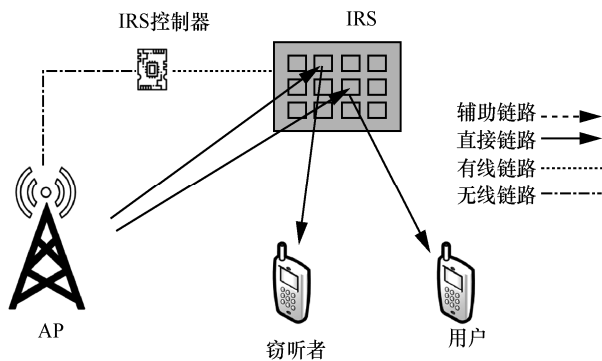


图 10 IRS 辅助的物理层安全系统模型

5.4 基于太赫兹的边缘计算

根据 IDC (International Data Corporation) 预测，到 2020 年全球数据总量将大于 40 ZB，而物联网产生 45% 的数据都将在网络边缘处理。以云计算模型为核心的集中式处理模型将所有数据通过网络传输到云计算中心，利用云计算中心超强的计算能力来集中式解决计算和存储问题。但在万物互联的背景下，新兴应用对响应时间、用户隐私性与数据量都有极高要求，这种集中式的处理方案显得不足。基于以上原因，边缘计算受到学术界和工业界的高度重视。边缘计算集合了数据采集、处理、执行三大能力，避免了数据上传下达所产生的时延弊端，提升了本地物联网设备的处理能力和响应速度，很好地解决了传统云计算中心处理方案存在的问题。

同时，在 6G 网络中，小区规模会呈现出变小的趋势，移动边缘计算 (MEC, mobile edge com-

puting) 配置在小区接入点，离用户更近，可以更好地满足本地用户的需求。以 VR/AR 为例，为了给用户提供沉浸式的体验，核心处理器需要进行视频流高速处理。文献[101]粗略估计了模拟人眼分辨率需要的视频流的传输速率，若每秒传输 120 帧图像，每帧图像的分辨率为 6 400 万像素，通过将每个彩色像素存储在 36 位比特位中，并使用 H.265 HEVC 编码进行视频压缩，按照最大 1:600 视频压缩率，需要高达 1 Gbit/s 的传输速率来保证质量。若要实现 360 度全向 VR 体验则需要更高的数据传输速率。显然，现有通信频段不足以支撑这些应用。

由于具有超高带宽，太赫兹通信可以提供太比特每秒的传输速率，有条件提供超高数据传输速率、超低时延响应的通信链路。因此，边缘计算与太赫兹通信相结合，有潜力满足 VR/AR 等应用对无线通信系统的超高要求。另一方面，由于数据速率高和能耗大等问题，太赫兹通信对移动端设备的配置提出了更高的要求。考虑到移动端设备物理尺寸的限制，移动终端的计算能力、电池容量及存储能力有限，存在不足以满足未来超高数据量的计算与交互的情况，因此，通过将任务卸载到 MEC 端进行处理，可以有效降低移动终端的负担。文献[102]对基于太赫兹通信的移动边缘计算进行了分析，初步展示了边缘计算与太赫兹结合能带来的优势。

5.5 未来通信系统中高低频共存

由于极高的数据传输速率，使太赫兹在未来无线通信系统中具有难以替代的地位。但是由于其极大的路径损耗、有限的传输距离、高精度的器件等需求，完全部署太赫兹通信也不是一个明智的选择。低频通信由于较远的通信距离、较低的器件精度和硬件成本，在短时间内在通信系统中的部署不可或缺。例如，基站将系统信息广播给众多用户，此时传统的低频通信更加适合。因此，在下一代无线通信系统中，太赫兹、毫米波等高频段和传统微波频段将共存。由于在带宽资源、传输速率、响应速度等方面的极大不同，需要针对不同应用提供不同需求的服务。因此，低频通信和高频通信需要紧密协作，最大化通信系统的性能。

5.6 机器学习辅助的太赫兹通信

将太赫兹技术用于无线通信，系统中会产生远远高于当前无线通信系统的数据，网络和服务的管理会面临极大挑战，如网络流量和资源管理、大数

据管理和能源效率。因此，需要新技术和策略以更高效、更智能的方式应对这些挑战。

机器学习是人工智能辅助网络研究的一个新兴领域，是管理大量数据的有效解决方案之一^[103-104]。机器学习可以帮助解决存在的管理挑战，提供更高、更智能的网络应用监控和管理水平，提高运行效率，进一步使太赫兹通信系统智能化^[105]。机器学习从大量原始数据中提取有价值信息^[106-107]，形成建议或者合理预测，巧妙地控制和优化无线网络。此外，机器学习可以关联多个数据源并找到相关内容，还能揭示以前没有发现的相互关系和依赖关系^[108]。

机器学习算法可以简单地分为监督学习、无监督学习和强化学习，监督/无监督表示数据库中是否有带标签的样本。之后受行为心理学启发，一种新类型的机器学习算法——强化学习出现了。不同于前2种方法，强化学习不需要预先给定任何数据，是智能体（agent）以“试错”的方式进行学习，通过与环境进行交互，获得学习信息并更新模型参数，目标是使 agent 获得的奖励最大。

机器学习方法成功应用的典型问题/场景包括图像恢复和识别、自然语言处理、网络安全、客户细分、预测维护（如工业工厂的机器）等^[105]。在关于机器学习辅助的太赫兹通信的研究中，可以针对2个方面，即高效的资源分配技术和先进的波束成形技术。

5.6.1 高效的资源分配技术

随着无线通信系统的快速发展，大量设备将被连接到网络，它们在连接时间和方式、连接优先级和连接持续时间方面，有着不同的通信需求。另一方面，在有限资源的条件下，进行高效的资源分配策略是提高通信系统频谱利用率和功率利用率的关键。因此利用机器学习进行优化资源配置是非常有利的，允许网络根据特定用户的位置、时间和特定服务需求等参数来满足预期的需求。

5.6.2 先进的波束成形技术

如前所述，波束成形是下一代通信系统中提高覆盖率和数据速率的一个重要技术组成部分。具有多个天线的波束成形系统可以同时产生多个波束，本节将机器学习辅助的波束成形技术研究分为两大场景：固定或低迁移率无线系统和支持高机动性无线系统。

1) 固定或低迁移率无线系统。由于太赫兹频段

的高路径损耗，需要采用定向传输，高效的波束对准是实现成功传输的关键。现有的混合波束成形方案大多需要复杂的移相网络^[109]，每个射频链通过高分辨率移相器连接到所有天线^[74,110]，虽然这种架构可以提供高设计自由度来实现接近最优的性能，但它需要数百甚至数千个高分辨率移相器，硬件成本高，能耗高。为了解决这个问题，两类方案被提出。第一类是直接采用有限分辨率移相器代替高分辨率移相器^[111-112]。虽然可以在不造成明显性能损失的情况下降低移相器网络的能耗，但仍需要大量的移相器，且能耗较大。第二类是利用开关网络代替移相网络，虽然显著降低硬件成本和能耗，但也存在明显的性能损失^[75-76,113]。

因此，可以结合机器学习算法，研究高效节能的混合波束成形结构。对于混合波束成形的每次选择，可以将其视为机器学习中的一个训练过程，其中训练目标是预测预编码器与目标预编码器之间的交叉熵损失函数，并使预测值与实际值之间的相对误差达到最小^[67]。

2) 支持高机动性无线系统。在太赫兹系统中支持高机动性可以实现广泛的重要应用，例如车辆通信和 AR/VR。在目前毫米波车载通信中，建立和跟踪波束是一项具有挑战性的任务，目前已取得许多相关的研究^[114-117]。文献[114]利用 AoA 信息，通过基于深度和机器学习的模拟波束选择方案来实现多用户 MIMO 毫米波通信系统的上行链路。文献[115]建议利用机器学习分类过去的波束训练数据，利用接收车辆及其邻近车辆的位置和类型来学习最佳波束对指数。文献[116]研究了一种低训练开销的毫米波车辆传输智能波束跟踪方案。具体地，通过设计一个机器学习预测模型，利用过去的信道状态信息有效预测未来信道。使用这种预测信道状态信息，基站减少了信道估计的次数，节省了导频的开销。

然而，相比毫米波车载通信，太赫兹频段的高机动性无线系统的研究更加困难。要在实践中实现这一点，需要克服几个挑战。1) 窄波束的使用和太赫兹信号对阻塞的敏感性极大地影响了高机动链路的覆盖和可靠性。2) 在密集的太赫兹部署中，具有高移动性的用户需要更加频繁地在基站之间切换，这与关键控制和时延开销相关。3) 在大型天线阵太赫兹系统中，确定最佳波束成形向量需要相当大的开销，这对移动通信的效率有很大影响。因此，

为了减少开销, 实现更加精确的对准, 并与移动用户建立稳定的链路, 集成机器学习和波束成形技术可以帮助在太赫兹通信中实现高移动性的应用^[118]。

5.7 太赫兹频段下的室内定位和追踪

由于太赫兹频段的高方向性, 一旦信号发射方向产生偏差, 接收用户就不能收到信号, 由此造成通信失败及能量的不必要损耗。因此, 在传输信号之前, 收发端需要知道彼此的位置, 以调整最好的天线角度收发信息^[119]。同时, 智能手机、平板电脑等便携设备日益普及, 并且集各种服务于一体。这些可移动设备可以支持办公、在线视频播放、学习、网购、实时交流等。因此, 未来太赫兹无线通信系统中, 很大部分需要考虑的服务对象是携带智能设备的用户。由于系统中用户数量庞大, 并且具有高移动性与随机性, 因此需要对这些便携智能设备进行追踪, 以实现高效地无线通信。

虽然全球定位系统 (GPS, global positioning system) 可以将用户定位在开放空间下 4.9 m 以内, 但在城市峡谷、室内等障碍物环境下, GPS 定位精度较差^[120]。当前室内定位研究主要依赖超宽带和毫米波系统, 然而, 超宽带和毫米波带宽有限, 在室内进行定位时会出现拥挤、干扰大、定位精度不够等问题^[121]。太赫兹频段由于其丰富的带宽资源, 可以极大地缓解上述问题。其次, 太赫兹波束具有高方向性, 使用定向天线可以获得高精度的角度信息, 为定位的准确提供有力的保障。最后, 太赫兹支持超高数据传输速率, 极大地降低了定位追踪过程中信息交互的时间, 这使太赫兹尤其适用于前文提到的高移动性场景。

6 结束语

太赫兹通信由于极高的数据速率与巨大带宽, 在短距离超高速无线通信方面具有巨大的应用前景, 能够解决当前无线通信系统面临的问题, 并满足各种新兴应用的超高要求。发展太赫兹技术成为了学术界和工业界的研究热点。本文简要介绍了太赫兹信道的研究现状, 包括当前太赫兹传播模型、太赫兹信道测量和太赫兹信道估计。基于太赫兹信道的基础上, 首先, 针对单用户的简单通信场景, 分析了其中存在的问题, 并从收发端和中继这 2 个方面出发, 列举了可能的解决方案。更进一步地, 将通信场景复杂化和实际化, 描述了多用户通信场景中可能面临的问题及解决方案。最后, 基于前面

的调研工作, 展望了未来太赫兹频段可能的研究方向, 这些问题将决定未来通信网络中太赫兹系统的设计和部署。相信随着对太赫兹技术深入全面的研究, 最终太赫兹通信可以实现超高速无线通信。

参考文献:

- [1] RANGAN S, RAPPAPORT T S, ERKIP E. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(3): 366-385.
- [2] HEATH R W, GONZALEZ-PRLECIC N, RANGAN S, et al. An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2016, 10(3): 436-453.
- [3] AKYLIDIZ I F, JORNET J M, HAN C. TeraNets: ultra-broadband communication networks in the terahertz band[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(4): 130-135.
- [4] HAN C, BICEN A O, AKYILDIZ F. Multi-wideband waveform design for distance-adaptive wireless communications in the terahertz band[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(4): 910-922.
- [5] LIN C, LI G Y. Energy-efficient design of indoor mmWave and sub-THz systems with antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(7): 4660-4672.
- [6] HUQ K M S, BUARI 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.
- [7] JORNET J M, AKYILDIZ I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(10): 3211-3221.
- [8] PETROV V, PYATTAEV A, MOLTCHANOV D, et al. Terahertz band communications: applications, research challenges, and standardization activities[C]//2016 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2016: 183-190.
- [9] CHEN Z, MA X, ZHANG B, et al. A survey on terahertz communications[J]. *China Communications*, 2019, 16(2): 1-35.
- [10] FENG L, YANG Q, PARK D, et al. Energy efficient nano-node association and resource allocation for hierarchical nano-communication networks[J]. *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, 2018, 4(4): 208-220.
- [11] 边明明, 王世涛, 雷利华, 等. 太赫兹技术及空间应用国内外发展现状研究[J]. *空间电子技术*, 2013, 10(4): 80-84.
BIAN M M, WANG S T, LEI L H, et al. Study of the domestic and abroad development status of THz technology and its space application[J]. *Space Electronic Technology*, 2013, 10(4): 80-84.
- [12] 雷红文, 王虎, 杨旭, 等. 太赫兹技术空间应用进展分析与展望[J]. *空间电子技术*, 2017, 14(2): 1-7, 12.
LEI H W, WANG H, YANG X, et al. Analysis and progress of terahertz techniques applied in space science[J]. *Space Electronic Technology*, 2017, 14(2): 1-7, 12.
- [13] 刘丰, 朱忠博, 崔万照, 等. 太赫兹技术在空间领域应用的探讨[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2013, 11(6): 857-866.
LIU F, ZHU Z B, CUI W Z, et al. Application of terahertz techniques in space science[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic In-*

- formation Technology, 2013, 11(6): 857-866.
- [14] ITU-R P.676-9, Attenuation by atmospheric gases, ITU-R Recommendation[S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2012.
- [15] KÜRNER T, PRIEBE S. Towards THz communications - status in research, standardization and regulation[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2013, 35(1): 68.
- [16] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [17] 王承祥, 黄杰, 王海明, 等. 面向6G的无线通信信道特性分析与建模[J]. *物联网学报*, 2020, 4(1): 19-32.
WANG C X, HUANG J, WANG H M, et al. 6G oriented wireless communication channel characteristics analysis and modeling[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(1): 19-32.
- [18] HAN C, BICEN A O, AKYILDIZ I F. Multi-ray channel modeling and wideband characterization for wireless communications in the terahertz band[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(5): 2402-2412.
- [19] HAN C, CHEN Y. Propagation modeling for wireless communications in the terahertz band[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(6): 96-101.
- [20] 陈琤, 徐亮, 张言明, 等. 超电大复杂目标太赫兹散射特性建模微波方法延拓研究[J]. *雷达学报*, 2018, 7(1): 108-118.
CHEN H, XU L, ZHANG Y M, et al. Theoretical extension of a microwave EM method for predicting the terahertz scattering of electrical [J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 108-118.
- [21] LIN C, LI G Y. Indoor terahertz communications: how many antenna arrays are needed[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(6): 3097-3107.
- [22] LIN C, LI G Y. Distance-aware multi-carrier indoor terahertz communications with antenna array selection[C]//2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication. Piscataway: IEEE Press, 2014: 522-526.
- [23] LIN C, LI G Y. Adaptive beamforming with resource allocation for distance-aware multi-user indoor terahertz communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(8): 2985-2995.
- [24] PRIEBE S, KURNER T. Stochastic modeling of THz indoor radio channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(9): 4445-4455.
- [25] PIESIEWICZ R, JANSEN C, MITTLEMAN D, et al. Scattering analysis for the modeling of THz communication systems[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(11): 3002-3009.
- [26] KIM S, ZAJIC A. Statistical modeling of THz scatter channels[C]//2015 9th European Conference on Antennas and Propagation. Bruxelles: EurAPP, 2015: 1-5.
- [27] KHALID N, ABBASI N A, AKAN O B. 300 GHz broadband transceiver design for low-THz band wireless communications in indoor internet of things[C]//2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). Piscataway: IEEE Press, 2017: 770-775.
- [28] KIM S, ZAJIC A. Statistical characterization of 300-GHz propagation on a desktop[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(8): 3330-3338.
- [29] GUAN K, PENG B, HE D, et al. Channel sounding and ray tracing for train-to-train communications at the THz band[C]//2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Bruxelles: EurAPP, 2019: 1-5.
- [30] GUAN K, PENG B, HE D, et al. Measurement, simulation, and characterization of train-to-infrastructure inside-station channel at the terahertz band[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(3): 291-306.
- [31] KHALID N, AKAN O B. Experimental Throughput Analysis of Low-THz MIMO Communication Channel in 5G Wireless Networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(6): 616-619.
- [32] SCHRAM V, MOLDOVAN A, GERSTACKER W H. Compressive sensing for indoor THz channel estimation[C]//2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1539-1546.
- [33] PENG B, JIAO Q, KURNER T. Angle of arrival estimation in dynamic indoor THz channels with Bayesian filter and reinforcement learning[C]//2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). EURASIP, 2016: 1975-1979.
- [34] PENG B, KURNER T. Three-dimensional angle of arrival estimation in dynamic indoor terahertz channels using a forward-backward algorithm[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(5): 3798-3811.
- [35] PENG B, GUAN K, KURNER T. Cooperative dynamic angle of arrival estimation considering space-time correlations for terahertz communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(9): 6029-6041.
- [36] PENG B, GUAN K, Rey S, et al. Power-angular spectra correlation based two step angle of arrival estimation for future indoor terahertz communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(11): 7097-7105.
- [37] GUAN K, PENG B, HE D, et al. Channel characterization for intra-wagon communication at 60 and 300 GHz bands[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 5193-5207.
- [38] GAO X, DAI L, ZHANG Y, et al. Fast channel tracking for terahertz beamspace massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7): 5689-5696.
- [39] GUO Z, WANG X, HENG W. Millimeter-wave channel estimation based on 2-D Beamspace MUSIC method[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(8): 5384-5394.
- [40] GAO X, DAI L, HAN S, et al. Reliable beamspace channel estimation for millimeter-wave massive MIMO systems with lens antenna array[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(9): 6010-6021.
- [41] GAO X, DAI L, ZHOU S, et al. Wideband Beamspace channel estimation for millimeter-wave MIMO systems relying on lens antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(18): 4809-4824.
- [42] HE H, WEN C, JIN S, et al. Deep learning-based channel estimation for Beamspace mmWave massive MIMO systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(5): 852-855.
- [43] ZHU F, LIU A, LAU V K N. Channel estimation and localization for mmWave systems: a sparse bayesian learning approach[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [44] AKUILDIZ I F, JORNET J M. Realizing ultra-massive MIMO

- (1024 × 1024) communication in the (0.06-10) terahertz band[J]. *Nano Communication Networks*, 2016(8): 46-54.
- [45] HAN C, WU Y, CHEN Z, et al. Terahertz communications (teracom): challenges and impact on 6G wireless systems[J]. *arXiv Preprint, arXiv:1912.06040*, 2019.
- [46] GODARA L C. Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(8): 1195-1245.
- [47] PENG B, PRIEBE S, KURNER T. Effects of phase shift errors on the antenna directivity of phased arrays in indoor terahertz communications[C]//2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems. Piscataway: IEEE Press, 2014: 355-359.
- [48] 刘峻峰, 刘硕, 傅晓建, 等. 太赫兹信息超材料与超表面[J]. *雷达学报*, 2018, 7(1): 46-55.
LIU J F, LIU S, FU X J, et al. Terahertz information metamaterials and metasurfaces[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 46-55.
- [49] 张磊, 刘硕, 崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 1-12.
ZHANG L, LIU S, CUI T J. Theory and application of coding metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 1-12.
- [50] 卞建雄. 基于太赫兹超材料反射阵列单元散射特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
BIAN J X. Research on scattering characteristics of reflective arrays based on terahertz metamaterials[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [51] 刘华洋. 基于超材料相移特性的太赫兹波定向反射器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
LIU H Y. Research on terahertz wave directional reflector based on phase transition characteristics of metamaterial[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [52] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): 218.
- [53] CHU Z, HAO W, XIAO P, et al. Intelligent reflecting surface aided multi-antenna secure transmission[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 9(1): 108-112.
- [54] WU Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106-112.
- [55] ZHANG R, LIANG Y, CHAI C C, et al. Optimal beamforming for two-way multi-antenna relay channel with analogue network coding[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(5): 699-712.
- [56] 罗文宇, 刘河潮. 基于可编程无线环境的太赫兹频段多射线信道模型[J]. *通信学报*, 2019, 40(7): 162-168.
LUO W Y, LIU H C. Multi-ray channel modeling for programmable wireless environments in the terahertz band[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(7): 162-168.
- [57] SUBRT L, PECHAC P. Intelligent walls as autonomous parts of smart indoor environments[J]. *IET Communications*, 2012, 6(8): 1004-1010.
- [58] DI B, ZHANG H, LI L, et al. Practical hybrid beamforming with limited-resolution phase shifters for reconfigurable intelligent surface based multi-user communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 4565-4570.
- [59] ZHANG H, DI B, SONG L, et al. Reconfigurable intelligent surfaces assisted communications with limited phase shifts: how many phase shifts are enough[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 4498-4502.
- [60] BJÖRNSON E, ÖZDOĞAN Ö, LARSSON E G. Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward: how large surfaces are needed to beat relaying[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(2): 244-248.
- [61] HAN Y, TANG W, JIN S, et al. Large intelligent surface-assisted wireless communication exploiting statistical CSI[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 8238-8242.
- [62] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [63] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: joint active and passive beamforming design[C]//2018 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [64] GUO H, LIANG Y, CHEN J, et al. Weighted sum-rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, PP(99): 1.
- [65] CHEN J, LIANG Y, PEI Y, et al. Intelligent reflecting surface: a programmable wireless environment for physical layer security[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 82599-82612.
- [66] WU Q, ZHANG R. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, PP(99): 1.
- [67] REN H, LI L, XU W, et al. Machine learning-based hybrid precoding with robust error for UAV mmWave massive MIMO[C]//ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [68] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. *通信学报*, 2016, 37(7): 15-29.
ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(7): 15-29.
- [69] SUN Y, GAO Z, WANG H, et al. Machine learning based hybrid precoding for mmWave MIMO-OFDM with dynamic subarray[C]//2018 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [70] MOLISH A F, RATNAM V V, HAN S H, et al. Hybrid beamforming for massive MIMO: a survey[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(9): 134-141.
- [71] HE S, WANG J, HUANG Y, et al. Codebook-based hybrid precoding for millimeter wave multiuser systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(20): 5289-5304.
- [72] LIU A, LAU V K N. Impact of CSI knowledge on the codebook based hybrid beamforming in massive MIMO[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(24): 6545-6556.
- [73] SOHRABI F, YU W. Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2016, 10(3): 501-513.
- [74] KULKAMI M N, GHOSH A, ANDREWS J G. A comparison of MIMO techniques in downlink millimeter wave cellular networks with hybrid beamforming[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(5): 1952-1967.
- [75] ALKHATEEB A, NAM Y, ZHANG J, et al. Massive MIMO combin-

- ing with switches[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(3): 232-235.
- [76] ARDAH K, FODOR G, SILVA Y C B, et al. A unifying design of hybrid beamforming architectures employing phase shifters or switches[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(11): 11243-11247.
- [77] SHEIKH F, ZARIFEH N, KAISER T. Terahertz band: channel modeling for short-range wireless communications in the spectral windows[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, 10(13): 1435-1444.
- [78] HAN C, AKYILDIZ I F. Distance-aware multi-carrier (DAMC) modulation in terahertz band communication[C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2014: 5461-5467.
- [79] HAN C, AKYILDIZ I F. Distance-aware bandwidth-adaptive resource allocation for wireless systems in the terahertz band[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, 6(4): 541-553.
- [80] XIA Q, JOMET J M. Expedited neighbor discovery in directional terahertz communication networks enhanced by antenna side-lobe information[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 7804-7814.
- [81] WANG Y, WANG Z W, MO X. Study on neighbor discovery and tracking in Ad Hoc network with directional antenna[J]. *Communications Technology*, 2013, 46(2): 82-85.
- [82] ZHANG Z, LI B. Neighbor discovery in mobile Ad Hoc selfconfiguring networks with directional antennas: algorithms and comparisons[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1540-1549.
- [83] TIAN C X, WU K J. Research on strategy of neighbor discovery in Ad Hoc networks using directional antennas[J]. *Measurement and Control Technology*, 2008, 27(12):3-6.
- [84] QIU Y, LI S, XU X, et al. Talk more listen less: energy-efficient neighbor discovery in wireless sensor networks[C]//IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-9.
- [85] HUANG S, LI M, ZHAO L. An intelligent neighbor discovery algorithm for Ad Hoc networks with directional antennas[C]//2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 302-305.
- [86] XIA Q, HOSSAIN Z, MEDLEY M, et al. A link-layer synchronization and medium access control protocol for terahertz-band communication networks[C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-7.
- [87] HAN C, TONG W, YAO X W. MA-ADM: a memory-assisted angular-division-multiplexing MAC protocol in terahertz communication networks[J]. *Elsevier Nano Communication Networks Journal*, 2017(13): 51-59.
- [88] NITSCHKE T, FLORSE A B, KNIGHTLY E W, et al. Steering with eyes closed: mm-Wave beam steering without in-band measurement[C]//2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Piscataway: IEEE Press, 2015: 2416-2424.
- [89] CHANDRA K, PRASAD R V, QUANG B, et al. CogCell: cognitive interplay between 60 GHz picocells and 2.4/5 GHz hotspots in the 5G era[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(7): 118-125.
- [90] YAO X, JORNET J M. TAB-MAC: assisted beamforming MAC protocol for terahertz communication networks[J]. *Nano Communication Networks (Elsevier) Journal*, 2016(9): 36-42.
- [91] TONG W, HAN C. Mra-mac: a multi-radio assisted medium access control in terahertz communication networks[C]//2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [92] PUJOL J C, JORNET J M, PARETA J S. PHLAME: A physical layer aware MAC protocol for electromagnetic nanonetworks[C]//2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway: IEEE Press, 2011: 431-436.
- [93] CACCIAPUOTI A S, SANKHE K, CALEFFI M, et al. Beyond 5G: THz-based medium access protocol for mobile heterogeneous networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(6): 110-115.
- [94] PETROV V, MOLTCHANOV D, JORNET J M, et al. Exploiting multipath terahertz communications for physical layer security in beyond 5G networks[C]//IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2019: 865-872.
- [95] LI B, GAO H, JING X. Mapping millimeter wave propagation to 5G physical layer: a brief review and look forward[C]//2016 16th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). Piscataway: IEEE Press, 2016: 695-699.
- [96] ZHU Y, WANG L, WONG KHEATH R W. Physical layer security in large-scale millimeter wave ad hoc networks[C]//2016 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [97] MA J, SHRESTHA R, ADELBERG J, et al. Security and eavesdropping in terahertz wireless links[J]. *Nature*, 2018(563): 89-93.
- [98] XIAO K, ZHANG S, HE Y. On the secrecy capacity of 5G new radio networks[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, 2018: 1-11.
- [99] WU Y, KHISITI A, XIAO C, et al. A survey of physical layer security techniques for 5G wireless networks and challenges ahead[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(4): 679-695.
- [100] SONG H, HAMADA H, YAITA M. Prototype of KIOSK Data Downloading System at 300 GHz: Design, Technical Feasibility, and Results[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(6): 130-136.
- [101] ELBAMBY M S, PERFECTO C, BENNIS M, et al. Toward low-latency and ultra-reliable virtual reality[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(2): 78-84.
- [102] CHACCOUR C, AMER R, ZHOU B, et al. On the reliability of wireless virtual reality at terahertz (THz) frequencies[C]//2019 10th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [103] 王勇, 周慧怡, 俸皓, 等. 基于深度卷积神经网络的网络流量分类方法[J]. *通信学报*, 2018, 39(1): 14-23.
- WANG Y, ZHOU H Y, DAI H, et al. Network traffic classification method basing on CNN[J]. *Journal on Communications*, 2018, 39(1): 14-23.
- [104] 朱江, 王婷婷, 宋永辉, 等. 无线网络中基于深度 Q 学习的传输调度方案[J]. *通信学报*, 2018, 39(4): 35-44.
- ZHU J, WANG T T, SONG Y H, et al. Transmission scheduling scheme based on deep Q learning in wireless network[J]. *Journal on Communications*, 2018, 39(4): 35-44.
- [105] NGUYEN T T T, ARMITAGE G. A survey of techniques for internet traffic classification using machine learning[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2008, 10(4): 56-76.

- [106]谭俊杰, 梁应敞. 面向智能通信的深度强化学习方法[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(2): 169-181.
TAN J J, LIANG Y C. Deep reinforcement learning for intelligent communications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(2): 169-181.
- [107]沈伟国, 王巍. 基于深度学习的无线网络节点个体识别技术[J]. 通信学报, 2018, 39(S2): 61-65.
SHEN W G, WANG W. Node identification in wireless network based on deep learning[J]. Journal on Communications, 2018, 39(S2): 61-65.
- [108]KIBRIA M G, NGUYEN K, VILLARDI G P, et al. Big data analytics, machine learning, and artificial intelligence in next-generation wireless networks[J]. IEEE Access, 2018(6): 32328-32338.
- [109]GAO X, DAI L, SUN Y, et al. Machine learning inspired energy-efficient hybrid precoding for mmWave massive MIMO systems[C]//2017 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [110]AYACH O E, RAJAGOPAL S, ABU-SURRA S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(3): 1499-1513.
- [111]ZHANG J, HUANG Y, WANG J, et al. Hybrid precoding for wide-band millimeter-wave systems with finite resolution phase shifters[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 11285-11290
- [112]ALKHATTEB A, LEUS G, HEATH R W. Limited feedback hybrid precoding for multi-user millimeter wave systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(11): 6481-6494.
- [113]SAYEED A, BRADY J. Beam-space MIMO for high-dimensional multiuser communication at millimeter-wave frequencies[C]//2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2013: 3679-3684.
- [114]ANTON-HARO C, MESTRE X. Learning and data-driven beam selection for mmWave communications: an angle of arrival-based approach[J]. IEEE Access, 2019(7): 20404-20415.
- [115]WANG Y, KLAUTAU A, RIBERO M, et al. mmWave vehicular beam selection with situational awareness using machine learning[J]. IEEE Access, 2019(7): 87479-87493.
- [116]GUO Y, WANG Z, LI M, et al. Machine learning based mmWave channel tracking in vehicular scenario[C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [117]ZOCHMANN E, VA V, RUPP M, et al. Geometric tracking of vehicular mmWave channels to enable machine learning of onboard sensors[C]//2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [118]ALKHATEEB A, ALEX S, VARKEY P, et al. Deep learning coordinated beamforming for highly-mobile millimeter wave systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 37328-37348.
- [119]张平, 陈昊. 面向 5G 的定位技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 1-12.
ZHANG P, CHEN H. A survey of positioning technology for 5G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(5): 1-12.
- [120]RAPAPORT S, XING Y, KANHERE O, et al. Wireless communica-

tions and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. IEEE Access, 2019, 7: 78729-78757.

- [121]FAN S, WU Y Z, HAN C, et al. A structured bidirectional LSTM deep learning method for 3D terahertz indoor localization[C]//IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020.

[作者简介]



谢莎 (1994-), 女, 重庆人, 电子科技大学博士生, 主要研究方向为太赫兹通信技术及高效的通信计算一体化技术。



李浩然 (1997-), 女, 河北承德人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为移动边缘计算及未来通信系统中高低频共存问题。



李玲香 (1987-), 女, 湖南邵阳人, 博士, 中南大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为 6G 移动通信、移动边缘计算、无线安全通信技术等。



陈智 (1974-), 男, 四川南充人, 博士, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为太赫兹通信、无线与移动通信、通信抗干扰技术。



李少谦 (1957-), 男, 四川成都人, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为抗干扰通信和宽带无线与移动通信技术。