

导读:随着 5G 市场的快速发展,通信学术界、产业界以及标准化组织均启动了 6G 在愿景、需求和技术上的研究。6G 一定是一个对 5G 不足不断增强,并满足新的需求而顺势发展的系统,将在 5G 基础上全面支持整个世界的数字化,并结合人工智能等技术的发展,实现智慧的泛在可取、全面赋能万事万物。6G 需要更多新技术、新思维,涉及相关理论、软硬件技术上的突破。为了促进 6G 通信技术交流,推动我国 6G 通信技术发展,《电子技术应用》杂志 2021 年第 6 期推出“面向 6G 的关键技术”主题专栏,论文内容针对 6G 潜在关键技术展开讨论,重点涵盖显著增强信号覆盖范围的 6G 智能反射面(IRS)技术、提供随时随地访问的空天地一体化技术以及满足频谱共享的 6G 区块链技术等多个领域,期待为 6G 技术研究和发展提供有益的借鉴。



特约主编:朱雪田,北京邮电大学工学博士,教授级高级工程师,中关村国家自主创新示范区高端领军人才,现就职于中国联通研究院。长期从事 5G/6G 移动通信技术与业务创新研发工作,作为项目组长先后负责多个 5G/6G 领域的移动通信国家重大项目,发表学术论文超过 100 篇,发明专利 100 余项,个人专著 4 本。

B5G/6G 通信的 IRS 技术综述 *

李 刚^{1,2},王瑜新^{1,2,3},章秀银³,陈 真³,陈艺戬^{1,2},窦建武^{1,2},杨 军^{1,2},陆海涛^{1,2}

(1. 中兴通讯股份有限公司,广东 深圳 518055;

2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室,广东 深圳 518055;3. 华南理工大学,广东 广州 510641)

摘要:智能反射面(IRS)技术可以显著增强信号的覆盖范围,是 B5G/6G 的关键技术之一。针对 IRS 的当前理论研究中的关键技术,重点介绍信道估计、波束管理以及 IRS 辅助的 NOMA、物理层安全增强方面的研究进展,同时给出了未来的研究方向。

关键词: B5G/6G; 智能反射面(IRS); MIMO; NOMA; 毫米波

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211305

中文引用格式: 李刚,王瑜新,章秀银,等. B5G/6G 通信的 IRS 技术综述[J]. 电子技术应用,2021,47(6):1-5,9.

英文引用格式: Li Gang, Wang Yuxin, Zhang Xiuyin, et al. Overview of the intelligent reflective surface technique for B5G/6G communications[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(6): 1-5, 9.

Overview of the intelligent reflective surface technique for B5G/6G communications

Li Gang^{1,2}, Wang Yuxin^{1,2,3}, Zhang Xiuyin³, Chen Zhen³, Chen Yijian^{1,2}, Dou Jianwu^{1,2}, Yang Jun^{1,2}, Lu Haitao^{1,2}

(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518055, China;

2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China;

3. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The technique of intelligent reflective surface can significantly improve the coverage of transmitted signal, and is one of the potential techniques for B5G/6G communications. This paper introduces the progress of the key techniques of intelligent reflective surface in theoretical researches, including channel estimation, beam management, IRS-aid NOMA, IRS-aid physical layer security, and then gives the research plan of IRS in future.

Key words: B5G/6G; intelligent reflective surface(IRS); MIMO; NOMA; millimeter-wave

* 基金项目:国家科技重大专项课题(2018ZX03001002)

0 引言

随着低频段频谱的资源匮乏加速,毫米波(Millimeter-wave, mmWave)与大规模多输入多输出(MIMO)技术将成为未来B5G/6G无线通信的关键技术之一。但是,毫米波由于信号衰落快,会导致信号的覆盖范围受限;而Massive MIMO的使用则需要增加硬件成本和能源消耗,以处理复杂的信号。

最近,无线通信研究界提出了一种智能反射面(Intelligent Reflective Surface, IRS)的新概念。IRS是电磁(Electro Magnetic, EM)材料的二维(2-Dimensional, 2D)人造表面,即超表面,它由大量具有特殊设计的物理结构的无源散射元素组成,如图1所示,它们以不同的方式转换入射的EM波^[1]。IRS可以以软件定义的方式控制每个散射元件,以改变入射RF(Radio Frequency)信号在散射元件上的反射EM特性(例如,相移)。通过所有散射元件的联合相位控制,可以任意调整入射RF信号的反射相位和角度,以产生理想的多径效应。特别地,反射的RF信号可以被相干地添加以改善接收信号功率,或者可以相消地组合以减轻干扰。通过将IRS部署在如涂在建筑物墙壁上并由空中平台携带的环境中,IRS可以将无线电环境转变为可以帮助信息传感,模拟计算和无线通信的智能空间^[2]。尽管无源反射表面已经在雷达系统(例如:跟踪)、遥感和卫星/深空通信中找到了各种应用,但是它们很少用于移动无线通信中。这主要是因为传统的反射面一旦制成,便具有固定的移相器,而这些移相器无法适应用户移动引起的动态无线信道。然而,研究发现,通过实时控制移相器,使得IRS的反射相位能及时跟踪用户的位置变化,以提供辅助链接。随着对传统RF收发器的最佳控制,IRS辅助的无线系统将变得更加灵活,以支持各种用户需求,例如,增强的数据速率、扩展的覆盖范围、最小的功耗以及更安全的传输。

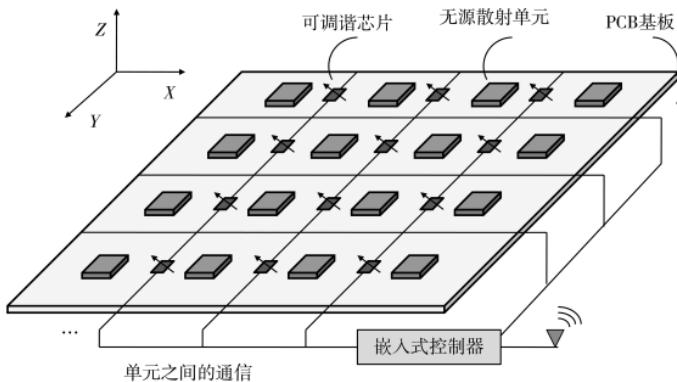


图1 IRS超表面结构

在理论研究方面,学术界主要对IRS辅助的通信系统的传输设计方案进行了广泛的研究^[3-4],按系统模型可分类为IRS辅助的单小区和多小区通信系统,按对信道状态信息(Channel State Information, CSI)的掌握程度可

分类为IRS辅助的瞬时完美CSI、瞬时非完美CSI和统计CSI通信系统。另外,学术界也对IRS信道建模、调制编码、优化和资源分配、人工智能与IRS的结合等方面进行了研究探讨^[5-8]。

对于IRS在产业界方面的进展,国际方面,日本移动运营商NTT DoCoMo和智能雷达创业公司MetaWave于2018年11月联合演示了IRS技术在28 GHz毫米波通信系统中的应用^[9],其通信速率达到560 Mb/s。美国MIT搭建了RFocus的原型机测试平台^[10],智能表面可以与墙纸结合在一起,低成本生产制造出来,智能表面的每个单元包括反射和穿透两种状态。部署智能表面后的室内信号覆盖强度平均提升约10倍,信号信道容量提升约2倍,可有效减小信号发射端的发送功率,延长物联网等设备待机使用时间。国内方面,清华大学设计了2 bit离散相位控制器件,该器件包含两个PIN二极管作为2 bit控制模块。清华大学制作了256个器件单元的智能反射表面设备,该设备在28.5 GHz频段的波束赋形增益可达19.1 dB^[11]。东南大学实现了反射波的基频谐波到+1/-1阶谐波的高效频率转换,以及基于时空联合编码策略的波束整形^[12]。实测结果表明,最高转换效率大于88%。当周期性相位调制的有源超表面得到进一步发展时,这种设计也可以在THz频率上得到广泛的应用。

综上,IRS被认为是B5G/6G通信最具潜力的技术之一。本文将就IRS的当前理论研究中的关键技术,重点介绍信道估计、波束管理以及IRS辅助的NOMA、物理层安全增强方面的研究进展,同时给出未来的研究方向。

1 IRS理论研究中的关键技术

1.1 IRS信道估计

目前,关于IRS的大多数现有工作^[13-14]都假设接入点(AP)拥有完美的信道状态信息(CSI),另外,也有假设AP接收由用户发送并由IRS反射的导频信号。采用这种方法进行IRS信道估计,假设了一个简单的基于逐单元ON/OFF的反射模式。但是它有两个主要缺点。首先,频繁执行大型IRS元件的ON/OFF切换实际上是昂贵的,因为这需要对每个IRS元件进行单独的幅度控制(除了相移之外)^[14];其次,由于IRS的大口径每次都仅打开一小部分,因此并未充分利用它的大孔径,这会降低信道估计的准确性。为了克服上述问题,文献[15]中提出了一种新的IRS反射(相移)模式,用于信道估计。文献[15]建议将IRS分组,用于减少信道估计和无源波束成形复杂度的元件。基于IRS单元分组,提出了一种基于离散傅里叶变换(DFT)的IRS反射模式,以最小化信道估计误差。但是,这项工作仅考虑了连续的相移以简化设计,这对于通常具有大量反射单元的IRS来说实际上是很难实现的,因为制造高分辨率移相器的成本很高。因此,更实际的做法是在每个反射元件上考虑具有

少量控制位的离散相移,例如对于两级(0 或 π)相移^[7]。

考虑到大规模 MIMO 和大规模连接性的趋势,必须要在较短的时间间隔内准确估计如此大量的信道系数。文献[16]研究了 IRS 辅助上行链路的信道估计方法,具体考虑了基于被动导频的信道估计方法,其中 IRS 单元将导频序列由用户被动地反射给基站,使得基站能够估计与 IRS 相关联的 CSI。在文献[17]中,为了减少训练开销,利用毫米波信道固有的稀疏性,开发了 IRS 辅助的 MISO 系统的联合信道估计和波束成形设计。首先找到一个级联信道的稀疏表示,然后开发出一种基于压缩感知的信道估计方法。此外,基于估计的信道执行联合波束成形设计。

综上,与配备有足够大信号处理能力的其他通信系统(例如,中继)相比,近乎无源的 IRS 配备了最少的板载信号处理单元,这些单元在正常的操作阶段中不被使用。因此,需要新的算法和协议来执行信道估计,同时保证 IRS 的复杂度尽可能低,并尽可能避免板载信号的处理操作。

1.2 IRS 波束管理

毫米波是 B5G/6G 网络的关键技术之一,通过利用毫米波频段上的大带宽,它能提供每秒千兆比特的通信数据速率。但毫米波系统会存在路径损耗大、穿透能力弱、易受障碍物干扰等问题,为了补偿严重的路径损耗,通常使用大型天线阵列来实现显著的波束成形增益以进行数据传输,同时要使用波束管理流程来为目标用户提供精确的定向波束。为解决毫米波网络的遮挡问题,IRS 被提出作为一种极具应用前景的绿色通信技术,可在不大幅度增加能耗的情况下主动地调节入射信号的传播方向。IRS 的使用将使得原有的基站和终端的波束管理流程发生变化。

文献[18]提出了基于随机哈希函数(Random Hashing, RH)的 IRS 多波束训练的设计,得到最佳波束所需的训练符号数量将会是一个随机数。文献[19]将 IRS 单元划分为多个子矩阵,基于接收到的功率与 SNR 的比值,在不同的训练符号上进行多波束的训练,确定出 IRS 针对每个用户的最佳水平发送波束,但并未考虑垂直发送波束。文献[20]评估了 IRS 辅助的毫米波网络对未来的网络的波束管理设计所带来的挑战,讨论了传统的毫米波网络扩展至 IRS 辅助的毫米波网络时的波束管理流程所存在的限制,提出了一种新的机器学习的波束管理架构,可根据环境和移动速度的变化,实现高效的波束管理,降低波束训练的开销。

1.3 IRS 辅助的 NOMA

传统的正交多址技术(例如空分多址)是在每个空间方向只服务单一的用户,而使用非正交多址(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术以后,可以在每个空间方向同时服务多个用户,以达到更高的谱效率和能量效

率,因此 NOMA 被认为是后 5G/6G 的关键技术之一。使用 NOMA 技术的关键是要使得远近配对用户的信道矢量方向一致,而通过 IRS 的使用可以很好地操控用户的信道矢量方向,基于此,目前已经有 NOMA 和 IRS 结合的研究^[21-24]。文献[21]假定基站与小区边缘用户之间没有直射径,部署 IRS 后则增加了直射径,将 IRS-NOMA 与空分多址的传输技术进行了对比,并且考虑了硬件实现的非理想因素。文献[22]在给定固定的相位偏移的情况下,引入了一些辅助变量,采用了连续的凸逼近的方法,通过联合优化基站的发送波束赋形和 IRS 的波束赋型,实现了 IRS 辅助的 NOMA 网络的系统能量效率最大化。文献[23]假定基站能获得理想信道信息的前提下,研究了两种场景(有 LOS 径和无 LOS 径)下的多个 IRS 面板辅助的 NOMA 网络性能,对于 IRS 相位的量化,采用 3 bit 的量化精度可以实现接近最优的中断概率性能。文献[24]利用功率系数和相位变化之间的转换关系,通过使用序列旋转算法,解决了非凸的优化问题。在保证每个用户最小 SINR 的前提下,实现 IRS 辅助的 NOMA 网络的功率最小化。

1.4 IRS 辅助的物理层安全增强

由于无线通信的广播性质,通信安全性一直是无线网络中的基本问题。除了应用层采用的传统加密方法外,物理层安全性还可以作为在快速访问第五代(5G)网络中提供安全通信的替代方法^[25-26]。此外,物理层安全性可以实现高质量的安全性能,而无需实际分配密钥,这与 5G 的要求非常匹配。为了充分利用 5G 的优势,多天线技术已成为增强随机无线网络(例如无线网络)中物理层安全性的强大工具。在 B5G/6G 技术的研究中,IRS 在增强通信链路物理层安全性方面的潜在优势,最近引起了广泛的关注。

在文献[27]–[28]中研究了 IRS 辅助的安全通信系统,但是它们的通信系统仅包括一个发射机、一个合法的接收机、单个窃听者以及一个在实际应用中受到限制的 IRS。文献[29]中研究了一种 DL MISO 广播系统,其中 BS 将独立的数据流传输到多个合法的接收器,并使它们对多个窃听者保密。在文献[30]中,作者考虑了一种 IRS 辅助的窃听信道模型,研究了在最小保密率约束下,通过优化发射功率和 IRS 相移来最小化功耗的问题。由于得到的优化问题是非凸的,提出了在发射功率和 IRS 相移之间利用交替优化和半定松弛方法来处理此问题。同时,推导了最佳安全波束形成器的闭式表达式。在文献[31]中,作者考虑了一个网络场景,在单天线窃听者存在的情况下,IRS 辅助一个配备均匀线性天线阵列的基站,将机密信号发送到一个单天线合法用户。通过优化发射波束形成和 IRS 相移来解决保密率最大化问题。通过利用二次变换和流形优化技术,提出了一种低复杂度的优化算法,以获得近似最优的 IRS 相移。同时,作者

从理论上证明了该优化算法的收敛性。在文献[32]中,作者研究了一种下行链路 MISO 系统,其中在多个窃听者存在的情况下,基站将独立的数据流传送给多个合法的接收机。在连续和离散 IRS 相移这两个假设下,作者通过联合优化在基站的波束形成器和 IRS 相移,最大限度地提高了最小保密率。该优化问题采用了交替优化和路径跟踪算法进行求解。在文献[33]中,作者考虑了 IRS 辅助 MISO 通信系统中的安全通信。为了增强物理层的安全性,在基站传输了人工噪声来故意破坏窃听者的信道。通过联合优化 IRS 相移、基站波束形成矢量和人工噪声协方差矩阵,以最大程度地提高系统保密率。为了处理产生的非凸优化问题,作者提出了一种基于交替优化、连续凸逼近、半定松弛和流行优化的高效次优算法。

2 IRS 的未来研究方向

2.1 考虑实际误差因素

目前大部分的 IRS 研究都是理论分析和仿真验证,而且信道模型的建模、仿真假设都偏向于理想化。后续的研究需要把硬件实现的误差考虑在内,例如考虑非线性功放、晶振、ADC 和 IRS 相位量化误差等,同时结合 IRS 样机的实测数据来修正理论分析和仿真模型,让 IRS 的理论更好地指导硬件实现。

2.2 机器学习的 IRS 优化方法

与文献中常用的交替优化不同,机器学习方法对于 IRS 基于本地无线电环境的信息实现敏捷和轻量级相位控制更具吸引力。这可以帮助最大程度地减少 IRS 和活动收发器之间的信息交换开销。大量的散射元素及其感知能力进一步暗示可以在信道感测期间收集丰富的信息,从而为数据驱动的 DL(Deep Learning)方法提供了可能。此外,还可以设想潜在的模拟计算,以通过多层超表面实现人工神经网络,这潜在地使学习方法在计算和轻量级方面变得灵活,而无需进行信息交换。但是,当前的 DL 方法仍面临许多实际挑战,包括训练开销、稳定性和适应性问题。DL 方法的设计必须满足 IRS 辅助无线系统的硬件约束,例如无源散射元件的有限计算和通信能力。例如,利用 DL 方法,可以仅在观察到的系统状态(例如,通过其感知能力感知到的 CSI)以及接收者对其反馈的基础上,在 IRS 控制器处采用决策代理来调整其相位配置。IRS 可以通过检测或监听从接收器到发送器的 ACK 数据包来估计系统状态。使用专门设计的 ACK (Acknowledge Character) 数据包(例如具有不同持续时间或发射功率的 ACK 数据包)可以简化 IRS 的信道检测,而不会在解码 ACK 数据包时消耗能量。

2.3 IRS 辅助的毫米波和 THz 通信

无线通信行业正在设计未来的无线传输技术和标准来释放大量的未使用的频带,其中包括毫米波、太赫兹和可见光频谱。但此类高频段通信将会面临信号覆盖

死角的关键问题,因为此类短波波形的严重阻塞损耗将无法很好地解决。在这种情况下,当 IRS 部署在基站和最终用户之间时,可以利用 IRS 的反射和折射两个显着的 EM 属性来解决盲区的关键问题。例如,用户位于服务 BS 的同一侧,在这种情况下,IRS 上的入射 EM 波可向用户反射;而如果用户在相反侧,则入射 EM 波可以通过 IRS 折射,以增强信号质量到达用户。可以预见,具有 B5G/6G 无线系统的 IRS 的 3D 部署可以消除此类覆盖死角,将具有成本效益,并且当前发展中的大规模 MIMO 和毫米波技术与 IRS 技术集成在一起,以最终扩展覆盖范围。

最近很多研究致力于解决这一问题,如混合 THz 和 RF 无线系统等。而可重构智能表面(IRS)作为一项新技术,可以通过调整基站的相位偏移来沿所需方向重新传输来自基站的信号,从而利用 IRS 和用户之间的 LoS 分量保持良好的沟通质量。因此,IRS 也可以作为辅助毫米波、太赫兹和可见光谱的通信,以避免建筑物阻塞影响、增强覆盖范围。

2.4 在智能无线传感中使用 IRS

当前的研究通常使用 IRS 作为辅助手段来增强现有收发器的传输性能。实际上,IRS 的每个散射元素都可以单独进行相位调整,从而对来自不同方向的入射信号显示出不同的灵敏度。这意味着 IRS 可以用作被动监视无线电环境的传感器设备阵列。给定与中央 IRS 控制器之间的有线或无线连接,可以以节能的方式收集和分析来自不同散射元件的所有传感信息。从这个角度来看,将 IRS 用作智能传感器阵列将在无线传感方面具有丰富的应用,例如室内定位和人体姿势理解。这样,由 IRS 协助的无线系统不仅会增强通信,而且会带来人与网络交互的可能性,即通过使用 IRS 来了解人类在无线网络中的行为或意图,通信性能和用户满意度甚至可以更高。

3 结论

IRS 是一个由大量无源反射元件组成的平面,每个无源反射元件都能独立地对入射信号产生可控的振幅和/或相位变化,可用于 B5G/6G 无线通信系统,实现智能的、可重构的无线信道/无线电传播环境。本文介绍了 IRS 的当前理论研究最新进展,包括信道估计、波束管理、IRS 辅助的 NOMA 传输、IRS 辅助的物理层安全传输,并给出了未来的研究方向。

参考文献

- [1] BONOD N. Large-scale dielectric metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(7): 664–665.
- [2] RENZO M D, DEBBAH M, HUY D T P, et al. Smart radio environments empowered by AI reconfigurable meta-surfaces: an idea whose time has come[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 129(1): 9–10.
- [3] Pan Cunhua, Ren Hong, Wang Kezhi, et al. Intelligent

- reflecting surface aided MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1719–1734.
- [4] LI Q, CUI X, WU S X, et al. Sum rate maximization for multiuser MISO downlink with intelligent reflecting surface[J]. arXiv : 1912.09315 , 2019.
- [5] DI RENZO M, DANUFANE F H, XI X, et al. Analytical modeling of the path-loss for reconfigurable intelligent surfaces—Anomalous mirror or scatterer? [J]. arXiv : 2001.10862 , 2020.
- [6] BASAR E. Reconfigurable intelligent surface-based index modulation : a new beyond MIMO paradigm for 6G[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020 , 68(5) : 3187–3196.
- [7] HUANG C, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications , 2019 , 18(8) : 4157–4170.
- [8] LIASKOS C, TSIOLIARIDOU A, NIE S, et al. An interpretable neural network for configuring program-mable wireless environments[C].2019 IEEE 20th IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications , 2019 : 1–5.
- [9] TOMAS J P.NTT DoCoMo , metawave test 5G mobile system in Tokyo[EB/OL].(2018–12–06)[2021–01–18].<http://www.srrc.org.cn/ /en/news4504.aspx>.
- [10] ARUN V, BALAKRISHNAN H. RFocus : practical beam-forming for small devices[J/OL].(2019–05–13)[2020–04–25].<https://arxiv.org/abs/1905.05130>.
- [11] DAI L, WANG B, WANG M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications : antenna design , prototyping , and experimental results[J]. IEEE Access , 2020(8) : 45913–45923.
- [12] Dai Junyan , Yang Liuxi , Ke Junchen , et al. High-efficiency synthesizer for spatial waves based on space-time-coding digital metasurface[M/OL].(2020–05–11)[2021–01–18]. Wiley online library.<https://doi.org/10.1002/lpor.20190013>.
- [13] Wu Qingqing , Zhang Rui. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network :Joint active and passive beam-forming design[C].2018 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM'18) , 2018 : 1–6.
- [14] DAI L, WANG B, WANG M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communication ; antenna design , prototyping and experimental results[J]. arXiv : 1912.03620 , 2019.
- [15] 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.
- [16] TAHA A, ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning[J]. arXiv : 1904.10136 , 2019.
- [17] WANG P, FANG J, DUAN H, et al. Compressed channel estimation and joint beamforming for intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave systems[J]. arXiv:1911.07202 , 2019.
- [18] HASSANIEH H, ABARI O, RODRIGUEZ M, et al. Fast millimeter wave beam alignment[C]. ACM Conference of Speccial Interest Group Data Communications , Budapest , Hungary , 2018 : 432–445.
- [19] YOU C, ZHENG B, ZHANG R. Fast beam training for IRS-assisted multiuser communications[J]. IEEE Wireless Communication Letters , 2020 , 9(11) : 1845–1849.
- [20] JIA C, GAO H, CHEN N, et al. Machine learning empowered beam management for intelligent reflecting surface assisted MmWave networks[J]. China Communications , 2020 , 17(10) : 100–114.
- [21] DING Z, VINCENT POOR H. A simple design of IRS-NOMA transmission[J]. IEEE Communications Letters , 2020 , 24(5) : 1119–1123.
- [22] FANG F, XU Y, PHAM Q V, et al. Energy-efficient design of IRS-NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology , 2020 , 69(11) : 14088–14092.
- [23] Cheng Yanyu, LI K H, Liu Yuanwei, et al. Non-orthogonal multiple access(NOMA) with multiple intelligent reflecting surfaces[J]. arXiv : 2011.00211 , 2020.
- [24] WANG H, LIU C, SHI Z, et al. On power minimization for IRS-aided downlink noma systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters , 2020 , 9(11) : 1808–1811.
- [25] WYNER A D. The wire-tap channel[J]. Bell System Technical Journal , 1975 , 54(8) : 1355–1387.
- [26] CHEN X, NG D W K, GERSTACKER W H, et al. A survey on multiple-antenna techniques for physical layer security[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials , 2016 , 19(2) : 1027–1053.
- [27] YU X, XU D, SCHOBER R. Enabling secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[J]. arXiv : 1904.09573 , 2019.
- [28] CUI M, ZHANG G, ZHANG R. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface[J]. IEEE Wireless Communications Letters , 2019 , 8(5) : 1410–1414.
- [29] CHEN J, LIANG Y C, PEI Y, et al. Intelligent reflecting surface : a programmable wireless environment for physical layer security[J]. arxiv : 1905.03689 , 2019.
- [30] CHU Z, HAO W, XIAO P, et al. Intelligent reflecting surface aided multi- antenna secure transmission[J]. IEEE Wireless Communications Letters , 2020 , 9(1) : 108–112.
- [31] FENG K, LI X. Physical layer security enhancement exploiting intelligent reflecting surface[J]. arXiv : 1911.02766 , 2019.

(下转第 9 页)

偿、同步、调制、编码、多址、射频性能和多天线/多波束天线等问题。

3.4 网络相关技术

网络方面,需要考虑天基网络协议、星对地融合(随机接入管理、星对地交换)、移动性管理(星内波束交换、星间交换、星间交换)等相关技术。

4 结论

SAGIN 是一种能够很好地满足未来通信需求的网络结构,它集空间卫星网络、近空间网络、空中网络、地面网络于一体,未来还将与海洋网络集成。本文详细介绍了 SAGIN 的网络结构,并对每一层网络组件进行了分析。然后,研究了 SAGIN 网络实现的一些关键技术。这些关键技术包括无线频谱管理、网络接入和交换、无线信道传输和网络相关技术。SAGIN 网络具有明显的覆盖优势和远程通信优势,可以扩大通信网络的业务范围和运营商的通信业务领域。

参考文献

- [1] XIONG G , ZHU F , DONG X , et al. A kind of novel ITS based on space-air-ground big-data[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine , 2016 , 8(1) : 10–22.
- [2] CASONI M , GRAZIA C , KLAPEZ M , et al. Integration of satellite and LTE for disaster recovery[J]. IEEE Communications Magazine , 2015 , 53(3) : 47–53.
- [3] FARSEROTU J , PRASAD R. A survey of future broadband multimedia satellite systems, issues and trends[J]. IEEE Communications Magazine , 2000 , 38(6) : 128–133.
- [4] GHARANJIK A , SHANKAR B , ARAPOGLOU P D , et al. Multiple gateway transmit diversity in Q/V band feeder links[J]. IEEE Transactions on Communications , 2015 , 63(3) : 916–926.
- [5] NISHIYAMA H , TADA Y , KATO N , et al. Toward optimized

traffic distribution for efficient network capacity utilization in two-layered satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology , 2013 , 62(3) : 1303–1313.

- [6] CHANDRASEKHARAN S , GOMEZ K , AI-HOURANI A , et al. Designing and implementing future aerial communication networks[J]. IEEE Communications Magazine , 2016 , 54(5) : 26–34.
- [7] SI P , YU F R , YANG R , et al. Dynamic spectrum management for heterogeneous UAV networks with navigation data assistance[C]. Wireless Communications & Networking Conference. IEEE , 2015.
- [8] 杜耀. 基于无人机的移动边缘计算资源分配算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2020.
- [9] CONTI M , GIORDANO S. Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions[J]. Communications Magazine IEEE , 2014 , 52(1) : 85–96.
- [10] AALAMIFAR F , LAMPE L , BAVARIAN S , et al. WiMAX technology in smart distribution networks: architecture, modeling, and applications[C]. 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition. IEEE , 2014.
- [11] DEMESTICHAS P , GEORGAKOPOULOS A , KARVOUNAS D , et al. 5G on the Horizon: key challenges for the radio-access network[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine , 2013 , 8(3) : 47–53.
- [12] 彭耿, 黄知涛, 李强, 等. 中低轨卫星信号的多普勒频移估计与补偿[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 256–260.

(收稿日期: 2021-05-17)

作者简介:

张少伟(1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 6G 天地一体化、频谱兼容性分析等。



扫码下载电子文档

(上接第 5 页)

- [32] GUAN X , WU Q , ZHANG R. Intelligent reflecting surface assisted secrecy communication: is artificial noise helpful or not? [J] arXiv : 1907.12839 , 2019.
- [33] XU D , YU X , SUN Y , et al. Resource allocation for secure IRS-assisted multiuser MISO systems[J]. arXiv : 1907.03085 , 2019.

(收稿日期: 2021-01-18)

作者简介:

李刚(1978-), 男, 硕士, 副高级工程师, 主要研究方向: 无线通信技术。

王瑜新(1980-), 通信作者, 男, 博士研究生, 副高级工程师, 主要研究方向: 5G/6G 通信标准, E-mail: scutwyx@126.com。

章秀银(1978-), 男, 博士, 正教授, 主要研究方向: 无线通信技术。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所