

智能反射面与太赫兹通信

Discussion on Collaborative Application of
Intelligent Reflective Surface and
Terahertz Communication

协同应用探讨

夏 焯, 吴纯璐 (杭州友声科技股份有限公司, 浙江 杭州 310052)

Xia Zhu, Wu Chunlu (Hangzhou Uusense Technology Inc., Hangzhou 310052, China)

摘要:

太赫兹通信是为6G无线网络提供足够带宽和实现超高数据速率的一种前沿技术,智能反射面是为了缓解太赫兹波段的无线传输脆弱性,通过调整无源反射元件的相位偏移,提高频谱效率、增强覆盖能力的技术。介绍了智能反射面赋能太赫兹通信的关键技术,展望了智能反射面在6G通信网络中的应用方向和面临的挑战。

关键词:

太赫兹通信;智能反射面;6G

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2024.03.013

文章编号:1007-3043(2024)03-0062-07

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Tera Hertz communication is a cutting-edge technology to provide sufficient bandwidth and achieve ultra-high data rates for 6G wireless communication networks. Intelligent reflecting surface is a technology that improves spectral efficiency and enhances coverage capabilities by adjusting the phase shift of passive reflective components to alleviate the vulnerability of wireless transmission in the THz band. It introduces the key technologies of intelligent reflecting surfaces in enabling THz communication, and looks forward to the application direction and the challenges of IRS in 6G communication networks.

Keywords:

Terahertz communication; Intelligent reflective surface; 6G

引用格式:夏焯,吴纯璐.智能反射面与太赫兹通信协同应用探讨[J].邮电设计技术,2024(3):62-68.

1 概述

近年来,6G网络受到越来越多的关注,它将提供更大带宽、更高频谱效率、更高数据速率、更高连接密度、更低延迟、更智能的通信服务。这样的无线网络性能将会推动大量的应用场景,包括但不限于虚拟现实、全息通信、高速无线数据中心、高速返回链路等,而微波和毫米波频段因带宽限制则不能满足该部分新兴应用。

太赫兹(Terahertz, THz)通信被认为是6G无线网络最有前景的技术之一,它拥有从0.1~10 THz的频谱带宽,能够实现从Gbit/s到Tbit/s的超高传输速率。智

能反射面(Intelligent reflecting surface, IRS)本质上是由大量被动反射元素(即元原子)组成的可调谐超表面,由智能反射单元阵列组成,每个智能反射单元能够独立地对入射信号进行某些改变,包括相位、振幅、频率、甚至极化等。当直达信号质量变差时,IRS能够智能配置无线环境,帮助发射机和接收机进行信息传输,利用IRS的便利部署能很好地避免视距(line-of-sight, LoS)链路中存在的严重损耗,可以让苛刻的覆盖环境被太赫兹信号覆盖到。将IRS安装在通信环境中,使发射机和接收机之间的无线信道可控制、可重构,也提高了系统容量,降低了功耗,提供了灵活性和与其他无线系统的兼容性,可以很容易地扩展到不同的应用场景,包括遥感、精确定位和空间通信等。在IRS辅助下,太赫兹通信可以很好地适应实际的6G无

收稿日期:2024-01-26

线网络。

2 智能反射面赋能太赫兹通信的关键技术

本章分析与智能反射面赋能太赫兹通信相关的关键技术,主要包括 IRS 的硬件设计、波束控制、信道估计、容量优化、资源配置和鲁棒性设计等。

2.1 硬件设计

IRS 的概念来源于元表面,元表面是超材料的 2D 形式,指的是一系列具有自然界中通常不存在的特殊物理特性的人造结构,如负折射率、接近零折射率等等。

部署在太赫兹通信系统中的 IRS 是一种可调谐元表面,它可以控制反射波的传播方向,实现可重构的无线环境。IRS 通常由周期性排列的反射元件(元原子)组成,每个 IRS 元件可以灵活地控制 THz 入射波的振幅和相位,由于反射元件的大小处于亚波长水平($\lambda/5 \sim \lambda/10$),将其视为点源,根据惠更斯原理,可通过反射元件的排列来控制反射波的传播状态,对各个反射单元的硬件结构进行设计,实现对入射波的幅值和相位控制,然后对这些反射单元进行合理布置以构造反射波阵面。

然而 THz 波的波长短,需在小面积内集成更多的 IRS 元件,例如 IRS 尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的阵列可包含 100×100 个反射元件,但很难将大量的 IRS 元件和半导体器件(例如变容二极管、晶体管)组合在一起主动控制反射波,与微波和毫米波频段的 IRS 相比,THz 频段的 IRS 迫切需要新的设计理论。

另一方面,需要设计有效的硬件架构以及每个 IRS 元件的反射系数,其中反射系数由振幅响应和相位响应组成。目前所有的研究都考虑的是理想的反射系数,但在实践中,IRS 元件的反射振幅和相移受到硬件结构的严重限制。为了提高反射效率,应根据硬件特点采用合理的馈电网络和相位编码调制。为实现 6G THz 无线通信的实际应用,需要更高效的 IRS 硬件设计。

2.2 波束控制

太赫兹波传播过程中严重的路径损耗和分子吸收损耗需要大规模 MIMO 技术来补偿。大规模阵列天线适用于太赫兹通信系统,通过控制太赫兹波的相位和幅值将电磁能量集中到某一方向,这样可以在发射机处产生高增益、高指向性的波束,从而延长太赫兹通信的传输距离。对于太赫兹 MIMO 系统,波束赋形

的关键是设计一个最优的预编码矩阵,使阵列天线的波束增益最大化。由于波束赋形设计很大程度上依赖于信道状态信息(Channel State Information, CSI)的捕获,因此获得准确的发射端出发角(Angle of departure, AoD)和接收端到达角(Angle of arrival, AoA)对于进一步实现波束控制非常重要。

波束跟踪方案要求发射机针对多个空间方向产生一系列的波束切换,然后接收机可以通过处理接收到的信号波束来估计 AoD,且因太赫兹波段的波束较窄,需要高分辨率编码来保持太赫兹波束的精确对准,但是太赫兹通信的波束切换具有极高的复杂性。一般来说,太赫兹系统需要考虑基于大规模相控阵的三维波束赋形方案。然而,在波束切换过程中,三维波束赋形是耗时和低效的。

IRS 作为一种提高太赫兹通信覆盖能力的新技术,通过振幅和相移的调整,能够折射、吸收、反射入射波,并将其聚焦到任何想要的方向。基于此,IRS 可通过控制太赫兹波束来克服传输的高损耗和分子吸收衰减。在波束控制方面,虽然 IRS 辅助通信系统的波束赋形技术被广泛地研究,但波束跟踪技术需要 IRS 和移动台(Mobile station, MS)之间的动态 CSI 捕获。图 1 所示为一个典型的 IRS 辅助波束跟踪场景,其中基站(Base station, BS)通过 IRS 服务于 MS。在这种情况下,为了实现波束跟踪,需要分别估计 BS 至 IRS 信道和 IRS 至 MS 信道。

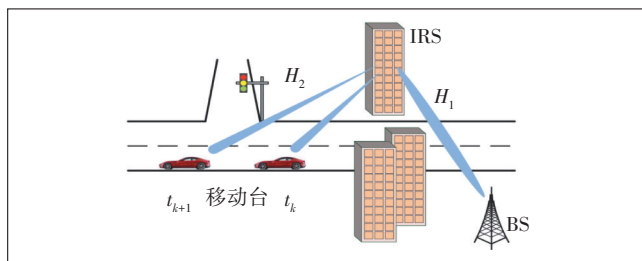


图 1 IRS 辅助太赫兹通信场景中的波束跟踪

2.3 信道估计

信道估计是 IRS 辅助 THz 通信系统的一个基本问题。在数据传输之前,获取 CSI 是 6G 网络中保证无线通信可靠的前提。此外,收发器和 IRS 的联合优化也依赖于 CSI。然而,IRS 在无线通信中的应用和部署给信道估计带来了一些挑战,特别是太赫兹通信。

首先,IRS 系统是由无源反射单元组成的,它没有任何有源分量,不具有信号处理能力,如果没有在 IRS 侧发射导频信号,IRS 辅助的无线系统很难同时估计

发送器至 IRS 信道和 IRS 至接收器信道。其次,与传统的低频无线系统相比,太赫兹波通信需集成更多的阵列天线和反射单元,要估计大量的信道参数,导频开销极高。最后,未来的应用场景要求低时延,但与传统的无 IRS 系统相比,启用 IRS 的太赫兹系统的信道估计会更费时。在解决信道估计问题上,若尝试将一些有源反射元件分布在 IRS 中,开销或许可以减少,但使用有源元件传感器肯定会增加额外的系统成本和功耗。

在实际应用中,IRS 将入射信号向特定方向反射,需考虑移动接收器的位置,也要考虑时变信道估计。在下行链路 IRS 辅助太赫兹通信系统中,信道估计问题可归结为部分重建问题,为了解决该部分重建问题,需要一种高效的基于深度学习的信道估计方法实现信号重建。

IRS 辅助太赫兹通信对路径增益、入射角、偏离角、位置信息等信道系数带来的微小变化更为敏感,进一步研究有效的低时延时变信道估计方案对实际的 IRS 赋能太赫兹通信场景具有重要意义。

2.4 容量优化

针对时变环境,IRS 可以通过对各反射单元的相移进行智能调整,提高太赫兹通信系统的容量。通过控制 IRS 的相移,可以产生三维无源波束,重新配置无线传输信道,获得波束赋形高增益,这与传统 MIMO 系统类似。与没有 IRS 的 MIMO 系统相比,在良好的信道环境下,IRS 辅助 MIMO 太赫兹系统能够获得更好的容量性能。对于发射机与接收机之间 LoS 链路较弱或被障碍物等阻挡导致的较差信道条件,无 IRS 的太赫兹通信系统的容量性能急剧下降,而 IRS 辅助太赫兹 MIMO 系统可以在发射机调整波束方向朝向 IRS 时,使相关接收机的反射信号强度最大化,从而保持良好的容量性能。

关于 IRS 辅助通信系统容量优化主要集中在发射机主动波束赋形和 IRS 无源波束赋形的联合优化上。即通过对固定的一个矩阵变量(即主动波束形成矩阵或 IRS 的相移矩阵)进行迭代优化,得到可实现速率最大化问题的局部最优解。然而,由于硬件设计复杂,具有连续相移的反射元件在实际应用中很难实现,并且肯定会导致更高的系统成本。为了便于实际应用,需考虑具有离散相移的 IRS 元件。当相移离散时,由于离散变量的约束,IRS 辅助太赫兹系统的容量优化问题就成为一个非凸问题。但在实际应用中,各反射

单元的振幅响应通常是不均匀的,其离散相移也是不均匀的。

在 IRS 辅助太赫兹系统的基础上,在相同通信距离条件下,IRS 辅助太赫兹系统的容量性能明显优于无 IRS 的太赫兹系统。同时,采用多次反射 IRS 的太赫兹系统比采用单次反射 IRS 的太赫兹系统具有更好的覆盖能力。除了受距离和频率传输损耗的影响外,吸收的分子效应还会导致多个通道峰值衰减。因此,需要将太赫兹频带的总带宽划分为几个子频带,将所有子频带的数据速率加起来计算太赫兹系统的容量。在此基础上,通过优化 IRS 的相移、IRS 位置和太赫兹通信的子带分配,也可以最大化 IRS 辅助太赫兹通信系统的容量。

2.5 资源配置

太赫兹通信的一个显著特点是可以利用充足的频谱资源实现超高数据速率,从而为 6G 无线网络中的大型终端设备提供良好的通信服务。太赫兹频段的无线频谱资源有限,有效地分配不仅能减少频谱开销,也可以提高系统的通信性能。随着工作频率的增加,虽然系统容量可以增大,但高频信号的传播损耗却在加大。太赫兹信号经历比微波和毫米波频段更严重的大气等路径衰减,为了保持良好的通信条件,需要在无线通信系统中安装大量新的前端设备和天线技术。IRS 作为一种高效节能技术,有助于克服太赫兹系统中存在的传输问题,增强太赫兹系统的通信覆盖能力。

在 IRS 辅助太赫兹通信系统中,对于多用户通信场景,由于自动干扰消除功能适用于 IRS,在开展业务时,最大或最小信噪比(SINR)问题可以转换为用户与 IRS 关联问题。在多小区通信场景中,通过交替优化基站的发射波束和 IRS 的反射波束赋形,最大化用户的信噪比(SINR),使得 IRS 能够改善小区边缘移动用户的通信性能。在 IRS 赋能车联网通信的情况下,利用功率定位、IRS 相移矩阵和频谱分配的组合优化方案,以最大化车联网车辆到基础设施(vehicle-to-infrastructure, V2I)的总系统容量,同时保证车辆到车辆(vehicle-to-vehicle, V2V)链路的信噪比。

对于 THz 频段,可以使用自适应距离感知和带宽资源分配方案来捕获不同的信道特性,例如距离和带宽之间的关系。此外,为了满足 THz 无线网络的服务质量(QoS)要求,联合带宽分配和并发调度算法,能够利用 QoS 感知和带宽分配实现更成功的流量调度及更

高的网络吞吐量。

2.6 鲁棒性设计

由于无线通信对 QoS 水平和系统可靠性的要求高,鲁棒性设计一直是提高无线通信系统性能的关键技术。因太赫兹通信存在严重的路径损耗和较差的覆盖能力等缺点,且极易受环境变化如天气条件、信道估计参数、移动障碍物等的影响,与低频通信系统相比,太赫兹系统的鲁棒性设计变得更加重要并具有挑战性。由于具有无源波束赋形增益和环境重构的能力,IRS 已成为增强太赫兹信号和提高频谱效率的有效技术。在提高鲁棒性方面,即使出现随机的移动对象阻挡,IRS 也能为太赫兹通信提供更多虚拟的 LoS 传播路径,而且 IRS 能够吸收太赫兹信号并沿特定方向发射,大大地抵消信号衰减,提高了太赫兹系统的鲁棒性。

针对 IRS 辅助的无线通信场景,在 CSI 具有统计性的情况下,研究主要用户相关信道的鲁棒波束赋形设计,优化 IRS 处的联合相移矩阵和辅助用户处的发射预编码矩阵的问题,从而在满足用户 QoS 要求的同时最小化 IRS 辅助无线电系统的发射功率。未来还需结合 IRS 的硬件特性和太赫兹通信的特性研究,进一步提高太赫兹通信的鲁棒性。

3 应用场景

对于 IRS 和太赫兹波段联合应用场景,利用 IRS 的独特特性,使太赫兹通信场景更有可能在实践中被实现。

3.1 IRS 辅助增大太赫兹通信覆盖范围

覆盖能力是太赫兹通信面临的巨大挑战。一方面,太赫兹通信由于其超高频、传播衰减极高,因此信号只覆盖近距离区域,另一方面,高频段的太赫兹波段具有较差的绕射能力,特别是太赫兹通信应用于室内场景时,无线传播链路容易被家具、人体等室内结构阻挡,导致通信中断。

为了解决太赫兹通信中存在的覆盖问题,重构无线传播环境的 IRS 是提高通信性能的一种有效的解决方案。首先,当发射机和接收机之间的实际 LoS 链路被障碍物阻挡时,IRS 可以提供虚拟的无线传播链路,其中虚拟传播链路由发射机至 IRS 链路和 IRS 至接收机链路组成。由于 IRS 能够控制太赫兹波的传播方向,可以很好地弥补太赫兹波的绕射能力差的缺陷。其次,IRS 的厚度极小,可被制造成任意形状,该物理

特性使得 IRS 可以无处不在。而且,该系统不需要复杂的硬件电路和射频链,重量很轻,可以方便地将 IRS 安装在无线传播环境中,利用反射极易增强太赫兹信号的覆盖范围。图 2 所示为 IRS 辅助太赫兹通信覆盖增强方案。

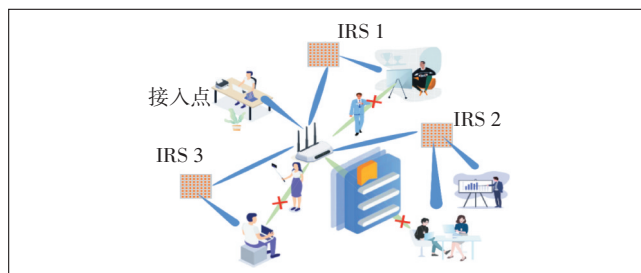


图 2 IRS 辅助太赫兹通信覆盖增强方案

3.2 IRS 辅助太赫兹无人机通信

与传统的地面通信相比,无人机可以被灵活、快速地部署在无线网络中,组网效率更高,还可以通过增加无人机的高度来增强覆盖能力。因此,可将无人机视为移动中继,扩大 6G 无线网络的传输距离,弥补太赫兹通信覆盖能力的不足。IRS 通常放置在地面的固定位置,通过调节反射元件的相移,使传播信号远离障碍物,然而在无线网络中部署 IRS,只有当接收端和发送端在 IRS 的同侧时,才具有明显的性能增益。可以看出,无人机比 IRS 更灵活,但是 IRS 比无人机具有更低的成本和功耗。综合考虑灵活性和经济性,IRS 与无人机的结合应用于太赫兹通信将是一个很有前景的发展趋势,这将使太赫兹通信实现全方位覆盖。同时,由于太赫兹信号的高传播损耗,需要密集部署大量的 IRS 和无人机。而随着无人机数量的增加,系统的安全等级也随之降低。除此之外,IRS 辅助太赫兹无人机通信还需要解决如开发更先进的电源或充电技术以解决无人机场景的续航问题,以及因大量的 IRS 和无人机部署在太赫兹通信时地面和空间资源分配问题(见图 3)。

3.3 IRS 赋能太赫兹 MEC 场景

MEC 是由集中式云计算向分布式局部边缘计算演化而来的一种网络计算体系结构。通过将移动设备的计算目标转移到计算能力更强的通信网络边缘,可以大大降低 6G 无线网络的通信延迟。同时,因大量计算任务在本地处理,可以缓解上层网络拥塞问题,也可以降低整个无线网络的系统成本和功耗。由于太赫兹通信提供了大量的数据交换,对通信时延的要求更加严格,在太赫兹通信系统中开发 MEC 技术会获

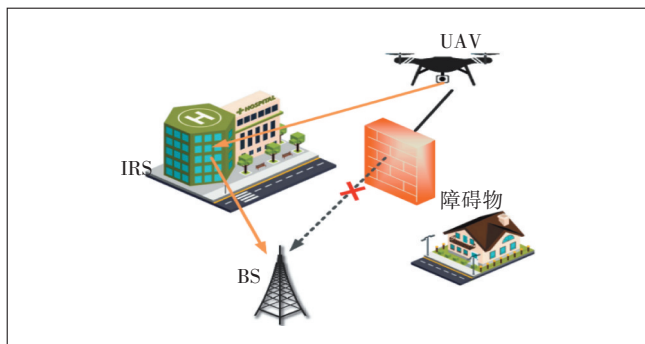


图3 IRS辅助太赫兹无人机通信场景

得很多好处。如图4所示,太赫兹信号对障碍物阻挡非常敏感,不稳定的通道负载带来了额外的通信延迟和功耗,影响了MEC方案与太赫兹通信的结合。因此,为降低网络时延同时提高系统吞吐量,可以采用IRS赋能太赫兹MEC场景,IRS具有改变入射太赫兹波传播方向的能力,能够帮助太赫兹信号以可忽略的反射损耗绕过障碍物。

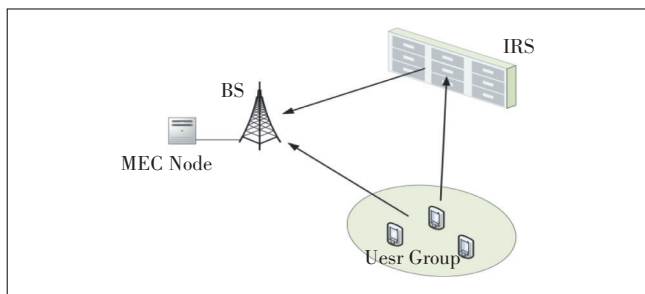


图4 IRS辅助太赫兹MEC应用场景

在IRS的辅助下,单个天线设备的一小部分计算任务可以通过配置多个天线的接入点卸载到边缘计算节点,在提高边缘计算能力的情况下,使得延迟最小化。与无IRS的传统MEC系统相比,IRS辅助MEC系统的时延会显著降低。考虑移动计算的成本因素,移动设备将计算需求卸载到接入点的边缘服务器,在卸载移动设备传输数据的前提下,保证每个设备都有一个定制的信息速率,边缘服务器通过调整IRS的相移来最大化其计算性能。此外,IRS辅助MEC也可以提高从接入点到移动设备的数据速率。

IRS辅助MEC系统的优化应用场景要求更强大的计算能力、更少的系统消耗和更稳定的传输环境,而太赫兹通信的优化方案目前仍然缺乏,因此IRS辅助太赫兹MEC系统的优化问题后续将会变得更加复杂。

3.4 IRS辅助太赫兹定位和传感

定位和传感是用于各种无线通信应用的关键技

术,典型的定位场景如图5所示,有时需要在实现终端设备的准确定位后相互通信。尽管太赫兹波波长短、角分辨率高,可实现更精确的定位和传感,但随着后续研究的深入,发现太赫兹系统中的定位问题会愈加突显。首先,太赫兹通信系统采用窄波束实现超高的数据速率,与低频相比,要求厘米级精度;其次,由于太赫兹信号的传输距离受限,太赫兹波的高传播损耗使得定位和传感更加困难;最后,因太赫兹波方向性强,传播信号很难覆盖盲区,一旦传输链路被阻挡,非视距区域的定位和传感就变得更加困难。

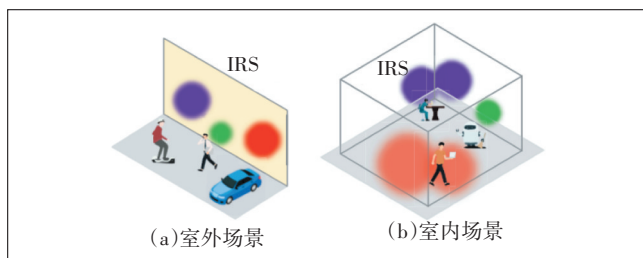


图5 IRS辅助太赫兹定位和传感场景示意

而在IRS的辅助下,高精度定位和传感就可以应用于实际场景中。与传统的反射材料(如塑料、玻璃等)相比,IRS能够以可忽略的反射损耗改变太赫兹波的传播方向。也就是说,IRS可以将非视距传播路径转换为虚拟视距传播路径,利用太赫兹通信的多径信息来增强终端设备的接收能力,同时利用优化IRS的无源波束赋形等方案进一步减少定位误差,在实践中以IRS提供的位置和方向作为先验信息,可以大幅提高定位和感知精度。

3.5 IRS赋能太赫兹NOMA方案

非正交多址技术(Non-orthogonal multiple access technology, NOMA)是支持大规模连接和提高6G无线网络频谱效率的技术。NOMA能够通过使用相同的无线资源为大量用户提供服务,并且在提高连接能力和平衡用户公平性方面优于正交频分多址(OFDMA)等正交多址方案。如图6所示,随着6G无线网络中连接的通信设备数量增加,利用NOMA技术也需要足够的频谱资源。而THz频段是解决6G NOMA系统带宽不足问题的合适选择,NOMA和THz通信之间的合作能够实现更低的延迟、更高的频谱效率和更多的设备连接。

THz频段可以支持更多的连接设备,但THz NOMA通信系统的解码复杂度也急剧增加。此外,THz频段的NOMA系统继承了高传播衰减特性,限制

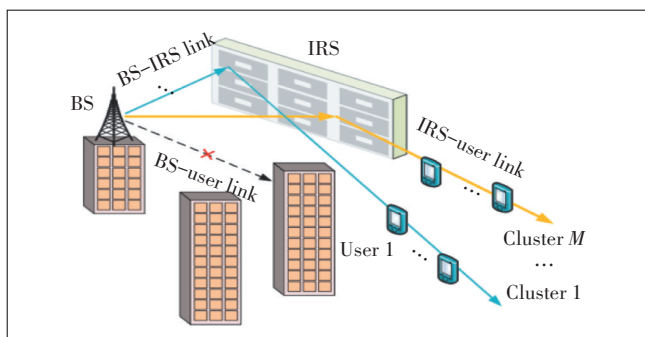


图6 IRS辅助THz NOMA场景

了发射机和接收机之间的通信距离,如果连接的设备被障碍物阻挡,系统性能将受到更为明显的影响,因此THz NOMA场景要求无线网络提供更好的覆盖能力,而IRS可通过智能控制信道条件增强网络覆盖和提高频谱效率来解决该问题,IRS、THz和NOMA的组合能进一步提升6G无线通信系统的能力。

4 存在的挑战

4.1 信道测量和建模

在未来的6G无线网络中,为了优化IRS辅助的太赫兹无线通信系统,需要建立足够真实、准确和易于操作的通信模型,以模拟太赫兹波的传播特性和IRS的物理特性。

在相关研究中,有文献从电磁理论的角度提出3种IRS辅助无线通信的自由空间路径损耗模型,其中考虑了IRS的物理尺寸和反射元件的辐射方向图等重要因素。这些模型捕获了如下3种相关的场景,并进行了验证。

a) 远点波束赋形情况,其中发射器和接收器都在IRS的远点,所有IRS元件反射到接收器的信号可以增强接收到的信号功率。

b) 近点波束赋形情况,其中发射器或接收器位于IRS的近点,使IRS能够通过适当调整反射系数将冲击信号聚焦到接收器。

c) 近点广播情况,IRS被用于波束赋形,专门为一个指定用户服务并使其接收功率最大化。

如上提出的具有远场和近场传输的IRS辅助无线系统的路径损耗模型结果表明,传播路径损耗高度依赖于IRS的大小和传输距离,特别是在近点场景下。

现有的信道模型是由用于IRS辅助无线系统的常用建模技术生成的,可用于低频和低频通信,但太赫兹波的特性还没有考虑到。对于在不同的太赫兹波

段通信而言,较为严重的路径损耗和分子吸收衰减情况也是不同的。为了对抗太赫兹波的严重传播衰减,可使用多个IRS来克服基站和用户之间的严重信号衰减,以实现太赫兹通信更好的覆盖。但现有的关于太赫兹波段的IRS研究大多仍处于理论分析阶段,还没有真正的智能可操作的无线通信环境,因此需要一种新的信道模型,使得IRS辅助太赫兹通信系统的信道建模能通过实际的信道测量来实现。

4.2 部署和组网

IRS部署和组网技术是太赫兹无线通信系统重要研究领域。如前所述,太赫兹通信由于巨大的传播衰减而受到传输距离的限制,为了保证有效的通信距离,在无线环境中部署大量的IRS是必不可少的。因此,需要探索IRS在不同位置(如发射端、接收端)部署的优化策略,一方面,IRS为太赫兹通信创建虚拟LoS链路,IRS部署对无线系统性能有重大影响,另一方面,在实际安装IRS时,需考虑包括部署成本、实际无线条件、建筑分布、IRS数量、维护难度、美观程度等其他影响因素,这些都是IRS在6G太赫兹通信中部署和组网的关键问题。

IRS由无源反射元件组成,来自不同IRS的反射太赫兹信号可以被分离。在此基础上,可以很好地简化IRS的部署设计,如图7所示,IRS部署策略包括分布式IRS部署和集中式IRS部署。同时,IRS的部署和组网也需要考虑与传统蜂窝网络结构的兼容性,以实现最优的网络性能。

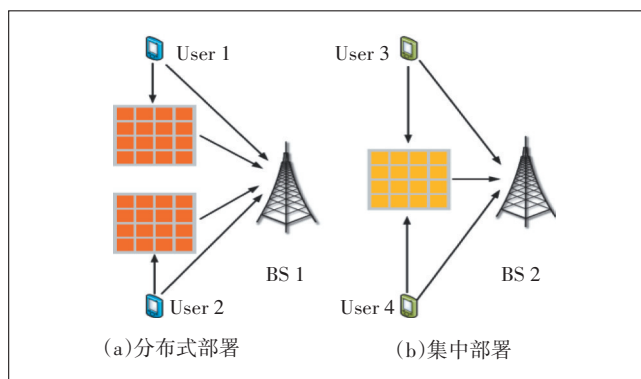


图7 太赫兹通信中不同IRS部署策略

5 总结

本文针对IRS与太赫兹通信的协同工作进行全面研究,以实现一个可重构的无线通信环境。尽管IRS增强太赫兹通信目前处于起步研究阶段,但仍是一种

有前景的模式转变,可以大幅提高太赫兹通信的覆盖能力和数据传输速率。在IRS的辅助下,太赫兹通信能更好地应用于未来6G网络的各种场景,尽管它具有显著的优势,但也面临一些新的问题和挑战,期望本文能为进一步推动IRS赋能太赫兹通信以及6G无线网络提供有意义的尝试和指引。

参考文献:

- [1] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64(1): 110301.
- [2] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [3] 刘吉宁, 刘少聪, 刘大洋, 等. 面向6G的智能超表面应用研究与思考 [J]. *电信工程技术与标准化*, 2022, 35(10): 1-7.
- [4] XU W Z, REN F F, YE J D, et al. Electrically tunable terahertz metamaterials with embedded large-area transparent thin-film transistor arrays [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 23486.
- [5] 赵亚军, 菅梦楠. 6G智能超表面技术应用与挑战 [J]. *无线电通信技术*, 2021, 47(6): 679-691.
- [6] CHEN S Z, SUN S H, XU G X, et al. Beam-space multiplexing: practice, theory, and trends, from 4G TD-LTE, 5G, to 6G and beyond [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 162-172.
- [7] 唐万恺. 基于智能超表面的无线通信系统设计与信道特性研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [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 (ICUMT). Lisbon, Portugal: IEEE, 2016: 183-190.
- [9] PENG B L, JIAO Q, KÜRNER T. Angle of arrival estimation in dynamic indoor THz channels with Bayesian filter and reinforcement learning [C]//2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). Budapest, Hungary: IEEE, 2016: 1975-1979.
- [10] MA X Y, CHEN Z, CHI Y J, et al. Channel estimation for intelligent reflecting surface enabled terahertz MIMO systems [C]//2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Dublin, Ireland: IEEE, 2020: 1-6.
- [11] MA X Y, CHEN Z, CHEN W J, et al. Joint channel estimation and data rate maximization for intelligent reflecting surface assisted terahertz MIMO communication systems [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 99565-99581.
- [12] YANG Z H, XU W, HUANG C W, et al. Beamforming design for multiuser transmission through reconfigurable intelligent surface [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(1): 589-601.
- [13] ZHANG S W, ZHANG R. Capacity characterization for intelligent reflecting surface aided MIMO communication [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1823-1838.
- [14] ABEYWICKRAMA S, ZHANG R, WU Q Q, et al. Intelligent reflecting surface: practical phase shift model and beamforming optimization [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(9): 5849-5863.
- [15] XU D F, YU X H, SCHOBER R. Resource allocation for intelligent reflecting surface-assisted cognitive radio networks [C]//2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2020: 1-5.
- [16] YANG Y F, ZHANG S W, ZHANG R. IRS-enhanced OFDMA: joint resource allocation and passive beamforming optimization [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 760-764.
- [17] HAO W M, SUN G C, ZENG M, et al. Robust design for intelligent reflecting surface-assisted MIMO-OFDMA terahertz IoT networks [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(16): 13052-13064.
- [18] WU Y Z, HAN C. Interference and coverage analysis for indoor terahertz wireless local area networks [C]//2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [19] LIU Y, ZHAO J, XIONG Z H, et al. Intelligent reflecting surface meets mobile edge computing: enhancing wireless communications for computation offloading [EB/OL]. [2023-07-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.07449>.
- [20] BAI T, PAN C H, REN H, et al. Resource allocation for intelligent reflecting surface aided wireless powered mobile edge computing in OFDM systems [EB/OL]. [2023-07-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.05511>.
- [21] LIU Y M, LIU E W, WANG R. Reconfigurable intelligent surface aided wireless localization [EB/OL]. [2023-07-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.07459>.
- [22] ZHANG Y, CAO H T, ZHOU M, et al. Non-orthogonal multiple access in cell-free massive MIMO networks [J]. *China Communications*, 2020, 17(8): 81-94.
- [23] HUANG C W, YANG Z H, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Hybrid beamforming for RIS-empowered multi-hop terahertz communications: a DRL-based method [C]//2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Taipei, Taiwan: IEEE, 2020: 1-6.
- [24] ZHANG S W, ZHANG R. Intelligent reflecting surface aided multiple access: capacity region and deployment strategy [C]//2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2020: 1-5.

作者简介:

夏焯, 工程师, 主要从事通信终端业务支撑方面相关工作; 吴纯璐, 工程师, 主要从事项目管理方面工作。

