

中文摘要

由于第五代移动通信技术(The Fifth Generation, 5G)的不断普及, 无线连接设备爆炸式的增多对数据速率要求越来越高, 频谱和能量效率的利用也面对极大的挑战。为了提高 5G 无线系统的性能, 使用可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)来创建智能无线电环境的研究出现了热潮。RIS 配备了无源反射元件, 表面以可编程的方式操纵入射电磁波的传播, 从而主动改变信道实现, 将无线信道转变为可优化的可控系统块, 以提高整体系统性能。RIS 是一项新兴的革命性的无线通信技术, 有望经济高效地实现频谱和能量效率的提升。同样, 非正交多址技术(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)也是一项很有前途的技术, 该技术可降低延迟、增强连通性和可靠性, 提高能量和频谱效率。由于 NOMA 的固有优势以及易于融合现有的其他通信技术, NOMA 已经成为新一代无线通信的关键技术。RIS 与 NOMA 技术的结合可有效提高系统的性能。然而, 在实际的通信过程中通信系统受到很多非理想因素的影响, 如矩形阵列 RIS 元件间空间相关、收发器的硬件损伤等诸多问题, 这些非理想因素对通信系统的影响需要探索。本文的主要工作如下:

(1) 研究了收发器硬件损伤和空间相关性对 RIS 辅助通信系统中断性能的影响, 考虑基站通过 RIS 辅助链路与一个直接链路被阻挡的用户通信。首先进行空间相关信道的建模, 给出了瞬时的端到端信号噪声失真比的表达式, 并在此基础上分别推导了 RIS 相等相移和随机相移情况下中断概率的闭合表达式, 并进一步获得了遍历容量上界。通过蒙特卡洛仿真从多个角度评估了所研究的 RIS 辅助系统的性能, 验证了理论分析的准确性以及空间相关性和硬件损伤对 RIS 通信系统的不利影响, 中断性能和遍历容量均随硬件损伤加重而显著下降。

(2) 分析了空间相关 RIS 辅助下行 NOMA 通信系统的中断性能。通过 RIS 辅助小区边缘用户以增强其与基站之间的通信, 并提高覆盖范围。在瑞利衰落信道下, 给出小区中心用户的中断概率闭合表达式, 根据 RIS 不同的相移配置分析边缘用户的中断概率的闭式。仿真结果验证了分析的中断概率表达式的精确性, 评价了空间相关和相移选择对 RIS 辅助的边缘用户的影响, 发现相移相等时, 空间相关有助于边缘用户的中断性能提升; 在随机配置相移下, 相关性对边缘用户有不利影响。

关键词: 可重构智能表面; 非正交多址; 空间相关; 硬件损伤; 中断概率; 遍历速率

ABSTRACT

Due to the increasing popularity of the fifth generation mobile communication technology (5G), the explosion of wireless connected devices requires higher data rates, and the use of spectrum and energy efficiency is also facing great challenges. In order to improve the performance of 5G wireless systems, there has been a boom in research into the use of Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) to create a smart radio environment. RIS is equipped with passive reflective elements that manipulate the propagation of incident electromagnetic waves in a programmable manner on the surface, thereby actively changing the channel implementation, transforming the wireless channel into an optimizable controllable system to improve overall system performance. RIS is an emerging and revolutionary wireless communication technology that promises cost-effective improvements in spectrum and energy efficiency. Similarly, Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) is a promising technology that reduces latency, enhances connectivity and reliability, and improves energy and spectral efficiency. Due to NOMA's inherent advantages and ease of integration with other existing communication technologies, it has become a key technology for the next generation of wireless communication. RIS and the combination of RIS and NOMA technology can effectively improve performance of systems. However, in the actual communication process, the communication system is affected by many non-ideal factors, such as the spatial correlation between rectangular array RIS components, and the hardware impairments of the transceiver. The main work of this article is as follows:

(1) The article investigates the performance of RIS-assisted systems with hardware impairments under spatially correlated channels, where RIS assists the base station to communicate with the user with the direct link blocked. First, the channel spatial correlation and hardware impairment are modelled, and then the instantaneous end-to-end signal noise distortion ratio (SDNR) expression is presented. Based on these, in the two cases including RIS's equal phase shift and

random phase shift, the respective closed-form expression of outage probability is derived, and further the upper bounds of ergodic capacity are obtained. The performance of the focused RIS-assisted systems is assessed from multiple perspectives via Monte Carlo simulations. Moreover, the accuracy of the theoretical analysis is confirmed, and the adverse effects of both spatial correlation and hardware impairments on RIS communication system are depicted. Both the outage performance and ergodic capacity degrade significantly with hardware impairments worsen.

(2) The paper analyzes the outage performance of spatially correlated reconfigurable intelligent surface-assisted downlink non-orthogonal multiple access communication systems. In order to improve coverage, the edge user of cell can be assisted by RIS to enhance communication with base stations. Under the Rayleigh fading channels, the closed-form outage probability expression of the cell center user is analyzed. According to the different phase shift configuration of RIS, the outage probability of the edge user is derived. The simulation results verify the accuracy of the outage probability expressions, and the effects of spatial correlation and phase shift selection on RIS assisted edge user are evaluated. When the equal phase shift, the spatial correlation significantly improves the edge user of cell performance, In the case of random phase it is found that the phase shifts are equal shift, the spatial correlation is unfavorable to edge user.

Key words: Reconfigurable intelligent surfaces; Non-Orthogonal Multiple Access; Spatial correlation; Hardware impairments; Outage Probability; Ergodic Rate

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 移动通信研究现状	2
1.2.2 NOMA 研究现状	3
1.2.3 RIS 研究现状	4
1.3 研究内容与创新	6
1.4 论文章节安排	6
第二章 相关基础理论	9
2.1 引言	9
2.2 NOMA 技术	9
2.2.1 NOMA 技术简介	9
2.2.2 SIC 技术	9
2.2.3 下行功率域 NOMA 系统	11
2.3 RIS 技术	12
2.3.1 RIS 概述	12
2.3.2 RIS 通信系统模型	15
2.4 本章小结	16
第三章 非理想情况下 RIS 通信系统研究	17
3.1 引言	17
3.2 系统模型	18
3.2.1 考虑硬件损伤的 RIS 系统	18
3.2.2 RIS 空间相关模型	19
3.3 RIS 随机和相等相移下的中断概率和遍历容量	19
3.3.1 信号噪声失真比	19
3.3.2 中断概率	20
3.4 仿真结果	24
3.5 本章小结	28
第四章 空间相关 RIS 辅助 NOMA 通信系统	31
4.1 引言	31

4.2 系统模型	32
4.3 中断概率分析	33
4.4 仿真结果	37
4.5 本章小结	40
第五章 总结与展望	43
5.1 全文总结	43
5.2 工作展望	43
参考文献	45
致 谢	51
攻读学位期间取得的科研成果	53

第一章 绪 论

1.1 研究背景与意义

移动通信技术是近几十年来发展最快的技术之一，也关系到人们生活的方方面面。目前，我国已进入信息时代，人们的生活已离不开智能终端设备，如：智能手机、智能家电，这也推动了移动通信技术的发展。从第一代移动通信技术（The First Generation, 1G）发展到如今的第五代移动通信技术（The Fifth Generation, 5G），这成为移动通信技术发展进入新征程的显著标志。随着互联网技术发展速度的不断加快，为 5G 能够取得长足发展提出了新的挑战，例如在频谱与网络建设方面存在不足、数据流的增加以及 1 毫秒的往返延迟，使得巨大的能源消耗成为 5G 网络中最具挑战性的问题之一^{[1][2]}。

为了解决无线通信发展受频谱资源制约的影响，由于良好的过载性能，非正交多址接入（Non-orthogonal Multiple Access, NOMA）技术受到广泛研究^[3]。面对移动互联网和物联网需求的不断增长，5G 无线通信面临的挑战有海量连接和高频谱效率等，与传统正交多址接入（Orthogonal Multiple Access, OMA）技术的区别在于 NOMA 可以满足 5G 频谱效率和大规模连接的需求^[4]。引入 NOMA 到 5G 中，是因为它有两种优势，即优异的过载接入性能和吞吐量性能。NOMA 方案大体上可以分为两类：码域的多路复用和功率域的多路复用，使得不同信道的多用户可以共享同一资源块。基于码域的多路复用 NOMA 类似于码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）或多载波码分多址（Multi Carrier - Code Division Multiple Access, MC-CDMA），多用户共享相同的时频资源，依靠码域区分用户。NOMA 允许不同用户占用相同的频谱、时间和空间等资源，相比于 OMA 技术取得显著的性能增益，特别是在时延限制情况下^[5]。

随着未来第六代移动通信技术(The Sixth Generation, 6G)及以后无线网络的潜在新用例和具有挑战性的要求，未来的移动通信看起来令人兴奋。尽管在毫米波通信（Millimeter Wave）、大规模多输入多输出（Massive MIMO）和超密集网络（Ultra-Dense Network, UDN）等技术的支持下，已经可以实现 1000 倍网络容量的增加和 1000 亿设备的实时连接^[2]。但这些技术有一些共性，例如实现复杂度较高、硬件设施成本高和能耗较大。

自现代无线通信开始以来，传播媒介一直被视为发射机和接收机之间的随机行为，因为无线电波从发射机发射后，在被接收机接收之前，无法控制或定制无线信道，使得信号在传播过程中本质上是随机的，传播环境存在许多不可控的因素降低了接收信号的

质量^{[6],[7]}。如果可以将环境中的不可控因素改变为可控因素,那么无线通信系统的性能就会得到较大的提升。

为了解决上述问题,许多学者们开始探索 5G 技术之后可应用更具潜力的替代技术,为 6G 奠定基础。作为一项新的通信技术可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)出现在公众视野中^{[7][8]},吸引了很多研究者的注意。RIS 的传输概念完全不同于现有的 MIMO、波束形成、放大前向中继和后向散射通信范式,RIS 中有大量小型、低成本和无源元件,仅反射具有可调相移的入射信号,而不需要专门的能量源进行射频(Radio Frequency, RF)处理、解码、编码或重传^[9]。通过巧妙地协调反射,可以灵活地重新配置发射机和接收机之间的信号传播或无线信道,以实现所需的信号或信道分布,从根本上解决无线信道衰落损伤和干扰问题,并有可能实现无线通信可靠性和容量质的飞跃^[10]。智能反射面重量轻,面积小,很容易被安装或移除,例如,在工厂的天花板、建筑物的立面和室内墙壁、人体服装上等都可以安装 RIS,在实际应用中具有高度灵活性^[6]。此外,为了满足不同的应用场景,可以制造出符合实际的任意形状表面 RIS^[11]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 移动通信研究现状

1G 是移动通信技术的初始发展,在 90 年代初被研制出来,1G 主要使用的是模拟传输中的频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)技术,传输速度较慢,一般只有大约 2.4Kbit/s,且 1G 的业务量也较小,再加上加密性的缺乏,导致网络质量和安全性都较差。在 1G 的基础上研发出了第二代移动通信技术(The Second Generation, 2G),业务量被扩大,传输速度以及安全性也有所提升,2G 主要是采用较密集的频率,通过 CDMA 和时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)技术来提高网络安全性,有效避免业务量增加造成系统容量不足问题,2G 也出现很多新功能,比如:语音技术,这为人类的生产生活带来诸多便利。

在 1G 和 2G 的基础上,第 3 代移动通信技术(The Third Generation, 3G)也应运而生,它为广大用户提供了更多的服务,比如宽带业务,宽带业务又包含很多种,例如高速图像、电视图像等。3G 主要由时分同步码分多址(Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access, TD-SCDMA)、CDMA2000 以及宽带码分多址(Wide band Code Division Multiple Access, WCDMA),三项技术支持,三者之间是一个相互兼容的状态。但 3G 仍有局限性,其通信系统不能实现全球通信,且 3G 频谱利用率较低。

第四代移动通信技术(The Fourth Generation, 4G)在 2009 年问世,在 3G 的基础上融合了无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)技术,4G 采用正交频分多址

(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 接入技术, 引入多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 通信系统, 使得 4G 传输速度达 100Mbit/s。

表 1.1 国内运营商移动通信频谱长度及使用主要频段

Table 1.1 Length of mobile communication spectrum and main frequency bands used by domestic operators

1G	2G	3G	4G	5G
	移动: 39MHz 联通: 16MHz 电信: 15MHz 主要频段: 900MHz、1.8GHz	移动: 15MHz 联通: 15MHz 电信: 15MHz 主要频段: 1.9、2.1GHz	移动: 130MHz 联通: 50MHz 电信: 55MHz 主要频段: 1.9、2.3、2.6GHz	移动: 160MHz 联通: 100MHz 电信: 100MHz 主要频段: 2.6、3.5、4.85GHz

但随着 4G 无法满足设备连接数的不断增加、更高的速率需求以及更低的时延要求, 5G 随之而生, 它主要借鉴无线通信技术原理, 进一步拓宽了网络的覆盖面, 满足人们对网络的需求, 确保移动通信系统的正常运行^[12]。表 1.1 是目前国内运营商移动通信频谱长度以及使用主要频段。在 5G 以及即将到来的 6G 时代, 速率只是评价通信系统好坏指标之一, 评价一个系统要通过用户接入量、频谱效率、能量效率、安全性能等指标来衡量。由于 NOMA 技术是一种极具潜力的接入方式从而受到广泛的研究, 实现更灵活的 NOMA 接入方案, 一些新兴的技术引起了研究学者的注意, 如在 NOMA 通信系统中部署低成本反射组件 RIS。

1.2.2 NOMA 研究现状

随着无线通信需求的不断增长, 未来移动通信的需求已经不能被传统的通信模式所满足。面对 5G 海量连接、高可靠性以及低时延的要求, 特别是现如今频谱资源越来越宝贵的情况下, 如何能有效提高移动通信系统的频谱资源利用效率, 是未来无线通信需要解决的主要问题之一^[13]。由于 1G 到 4G 接入用户都是利用正交频谱资源, 这使得频谱资源利用率极低, 不能满足 5G 的需求。目前 NOMA 被认为是 5G 通信系统中有前途且关键的候选技术之一, 因为它可以在同一时频资源中可以叠加多个用户发送信息, 通过使用过载的方法来提升系统的频谱资源利用率^[13]。

在 NOMA 通信系统中研究的性能指标主要包括遍历速率、中断概率、和速率以及误码率等。文献[14]将功率域 NOMA 和码域 NOMA 放置在不同的应用场景, 根据不同参数设置比较误码率性能, 发现采用不同的发射端和接收端算法, NOMA 技术可以达到更好的性能。基于 NOMA 双跳协作中继网络, 选择一个最佳中继作为该网络主节点,

实现发射端和接收端之间的通信,使用解码转发(Decode-and-forward, DF)和放大转发(Amplify-and-forward AF)中继,研究了遍历和速率以及中断概率,发现基于 NOMA 的 DF 中继优于基于 NOMA 的 AF 中继和其他现有的基于 NOMA 的协作通信方案^[15]。文献[16]研究了下行链路 NOMA 访问系统的性能分析,其中信道增益遵循 α - μ 衰落分布,推导了 DL-NOMA 的中断概率、误码率和遍历容量的闭合表达式,发现具有 OMA 数据速率的 NOMA 用户比具有固定目标数据速率的 NOMA 用户有更高的中断概率。文献[17]提出了一种基于混合伽玛分布的复合衰落信道上 NOMA 通信系统,分析了由于存在硬件缺陷和延迟约束而导致的不完善连续干扰消除上行 NOMA 的中断概率、延迟限制吞吐量和有效容量。文献[18]分析了下行 NOMA 通信系统在 Nakagami-m 衰落信道中功率分配对近用户和远用户误码率的影响。文献[19][20]研究了 NOMA 通信系统,推导了用户的中断概率表达式。文献[21]研究了用户的信息容量,结果表明,功率分配系数的适当选择会影响每个用户的信息容量,功率分配系数的选择对于 NOMA 技术的正常运行至关重要。文献[22]分析了 NOMA 用户容量和通信系统总容量。

1.2.3 RIS 研究现状

RIS 被认为是未来 6G 无线通系统中十分有前景的候选技术之一,通过使用大量低成本无源反射元件灵活地协调反射信号,RIS 操控入射电磁波的传播是通过可编程的方式,通过主动改变信道来提高无线通信系统的性能。RIS 把无线信道转成可优化的可控系统模块,以提高无线通信系统的整体性能^{[10][23]}。相比于现有的技术,RIS 实现了可编程控制的无线环境传播媒介,RIS 的可重构性在提高覆盖率和能量效率有很大的潜力,可嵌入在室内墙壁和室外建筑物的外立面上,使其成为 6G 中一个革命性的解决方案^[24]。

近年来,RIS 的出现引起了研究者的广泛研究。RIS 修改入射波的相位以提高接收端的信号质量,Basar^[25]提出了使用 RIS 作为接入点(Access Point, AP)的新概念,并通过推导接收信噪比的分布,评估了基于 RIS 传输的潜力。文献[26]研究了一个 RIS 辅助的多输入单输出(Multiple-Input Single-Output, MISO)通信系统,具有多天线的基站(Base Station, BS)在均匀矩形阵列(Uniform Rectangular Array, URA) RIS 的帮助下服务单天线用户,在 RIS 处采用固定相移最大比传输(Maximum-Ratio Transmission, MRT),推导了中断概率的表达式。Yang 等^[27]推导了 RIS 辅助单输入单输出(Single-Input Single-Output, SISO)通信系统的覆盖率,为了比较,还推导了中继辅助 SISO 系统和直接链路传输系统的覆盖率,分析了 RIS 放置在收发机中间位置的信噪比增益的概率,还分析了 RIS 在实现超可靠的低延迟传输时的中断概率,仿真发现使用 RIS 可以扩大链路的覆盖范围,提高信噪比增益,减少链路延迟。文献[28]研究了瑞利衰落信道下配备有限个 RIS 反射元

件以增强 SISO 系统的性能, 将覆盖率的闭合表达式表示为统计信道信息的函数, 并且推导了具有任意相移的 RIS 通信系统的遍历容量闭合表达式。文献[29]研究了一个分布式的 RIS 通信系统, 其由多个小尺寸的 RIS 单元构成, 每个 RIS 单元都有一个独立的信号处理单元(Signal Process Unit, SPU), 每个 SPU 连接到中央处理单元协调所有的 RIS 单元, RIS 单元由有限个元件组成且同时服务多个用户, 基于 RIS 单元能够有效抑制用户间干扰的优异特性, 解决和速率最大化的用户分配问题。

关于 RIS 辅助通信系统, 上述文献仅考虑理想情况下的性能, 实际系统中的硬件并不是完美运行的, 因此一些学者关注硬件损伤对 RIS 辅助通信系统的影响。Hu 等^[30]研究了分布式 RIS 系统存在硬件损伤的情况下, 系统容量显著降低, 并给出了系统容量的闭合表达式, 作者通过考虑了 RIS 系统的分布式实现, 将其分解为多个小尺寸的 RIS 单元, 硬件损伤对容量的影响可以被显著抑制。文献[31]建立了关于 RIS 硬件损伤的模型, 采用简化的接收机结构分析了硬件损伤对可达信息速率的影响, 推导了可达速率的表达式, 并研究了 RIS 硬件损伤相关结构的影响。考虑 RIS 和收发器均存在硬件缺陷的情况下, Liu 等^[32]重点研究了 RIS 系统的能源效率, 推导出最佳的接收合并和发射波束赋形向量, 研究了渐近的信道容量, 揭示了硬件损伤明显限制了 RIS 辅助无线通信系统的性能。另外, Xing 和 Wang 等^[33]研究了 RIS 辅助无线系统的平均可达速率, 证实了硬件损伤降低可达速率和 RIS 效用。虽然硬件损伤会对 RIS 产生影响, 但当反射元件数量足够大或发射功率足够大时, RIS 仍有可能超越传统的译码转发中继, 不过没有提供中断性能的分析^{[31][33]}。文献[34]研究了收发器硬件缺陷对 RIS 辅助无线通信系统的影响, 推导了信号噪声失真比的表达式, 并且得到了精确的系统中断概率的闭合表达式。文献[35]同时考虑相移误差和收发器硬件损伤同时存在的 RIS 辅助无线物联网网络, 在可调 RIS 相移、统计相移误差和传输时间调度的约束下, 提出了系统总吞吐量的最大化问题, 以评估相移误差和收发器硬件损伤同时存在的总体性能。作者 Yang 等研究了不完全信道状态信息对 RIS 辅助无线系统的影响, 考虑到从 RIS 到接收端的不完美 CSI, 推导出了中断概率、平均误码率和平均容量的闭合表达式^[36]。作者 Han 和 Liu 等对 Fisher Snedecor F 分布信道上 RIS 辅助 FSO 通信系统的性能进行了分析, 考虑了两种检测方案下的不完美信道状态信息和指向误差, 根据多变量 Fox 的 H 函数推导了信噪比的概率密度函数和累积分布函数并推导出了中断概率、平均误码率和遍历容量的表达式^[37]。

针对上述文献中所考虑的非理想条件, 本学术论文的研究工作主要考虑了收发器硬件损伤和空间相关信道。

1.3 研究内容与创新

本文在 RIS 辅助的通信系统模型^[43]的基础上考虑了硬件损伤和空间相关性对用户中断概率以及遍历容量的影响，并分析了空间相关性对 RIS 辅助 NOMA 通信系统中断概率的影响，通过实验仿真验证了理论分析的准确性以及不同参数对 RIS 辅助通信系统的影响。

本学位论文主要研究内容介绍如下：

一、非理想条件下RIS通信系统性能研究

在第三章中，提出了RIS辅助通信系统的系统框架，考虑了空间相关性以及收发器硬件损伤共存的情况下研究了两种RIS相移设计下RIS辅助通信系统的中断性能和遍历容量，给出了中断概率闭式解以及遍历容量上界表达式。通过MATLAB进行了相应的仿真验证，验证了理论分析的准确性。

二、空间相关RIS辅助NOMA通信系统

在文献[44]的基础上，第四章考虑RIS辅助下行NOMA通信系统模型，研究了空间相关性对该通信系统的影响。NOMA分配给用户不同的功率来叠加信号，采用SIC对NOMA用户的信号进行解码，写出用户的信号噪声失真比，推导中心用户和边缘用户的中断概率闭式解，仿真结果证明数值分析和蒙特卡罗仿真曲线已经完全重合，证明了理论分析的准确性。

1.4 论文章节安排

本文总共分为五个章节，内容分别如下：

第一章：绪论介绍了本学术论文的选题背景和研究意义，指出目前通信行业存在的问题，总结了无线通信技术发展史、NOMA以及RIS辅助通信的研究现状。最后对本学位论文的研究内容和结构作了简要介绍。

第二章：介绍了本学术论文所使用的相关技术，分别是NOMA和RIS技术。对这两项技术的工作原理进行了简要介绍，并对其经典的系统模型进行了描述。

第三章：考虑了非理想情况下 RIS 辅助通信系统，推导了两种 RIS 相移设计的中断概率闭合表达式以及遍历容量上界，通过计算机仿真验证了表达式的准确性并分析了不同参数设置对该通信系统的影响。

第四章：考虑了空间相关 RIS 辅助 NOMA 通信系统，推导了中心用户 U_C 和边缘用户 U_E 中断概率的闭合表达式。理论分析与蒙特卡罗仿真完全重合，分析了空间相关性对该通信系统的影响。

第五章：主要是对本文的创新点和研究内容进行了总结，并对下一步的工作进行了展望。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/905123134223011244>