# 新一代移动通信系统与算法结合下的应用综述

孙晖1

1. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065）

摘 要：随着现代移动通信的快速发展，通信网络进入6G指日可待。不同于以往的无线通信技术，可重构智能表面成为了可以智能控制传输环境来提高系统频谱效率和能量效率，并具有低成本、易部署的优势，有望在未来6G通信网络中发挥特别重要的作用。通过对可重构智能表面出现的背景、概念、特点及优势、IRS在NOMA中的运用研究现状分析、相关算法的总结比较分析三个方面进行简要综述和讨论，旨在通过归纳总结下新一代移动通信系统在算法下有潜力使网络性能得到良好的改善，重塑无线传播环境，进而大幅提升通信性能。鉴于此，作为即时的IRS总结，将会引起IRS研究人员的兴趣并取得更多的研究成果。

关键词：可重构智能表面；6G；凸优化；NOMA

# **Application review of new generation mobile communication system combined with algorithm**

SUN Hui1

（1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China）

**Abstract:** With the rapid development of modern mobile communication, communication network into 6G is just around the corner. Different from the previous wireless communication technology, reconfigurable intelligent surface has become an intelligent control of the transmission environment to improve the system spectrum efficiency and energy efficiency, and has the advantages of low cost and easy deployment, which is expected to play a particularly important role in the future 6G communication network. By briefly summarizing and discussing the background, concept, characteristics and advantages of the emergence of reconfigurable intelligent surface, analysis of the current research status of IRS application in NOMA, summary and comparative analysis of related algorithms and future research directions, this paper aims to summarize the potential of the new generation of mobile communication system under the algorithm to improve the network performance. Reshape wireless communication environment, and then greatly improve the communication performance. In view of this, the immediate IRS summary will be of interest to IRS researchers for further research results.

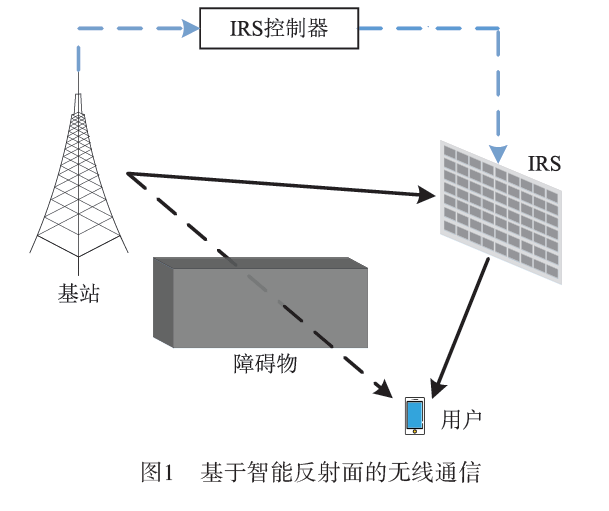
**Keywords:** Reconfigurable intelligent surface; 6G; Convex optimization; NOMA

## 0 引 言

蜂窝移动通信系统大约每十年更新一代，基本发展思路是通过引入新的关键使能技术来提高服务质量。第五代移动通信（5G）的目标是提供更高标准的移动通信基础设施，支持多种场景，如增强移动宽带通信、海量物联网、超高可靠超低时延通信等。随着5G标准颁布，5G网络开始在全球商用。可以预计，5G移动通信系统将支撑未来十年信息社会的无线通信需求，成为有史以来最复杂、最庞大的通信网络，并将在多方面深刻影响社会发展及人类生活[1-3]。尽管5G尚处于规模商用起步阶段，相关技术特性还需要继续增强完善，但是也有必要同步前瞻未来信息社会的通信需求，启动下一代移动通信系统（6G）技术的研究。就像从十年前看5G技术一样，未来6G技术似乎也只是当前5G的延伸。但是，新的用户需求、新的应用场景以及新的网络趋势将会带来更具挑战性的通信工程问题，因此需要全新的通信模式，尤其是在物理层。6G目标是满足十年后的信息社会需求，所以6G愿景应是现有5G不能满足而需要进一步提升的需求[3-4]。同时，移动通信网络正在向软件定义的模式发展，即通过软件实现对网络的实时配置和优化。但是无线环境的随机性和不确定性导致移动通信网络仍然有很多不可控因素存在。随着未来第六代移动通信（6G）的研究拉开序幕，6G被认为将以全覆盖、全频谱、全应用、强安全的形式满足人们日益增长的各类通信需求。6G将提供更大的容量、极低的延迟、高可靠性、高安全性和全空间覆盖。探索突破传统无线信道不可控因素，重塑无线传播环境，为6G的发展提供了新的思路。随着近些年来，可重构智能表面在通信领域的大范围实验应用得到了极大运用。

## 1 研究现状及进展

IRS 也称可重构智能面（RIS, Reconfigurable Intelligent Surface）、大型智能面（LIS, Large Intelligent Surface）、软件定义面（SDS, Software-Defined Surface）。 根据研究领域和角度不同，IRS 还有其它多种多样的称号[5-6]。IRS 是由很多个低成本、无源反射单元构成的表面，由一类可编程和可重构材料片组装而成，其所用电磁材料可以是先进的超材料。这些材料片能够自适应地修改其无线电反射特性。当连接到环境表面时，例如墙壁、玻璃、天花板等，IRS 能够将无线环境的一部分转换成智能可重构反射器，称为智能无线电环境(Smart Radio Environment，SRE)[7]，并由此利用它们进行无源波束赋形，可显著提高信道增益，与有源大规模MIMO 天线阵列相比，实现成本和功耗较低。智能反射面每个反射单元可以控制入射信号，可以改变的参数有相位、幅度、频率，甚至极化方向。目前讨论最多、最便于实践的是改变相位。如图1所示，即使在直线链路很不畅通的情况下，IRS 通过智能重构传播环境也可以形成良好的传播途径，从而显著提高无线网络的传输性能。



IRS通过控制传播环境能够扩展无线网络覆盖范围，提升无线网络频谱效率和能量效率。除了智能改善无线传输环境外，IRS通信技术其它的一些突出优点可归纳如下[8-9]：

（1）IRS 器件可以很方便地部署在室内、室外任何地方；

（2）IRS只控制反射，耗能少、电磁污染小，符合未来绿色通信要求；

（3）IRS 可以提高定位精度，增强物理层安全，支持全双工、全频带传输技术；

（4）IRS 低成本、易实现，便于应用在各种无线网络中，如物联网、车联网等。

IRS与快速发展中大规模MIMO 技术密切相关，特别是与传统MIMO 技术相结合，就可以形成一种富有发展前景的大规模MIMO 2.0[10]。利用它们进行无源波束赋形，可显著提高信道增益，与有源大规模MIMO 天线阵列相比，实现成本和功耗较低。此外，与必须足够紧凑以进行集成的天线阵列不同，SRE 实现在除了用户之外的大尺寸表面上，使得它们更容易实现具有超窄波束的精确波束赋形，这对于诸如物理层安全(Physical Layer Security，PLS)之类的一些应用是必不可少的。此外，与必须针对每种无线接入技术具体实施的主动MIMO 天线阵列不同，IRS 所依赖的被动反射机制几乎适用于所有射频和光学频率，这对于在超宽频谱中工作的6G 系统尤其有利。另一方面，从信号处理和数学描述上看，IRS 辅助无线系统类似于协作中继系统；但是从物理实现上看，两者则有明显区别，协作系统的中继要配有源天线元件才能产生新的中继信号。

尽管当今5G 无线通信可以具有动态调整的能力，但其对应的无线传播环境是随机的、不可控的，而IRS 技术则相反，可以智能控制无线传输环境。基于IRS 的智能无线通信是一项革新的技术，由于该技术具有从根本上改变当今无线网络设计和优化方式的潜力，所以会在未来6G 通信网络中发挥特别重要的作用。鉴于此，与传统的有源中继波束成形不同，RIS能够实现全双工无源波束成形反射，且不需要任何有源射频链用于信号传输、接收和自干扰抵消。RIS 还具有额外的实际优势，如低轮廓、轻重量和保持几何形状，因此RIS 可以实现灵活且大规模的部署。由于RIS 具有上述性能特点，其已被广泛研究并纳入各种无线通信环境中，如系统吞吐量、网络覆盖范围、通信安全、通信速率、信道估计等[11-12]。

## 2 IRS在NOMA中的运用研究现状分析

2.1 NOMA传输下IRS辅助发展情况

无线携能传输(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer，SWIPT)能够有效解决通信终端的能源受限问题，而IRS能够辅助增强SWIPT 的效率。因此，为了克服单个IRS 覆盖范围有限的缺点以及进一步提高SWIPT 的时间和频谱资源利用率，文献[13]考虑了一个双IRS 辅助的基于非正交多址接入技术(Non-orthogonal Multiple Access，NOMA)的无线携能通信系统，其中发送端的波束成形矢量、每个IRS 的相移以及接收端的功率分割系数将进行联合优化以最大化系统的最小用户速率。为解决上述有着高度耦合优化变量的非凸优化问题，文章提出一个基于半正定松弛技术(Semidefinite Relaxation，SDR)和连续凸逼近技术(Successive Convex Approximation，SCA)的交替优化(Alternative Optimization，AO)算法来高效求解该问题。

考虑一个IRS 辅助的SWIPT，并在满足用户通信速率要求的情况下，通过优化发送端的波束成形矢量和 IRS的波束成形矩阵最大化用户采集到的能量。此外，已经证明了相比于没有部署 IRS的SWIPT，部署了 IRS的SWIPT 能够在满足用户能量采集需求的情况下实现更高的通信速率和更高的能量效率。因此， IRS将是未来增强 SWIPT工作效率的一项不可或缺的技术。单个 IRS的覆盖范围是有限的，在一些复杂的无线电传播环境中，例如室内有多个转角的走廊或者室外有着密集障碍物的地方，从发送端到接收端的链路可能会被严重阻塞，造成信号传输过程的高损耗，即使部署单个IRS 仍无法在发送端和IRS 之间、或IRS 和接收端之间建立良好的低损耗链路，因此部署单个 IRS可能无法使系统实现预期的性能表现。而部署双 IRS则有更好的机会绕开障碍物，因此能够建立新的高质量链路，从而实现增强接收端的信号强度和系统的性能表现，这对于依赖于良好传播链路的 SWIPT而言是极其重要的。因此可以预期部署了双个 IRS的SWIPT相比部署单个 IRS的系统有着更多的设计自由度和更大的性能提升[14-15]。

2.2 无源 IRS辅助 NOMA系统

除此之外，非正交多址接入（NOMA）可以在同一时频资源块上为多个用户提供服务，使得通信系统可连接的并发用户数显著提升。 NOMA与 IRS两种关键技术可以相互融合，相得益彰。一方面， IRS可以通过调节各个RE的系数来改变各用户的信道条件以调控 NOMA对于用户信道差异性的需求；另一方面，相较于正交多址接入（NOMA）， IRS辅助的 NOMA系统能够在系统和速率及功耗方面带来更高的性能。因此很多学者考虑将两者进行融合研究与探索。

文献[16]提出了一种基于组合信道强度的用户排序方案，通过交替优化方法，并利用块坐标下降和半正定松弛(Semidefinite Relaxation, SDR) 技术解决了系统最小信干噪比(SINR) 最大化问题。为了使用 IRS提高小区边缘用户的性能，文献[17]提出了一个具有联合检测的两小区 IRS-NOMA系统功耗最小化问题，并将功率分配和IRS相位联合优化问题转化为纯相移问题以获得所提问题的最优解。文献[18]通过联合优化 IRS的波束成形和各用户的功率分配系数，研究了 IRS辅助的多用户上行 NOMA系统和速率最大化问题。仿真结果表面，与 OMA 相比， IRS辅助的 NOMA系统可获得更高的和速率。文献[19]考虑采用离散相位的 IRS辅助 NOMA系统，并采用连续相位旋转算法来解决离散相位优化问题，以实现系统和速率最大化。文献[20]研究了 IRS辅助的上行NOMA 系统功耗最小化问题，先通过用户发射功率与 IRS相移之间的关系将原始问题转化为纯相移问题，再利用 Max-Min算法对优化问题进行求解。文献[21]通过联合优化基站(Base Station, BS) 处发射波束成形和 IRS 处反射波束成形，从而最大限度地提高 IRS-NOMA网络的能量效率，以实现系统和速率最大化和功率最小化之间的最佳权衡。

2.3 有源 IRS辅助 NOMA系统

在上一小节中提到的无源 IRS辅助的系统其实具有明显的缺点，经 IRS反射的信号需要通过用户到 IRS和 IRS到 BS两条路径，接受信号会受到“双衰落”效应的影响。由于传统无源 IRS只能通过调节 Res的相位来补偿路径损耗，因此，为了将无源 IRS辅助通信系统的性能提升到一个更高水平，需要使用大量 IRS反射单元，这不利于 IRS的部署和设计。为了克服传统无源 IRS的“双衰落”效应，文献[22]提出了一种有源 IRS系统，既每个RE由有源负载辅助，可以用于反射和放大入射信号。因为有源 IRS会放大 IRS的相关噪声，所以使用有源 IRS时，不能忽略 IRS的相关噪声，这与传统无源 IRS存在明显的区别。在相同功率预算情况下，文献[23]对有源 IRS系统和无源 IRS系统的可达速率进行了比较，结果表明，如果功率预算适中且 IRS元件数量不是很大的情况下，有源 IRS的性能优于无源 IRS。文献[24]运用有源 IRS提升通信系统的物理层安全，结果表明，使用有源 IRS 技术可以有效缓解“双衰落”效应的影响，并且与无源 IRS相比，可以获得更高的保密性性能。文献[25]研究了有源 IRS辅助的多用户系统功耗最小化问题，并进一步基于双线性变换和内近似方法进行求解，仿真结果表面，部署有源 IRS是提高系统性能的高效方法。

2.4 优化算法

优化算法时，关键是要去优化变量之间存在的耦合关系，在存在非凸约束式时，求解难度大，为了有效解决该问题。在解决这类问题时采用了AO思想对优化变量进行解耦，将变量划分成为变量块，从而构成对应子问题。每个子问题在其他变量块固定的情况下，优化一个变量块。由于每个子问题仍然是非凸的优化问题，采用对应的优化算法可以将问题转换为可解的凸优化问题，从而能够使用凸优化算法对问题进行高效求解。

针对有源 IRS辅助的上行 NOMA系统和速率问题展开研究，其中有源 IRS的反射单元不仅可以调整入射信号的相位，也可以放大入射信号的幅度。对所建立的非凸和速率最大化问题，利用Charnes-Cooper 转换和半正定松弛(Semidefinite Relaxation, SDR)工具设计了一种高效的交替优化算法，对优化问题进行求解[26]。

2.5 性能方面比较

通过验证结果表明了双个 IRS辅助的系统比传统的单个 IRS辅助的系统能够实现更高的最小速率，证明了部署双个 IRS的优异性以及所提求解算法的有效性，同时通过和其他基准方案对比证明了联合优化 IRS相移及功率分割系数在提升系统性能方面的重要性。通过应用 SDR和 SCA技术，提出了一个基于交替优化的算法来高效求解所提出的有着耦合变量的难以求解的非凸优化问题，并分析了算法的收敛性以及计算复杂度。优化下系统相比其他基准方案总能实现最好的性能表现。

而在有源 IRS辅助的上行 NOMA系统的传输问题，将有源 IRS与 NOMA技术相结合，并引入有源 IRS的幅度约束和放大功率约束，建立了一个和速率最大化问题。通过交替优化分配子问题和有源 IRS波束成形子问题来最大化目标函数。可以有效的提高系统的和速率性能。

对于现阶段的研究总结不难发无论是在有源还是无源 IRS中都会涉及到在现在求解实际问题中，会存在许多非凸性问题且不可直接求解的表达式，但为了进一步分析问题通常会采用与多种算法相结合来解决这一问题。在下一节中我们将会具体的介绍几种常用的算法。

## 3 相关算法的总结比较

3.1 凸优化方法

多条件约束下的优化问题通常具有非凸的、分式的或者非线性规划的性质，一般将问题分成多阶段进行交替优化求解，并且还需要组合多种手段。

凸优化这一手段可以解决任何凸问题，并能保证得到目标问题的最优解。其中常用的方法就是使用连续凸逼近方法，将非凸的逐次凸逼近转化为凸问题；在处理有分式形式的优化函数时，可使用经典Dinkelbach方法将其转化为等价的凸问题进行求解。上述第二节中讨论的就是利用将非凸的目标问题分解为多个块，每个块为一个凸的子问题，每个块通过固定其他块来迭代求解[27-28]。

3.2 博弈论方法

博弈论（Game Theory, GT）方法中，每个玩家只需根据效用函数找到其最大效用值的动作，经过策略迭代可获得最优策略。作为分析多个决策者之间相互作用的有力工具，博弈论已被证明能够成功解决无线通信网络中的资源管理问题。

博弈论中多种模型，主要可分为合作博弈以及非合作博弈，目前关于资源管理方面的博弈模型主要分为非合作博弈。进化博弈可用在设计NOMA网络的功率控制方案。在异构的NOMA网络中，可将功率分配构建分布式的Stackelberg博弈。在合作鄙夷中，有共同利益追求的玩家通过组建联盟获取比独自博弈更优的效用值，这种思路可用于解决资源配置管理中的安全通信和计算卸载问题[29-32]。

3.3 AI方法

人工智能在各个领域正在蓬勃发展。在很多传统通信领域里提出了人工智能这一概念。比如提出了边缘智能（Edge Intelligence, EI）的概念。随着边缘计算将集中在云端的计算服务资源移向靠近终端的边缘，AI服务也能推向网络边缘，已有相关研究在资源管理中采用了人工智能相关的方法经行了相关的算法优化。使用深度学习强化学习方法，可解决轨迹控制、路径规划和计算卸载等问题。同样使用强化学习方法，将计算卸载的决策问题描述为马尔可夫决策过程，使用actor-critic算法学习最优策略[33-34]。

## 4 挑战及未来展望

由于 IRS辅助的无线通信是最近吸引研究人员关注的一个崭新技术，因此有许多重要的研究话题期待探讨。

4.1 当前部署情况

目前 IRS到用户间的信道经常采用的是简单的独立同分布瑞利衰落信道或者莱斯衰落信道，而在基站和IRS 之间通常采用 LOS信道。前者是不现实的，因为 MIMO衰落信道在实际应用中几乎总是空间相关的，而后者会构成针孔信道，从而限制系统有效服务多个用户的能力。研究 IRS到用户间的相关信道模型和基站到 IRS间的高秩 LOS信道无疑是重要的话题，目前虽有些探索，但还远不够深透、成熟。 IRS发展将需要IRS的空间相关模型，初步工作通过用相关瑞利模型代替典型的独立同分布瑞利模型，可是传统的离散天线阵列统计模型并不直接适用，因为基于超材料的IRS 是使用完全不同的技术实现的。对相关信道的正确建模，要充分了解 IRS内在的相关结构以及 IRS大尺度与小尺度衰落特征，这需要既熟悉通信技术又懂电磁理论的研究人员进行深入探讨。目前有许多工作是通过解决复杂的非凸优化问题来使 IRS相移得到优化的，这样得到的优化相移和系统性能因为是通过计算得到的数字解，一般很难获得依赖于信道参数的理论表达式，除了特殊的情景，如单 IRS单用户情况。理论分析表达式是特别重要的，因为能使人们洞察信道和系统参数对系统性能的影响程度，比如说获得 IRS的功率缩放律，给出 IRS优化设计指南。因此，未来需要发展易于处理和便于洞察的理论分析框架以便刻画 IRS的利益及作用，尤其是对于分布多个 IRS的场景。相比较而言，目前人们对IRS 能带来的复用方面的潜在利益还不清楚。

4.2 存在的问题

从硬件单元上来说，关于 IRS的单元结构的设计、材料选择上还是面临许多问题。目前 IRS单元支持的量化级数相对较低，因此未来需要考虑更优的单元结构设计以支持更多的量化级数；未来频谱将扩展至更高频段，对 IRS的单元结构设计、控制电路设计和材料选择等要去也会相应的提高。

从算法角度来看，在基于 IRS的通信场景中，针对相应的关键技术开展了许多算法设计的研究，本文中也简要的介绍了三中基础性的算法。但是， IRS往往配置了大量的电磁单元，导致目前的算法设计的复杂程度很高，另外， IRS通常目前来说配置的都是无源单元结构，不具备信号处理的能力，所以需要考虑算法设计的实际应用场景。而且，未来 IRS应用的场景势必会越来越多，所需要的针对不同场景而设计的算法也会相应的增加。因此，在 IRS辅助通信的算法设计中，需要考虑到复杂度、实际应用场景等问题。

从网络空间部署来看， IRS作为一种全新的技术，其未来在通信网络中部署依然会面临许多问题。例如，在通信网络中存在众多的业务与系统，因此在通信网络中部署 IRS时需要考虑与多个系统的共存问题：在高密度区域，密集部署 IRS需要考虑 IRS间的协同以及 IRS间的信号干扰等问题；不同的场景需要不同的部署策略，可以根据实际通信需求 IRS的相应部署，并且需要考虑 IRS的部署位置、密度和部署成本与性能的平衡等[35]。

4.3 未来展望

总体上来看：随着 5G商业化部署的开展， 6G的研究也在国内外得到广泛的探讨。 IRS技术有望在未来 6G通信中发挥特别重要的作用，尽管当前已有很多研究结果涌现，从总体上来看，虽然关于 IRS的研究才刚起步。但是 IRS可以智能调控电磁波，以形成智能可重构的无线环境，因此给未来移动通信的发展提供了一种新范式。而且 IRS可以实现空间补盲、边缘覆盖增强和抑制邻小区干扰等功能，并且可以与多技术融合以产生更多新的应用，因此成为 6G的关键技术之一。但是将 IRS服务于未来的实际应用依然存在许多问题，包括硬件实现，算法的设计以及网络空间的部署等。还是需要开展更多的关键技术评估和实际测试，以加快 IRS在未来商用和标准化进程。鉴于此，本文综述了 IRS的研究进展，并讨论了未来值得进一步开展的研究话题。与此同时关于下一代通信系统与不同算法结合程度越来越紧密，势必会引发更大的通信革命。

势必未来的通信发展将不会再只是一个单一学科的深度发展的时期，更是纵横发展的关键，交叉学科的深度融合势必会开启一个进的发展方向。这同时也要求我们在学习本专业领域的知识方面更应该有兼容并包的学习态度，保持戒骄戒躁的学习态度。持之以恒，有的放矢才能更好的成就一番学业能力。对于科学研究也要保持自己的质疑的态度，这才是推动科学进步的关键。用辩证的思想来看来和解决在科研方面遇到的问题。这才是最好的不二法门。

## 参考文献

[1] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014,44(5): 551-563.

[2] AJ G, B S,C W, et al. What Will 5G Be [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014,32(6): 1065-1082.

[3] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络：愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019,49(8): 963-987.

[4] C M Z, S M, A S, et al. 6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2019,1: 957-975.

[4] C T J, Q M Q, W X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light Science & Applications, 2014(3): e218.

[5] 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.

[6] C T J, L S, Z L. Information metamaterials and meta surfaces[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017(5): 3644-3668.

[7] 张辉，李国权. 基于智能反射面的NOMA系统波束赋形算法研究[J]. 电信技术2022,3:216-315

[8] MANSUKHANI J, RAY P. Censored spectrum sharing strategy for mimo systems in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019，18（12）：5500-5510.

[9] Z J. A Survey of Reconfigurable Intelligent Surfaces: Towards 6G Wireless Communication Networks with Massive MIMO 2.0[J]. arXiv preprint arXiv: 1907.04789, 2019.

[10] M D R, M D, D T, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: An idea whose time has come[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019,129.

[11] XU Y J, HU Y, CHEN Q B, et al. Optimal power allocation for multiuser OFDM-based cognitive heterogeneous networks[J]. China Communications, 2017, 14(9): 52-61.

[12] XU H, LI B. Resource allocation with flexible channel cooperation in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(5): 957-970.

[13] 吴家锐, 崔苗, 张广驰, 等. 可重构智能表面辅助的非正交多址接入系统的安全通信研究 [J]. 广东工业大学学报, 2022, 39 (03): 49-54+69.

Wu Jiarui, Cui Miao, Zhang Guangchi, et al. RIS-assisted secure communication in non-orthogonal multiple access systems [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2022, 39 (03): 49-54+69.

[14] Zhang Dingcai, Wu Qingqing, Cui Miao, et al. Throughput maximization for IRS-assisted wireless powered hybrid NOMA and TDMA [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10 (9): 1944-1948.

[15] Li Zhendong, Chen Wen, Wu Qingqing, et al. Joint beamforming design and power splitting optimization in IRS-assisted SWIPT NOMA networks [J].

[16] YANG G, XU X Y, LIANG Y C. Intelligent reflecting surface assisted non-orthogonal multiple access[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).2020:1-6.

[17] WANG H, LIU C, SHI Z, et al. Power minimization for for two-cell IRS-aided NOMA systems with joint detection[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(5):1635-1639.

[18] ZENG M, LI X W, LI G, et al. Sum rate maximization for IRS-assisted uplink NOMA[J]. IEEE Communications Letters, 2021,25(1):234-238.

[19] 王强，王鸿. 智能反射面辅助的下行 NOMA系统和速率最大化研究[J]. 南京邮电大学学报（自然科学版）,2022,42(1)23-29.

[20] 马昊淳，王鸿. 智能反射面辅助的上行 NOMA系统低功耗传输方案研究[J]. 南京邮电大学学报(自然学科版),2021,41(5):30-35.

[21] FANG F, XU Y Q, PHAM Q V, at el. Energy-efficient design of IRS-NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020,69(11):14088-14092.

[22] LONG R Z, LIANG Y C, PEI Y Y, et al. Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8):4962-4975.

[23] ZHI K D, PAN C H, REN H, et al. Active RIS versus passive RIS: which is superior with the same power budget? [J]. IEEE Communications Letters,2022,26(5):1150-1154.

[24] DONG L M, WANG H M, BAI J L, Active reconfigurable intelligent surface aided secure transmission[J]. IEEE Transactions on Vehicular Techology,2022,71(2):2181-2186.

[25] XU D F, YU X H, KWAN NG D W, et al. Resource allocation for active IRS-assisted multiuser communication systems[C]//55th Asilomar conference on Signals, Systems, and Computers. 202:113-119.

[26] 杨小龙，王鸿. 有源IRS辅助的上行NOMA系统和速率最大化研究[J]. 南京邮电大学学报(自然学科版),2023,43(2):46-52.

[27] RIAZ S, PARK U. Power control for interference mitigation by evolutionary game theory in uplink NOMA for 5G networks[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers,2018,41(1):18-25.

[28] SONG Z, NI Q, SUN X. Distributed Allocation for Nonorthogonal Multiple Access Heterogeneous Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(3): 622-625.

[29] XU M N, CHEN Y J, WANG W.A Two-Stage Game Framework to Secure Transmission in Two-Tier UAV Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 13728-13740.

[30] CHEN J, CHEN P, WU Q, et al. A game-theoretic perspective on resource management for large-scale UAV communication networks[J]. China communications, 2021, 18(1):70-87.

[31] YAO W, HUANG J. Research on UAVs cooperative task off-loading strategy based on mobile edge computing[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Nature Science). 2022, 34(3):50-514.

[32] ZHOU Z, CHEN X, LI E, et al. Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence with Edge Computing[J]. Proceeding of the IEEE, 2019, 107(8):1738-1762.

[33] XU Y J, ZHAO X H. Robust power control for underlay cognitive radio networks under probabilistic quality of service and interference constraints[J]. IET Communications, 2014, 8(18): 3333-3340.

[34] ZHU S, GUI L, CHENG N, et al. UAV-enable computation migration for complex missions: A reinforcement learning approach[J]. IET Communications, 2020, 14(15):2472-2480.

[35] 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.