

融合网络编码的无线协作中继网络资源分配*

马小林^{1,2,3}, 李方敏^{1,2,3}, 刘新华^{1,2,3}

¹(武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

²(光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070)

³(宽带无线通信与传感器网络湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

通讯作者: 李方敏, E-mail: lifangmin@whut.edu.cn

摘要: 综述融合网络编码的无线协作中继网络资源分配的研究进展,总结了已有典型资源分配策略的特点、性能及系统设计要求,分析了网络编码技术(包括数字网络编码和物理层网络编码)的引入对无线协作中继网络资源分配策略设计的影响,给出了一种实用化的系统级跨层优化框架及设计基本原则,并探讨了无线协作中继网络资源分配研究的发展趋势及其走向实用化所亟待解决的关键问题。

关键词: 无线协作中继网络;资源分配;网络编码;跨层;实用化

中文引用格式: 马小林,李方敏,刘新华.融合网络编码的无线协作中继网络资源分配.软件学报,2013,24(Suppl.(1)):76-87.
http://www.jos.org.cn/1000-9825/13009.htm

英文引用格式: Ma XL, Li FM, Liu XH. Resource allocation for wireless cooperative relaying networks with network coding. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl. (1)): 76-87 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/13009.htm

Resource Allocation for Wireless Cooperative Relaying Networks with Network Coding

MA Xiao-Lin^{1,2,3}, LI Fang-Min^{1,2,3}, LIU Xin-Hua^{1,2,3}

¹(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

²(Key Laboratory of Fiber Optical Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan 430070, China)

³(Hubei Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network, Wuhan 430070, China)

Corresponding author: LI Fang-Min, E-mail: lifangmin@whut.edu.cn

Abstract: This paper surveys the state-of-the-art researches of wireless cooperative relaying networks with network coding, investigates representative resource allocation strategies, and analyzes their features, performance and system requirements. It then discusses the effects of network coding, including digital network coding and physical network coding, in the design of resource allocation strategies for wireless cooperative relaying networks. As a result, a pragmatic system-level cross-layer optimization framework and associated core design principles are suggested. Finally, the future work of resource allocation for wireless cooperative relaying networks is presented, and some essential problems to be solved for final practical proposals are also addressed.

Key words: wireless cooperative relaying network; resource allocation; network coding; cross-layer; practicality

无线协作中继网络是最近几年通信和网络领域最受关注的研究主题之一,并且已被应用于多种场景,包括蜂窝系统和无基础架构的多跳无线网络^[1].尤其是它已成为 LTE/LET-A 架构的重要组成部分,显示了其广阔的应用前景.与传统的单跳或多跳通信相比,通过增设专用协作中继节点和/或允许用户间协作,协作中继通信技术有助于获取更高的网络容量域和更可靠的端到端通信链路,从而提供更好的用户通信和服务体验,并为构建高可用性和高安全性的云平台^[2,3]提供高质量无线接入支撑.在研究和应用协作中继通信技术时,需要解决 3 个基本的核心问题:(1) 如何开展协作;(2) 与谁在何时进行协作;(3) 如何最优化利用有限的系统资源.这些问题

* 基金项目: 国家自然科学基金(60970019, 61373042)

收稿时间: 2013-05-02; 定稿时间: 2013-08-22

分别涉及协作策略的设计、协作节点的选择以及系统资源的分配。协作策略是协作中继通信技术的基石,而寻找更优的协作策略也是研究者们一直追寻的目标。资源分配主要涉及对系统中的空、时、频(或码)和功率资源的管理与调度,对系统性能的优化起着关键作用。协作节点的选择与系统资源的分配具有高度耦合性,并且,协作节点也可被视作系统资源,因而,协作节点的选择与系统资源的分配通常在资源分配方案中进行联合优化。故此,协作策略和资源分配是协作中继通信技术的两大关键研究点。

经过近 10 年的研究,协作策略和资源分配均取得了巨大的发展。在协作策略方面,从最初的基本放大-转发(amplify-and-forward,简称 AF)和解码-转发(decode-and-forward,简称 DF)策略发展到与各种编码相结合的高级协作策略^[4-7],协作中继系统的性能获得了较大的提高,特别是最近提出的融合网络编码的协作策略^[8-11],在进一步提升协作中继系统容量和通信可靠性两方面都表现出极大的潜力。在资源分配方面,从受制于诸多理想假设的方案发展到兼顾多种实际系统约束因素的方案,资源分配方案的实际可用性逐渐增强,针对协作中继网络的实用化资源分配方案的研究也越来越受重视。鉴于网络编码和资源分配均有助于提升无线资源利用率和系统整体性能,在协作中继网络中深度融合两者,并研究与现有系统的集成,显得极具理论和实用意义。然而,针对融合网络编码的协作中继网络的资源分配研究尚处于初步阶段,实用化的资源分配方案极为匮乏。这为当前及未来的研究工作提供了机遇,但高性能和实用化的资源分配方案的设计面临多项挑战:(1) 如何有机融合网络编码与资源分配?(2) 如何增强融合网络编码的资源分配方案的可用性?(3) 如何保证融合网络编码的资源分配方案与系统其他模块有效协同工作?对这 3 个挑战的研究也是将融合网络编码的资源分配策略推向实际应用的关键切入点。

本文从网络编码和资源分配角度分析和总结了无线协作中继网络的研究现状,并在此基础上分析了网络编码对资源分配策略设计的影响(对应挑战(1)),并建议了一种系统级的优化框架及设计基本原则(对应挑战(2)和(3)),为解决以上 3 项挑战提供有益的参考思路。

1 无线协作中继网络研究现状

本文主要关注融合网络编码的协作中继网络资源分配,涉及网络编码和资源分配两方面的内容。从网络编码在协作中继网络中的应用研究和协作中继网络资源分配策略研究两方面出发,对国内外相关研究现状予以简要分析。

1.1 网络编码在协作中继网络中的应用

无线协作中继网络^[4,5]中协作的动机主要来源于利用无线信道的广播特性,借助邻居节点进行信息转发,从而实现空间分集。典型的协作策略包括^[4,6]:放大-转发(AF)、解码-转发(DF)、压缩-转发(compress-and-forward,简称 CF)等。这些基本策略有助于降低链路差错率,但却造成了网络资源利用率(如:频谱效率)的下降。其他一些改进策略,如:增量 AF^[5]、编码协作(coded cooperation,简称 CC)^[7],对资源利用率的改善均具有一定的局限性;这是因为它们对中继节点的使用具有(短期或长期)独占性。

与以上提到的传统协作策略不同,将网络编码技术与协作策略相结合形成的网络编码协作^[8-11],通过在中继节点中对多个输入信息(包括分组包、比特,甚至模拟信号^[12])进行合并,可实现对中继节点的共享,极大地提升网络资源利用率。从对信息的处理角度来讲,网络编码技术通过对信息进行合并或压缩,降低了网络中的冗余;而协作中继技术则通过不同的节点转发相同的信息(或其变体)到目的节点,提高了传输的可靠性。因而,联合这两种技术在提升网络性能方面可产生许多积极的作用,尤其是在改善协作中继网络资源利用率方面具有明显益处。

网络编码协作通常应用于 3 类网络场景:双向协作中继^[13-20]、多址接入协作中继^[21-23]、组播协作中继^[24]。在这 3 类场景中,中继节点要么被多源输入信号共享(如:多址接入协作中继),要么被多目的输出信号共享(如:组播协作中继),要么两者兼有之(如:双向协作中继),与基本协作中继策略相比,减少了网络总体传输次数,有利于节省时隙、频谱和功率等网络资源。目前所提出的网络编码协作策略可被大致分为两类:数字网络编码(digital network coding,简称 DNC)^[25,26]协作和物理层网络编码(physical network coding,简称 PNC)^[27]协作。DNC 通常与

DF 结合,对已解码的多个信号进行比特级可逆的线性组合(如:比特异或)后,单次转发组合信号,即:在协作过程的广播阶段实现中继共享.PNC 则允许多源信号共信道并发传输,利用无线干扰,在协作过程的多址接入阶段和广播阶段均实现中继共享.PNC 可与 AF 或 DF 结合形成 AF-PNC^[28]或 DF-PNC^[10].AF-PNC,即:模拟网络编码协作(analog network coding,简称 ANC),直接对多个碰撞的模拟信号形成的叠加信号进行放大后广播,无需解码.这种方式在中继节点上的操作较为简单,无解码延时,但是,存在噪声传递问题且要求接收端具备干扰消除能力.与 ANC 不同,DF-PNC 继承了 DF 的优势,能在中继节点压缩噪声,且能够运用中继的“计算”能力^[21]按需生成碰撞信号的各种线性组合.依据不同的解码要求,DF-PNC 可分为两类^[10],即:DF-PNC-1^[21,29]和 DF-PNC-2^[30].前者只需解码叠加信号,而后者则要求独立解码源信号,通常涉及多用户检测,导致性能低于前者.从容量角度来看,相对 ANC、DF-PNC-2 和 DNC,DF-PNC-1 能获得更好的总体性能^[10].文献[10]也指出,在中继节点保留对数字特性的运用比使用纯粹的模拟信号组合更有益处.最近两年对 DF-PNC-1 的研究也体现了其在性能和可实现性方面的潜在优势,并且证实其不仅可用于平坦衰落信道(如:基于 Lattice 编码的策略^[21]),还可用于各种选择性衰落信道(如:与 OFDM 和 LDPC 编码结合的策略^[29]).

网络编码协作已经开始被考虑在多种实际网络环境中加以运用,如:IMT-A 系统^[11]和 Wi-Fi 网络^[31],但处于初步研究阶段,主要使用 DNC 类型网络编码,较少展开对 ANC 和 DF-PNC 的应用,另有诸多系统性问题有待解决,如:与信道编码的结合问题,同步、控制信号开销、资源调度问题,以及兼容性问题,等等.

1.2 协作中继网络中的资源分配策略

除协作策略外,影响无线协作中继网络性能的另一个关键因素便是资源分配.在无线协作中继网络中,资源分配通常涉及对节点发送功率、带宽(包括子信道或子载波)和传输时隙的分配与调度,以及(多中继或用户间协作场景中)对中继节点的选择;如果中继节点支持多种协作模式,资源分配还需要考虑协作策略的动态切换.以上诸多因素的并存使得无线协作中继网络中的资源分配呈现为一个复杂的优化问题.在实际设计资源分配方案时,需要考虑 3 方面的问题:(1) 根据网络场景设置和所需完成的功能等因素制定合理的优化目标;(2) 考虑信道状态信息的获取程度、用户服务质量(QoS)需求等限制因素确立优化约束条件;(3) 结合(1)和(2),进一步考虑方案部署要求(如:集中式或分布式)和实施复杂度,选择合适的数学工具求解优化问题,获取最优化或次优化方案.在过去几年中,针对不同的网络场景,研究者们运用多种优化理论提出了许多有意义的资源分配方案.

在没有专用中继节点的情况下,通过用户间协作^[32]可提升网络吞吐量或获取协作分集增益.文献[33]在单基站多用户 OFDMA 网络中允许用户相互充当中继节点,在慢衰落信道和完美信道状态信息(channel state information,简称 CSI)假设条件下,运用对偶分解法,提出了一种集中式的利用率最大化框架,联合优化中继节点和协作策略(AF 与 DF)选择,以及功率和带宽(即子载波)的分配,获取了显著的总体性能提升.同样运用对偶分解法,文献[34]为基于 DF 协作的多跳无线网络设计了一种功率高效的跨层框架,联合优化路由、中继节点选择、功率分配和拥塞控制,并运用对偶分解法,提出了一种完全分布式算法.文献[35]则在基于 DF 的 OFDM 无线网络(wireless mesh network,简称 WMN)中,考虑非无私的节点协作,研究 QoS 驱动的媒质接入控制(media access control,简称 MAC)层资源分配,综合优化子载波分配、功率分配、协作节点选择、差异化服务和分组调度,并运用 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件,提出了一种集中式和一种分布式算法,以增强网络性能并获取分组的 QoS 保证.而文献[36]针对能量约束的无线协作网络,从公平性角度,联合物理层和网络层设计了一种跨层资源分配框架,以优化分配节点能量和服务时间,并运用几何与网络分解法得到一种多步协作方法,使得所有节点都能同时耗尽能量,保证了公平性.该方案假设使用正交信道,但并不受特定协作策略的限制,可用于多种协作模式.以上文献均假设系统能获得完美的 CSI,文献[37]则在非完美 CSI(信道估计存在差错)假设下,针对单基站多用户无线协作网络,提出了一种联合优化功率分配、时间调度、中继选择的算法,并通过仿真显示,当 CSI 估计差错均值为 0 时,这种算法能以概率 1 收敛于最优解;否则,以概率 1 收敛至最优解的某个邻域解.

更多的工作集中于存在专用协作中继节点的场景,包括单向中继和双向中继系统.文献[38]针对单向单中继协作系统,研究统计延时 QoS 约束的跨层资源分配策略,运用信息论中的有效容量概念,考虑完美 CSI 和延时 QoS 参数,联合链路层和物理层,为 DF 和 AF 两种中继模式分别设计了相应的动态功率和速率分配算法,以期在

保证延时 QoS 需求前提下,最大化系统吞吐量.文献[39]针对单向 AF 多中继 OFDM 系统,研究了基于子载波配对的资源(即:功率、子载波、中继节点)分配问题,运用对偶分解法,开发了一种最优化算法和两种低复杂度的次优算法,以最大化系统传输速率.在无子载波配对的情况下,文献[40]研究了单向 DF 多中继 OFDM 系统的和速率最大化资源分配问题,运用对偶分解法,提出了两种资源分配算法,以最优化传输模式(即:中继模式和直接传输模式)、中继节点选择及源节点和中继节点功率分配.文献[41]针对单向全双工和混合中继(AF 与 DF) MIMO-OFDMA 系统,研究了资源分配与调度的联合优化问题,考虑了异质数据速率需求,利用对偶分解,提出了一种分布式迭代资源分配与调度算法,能得到闭环的功率与子载波分配.大部分文献都假设源节点和中继节点能够获取完全的 CSI.然而,要反馈完全的 CSI,需要反馈的比特数可能非常大,尤其是在多载波系统中,这种反馈开销不可忽略,给系统带来了较重的负担.文献[42]研究了有限比特反馈条件下单向单中继 OFDM 系统中的资源分配问题.在有限反馈的资源分配优化问题中,码本设计是关键环节.这种码本表征了功率分配向量,并被反馈回源节点和中继节点,以降低反馈开销.该文献基于容量最优化准则,运用迭代 Llyod 算法构建码本,并运用连续松弛和对偶技术,提出了相应的最优功率和子载波联合分配算法.文献[43]则在非完美 CSI 条件下,针对基于 DF 协作的多用户多中继蜂窝网络,考虑用户 QoS 约束,以能有效容忍信道不确定性为目标,运用凸优化理论,设计了联合中继选择和功率分配的集中式和分布式算法,以最小化上行链路总传输功率.其中,非完美 CSI 模型分为两大类^[43]:(1) 已知信道估计差错服从某种统计特性,并已知其方差和均值,这种差错通常存在于基于最小均方误差估计(MMSE)方法的信道估计策略,并且反馈信道也会带来类似的差错;(2) 信道估计差错在某个不确定的有界范围内,但差错的统计特性未知,这种差错主要源于估计过程中的高斯噪声和量化差错.在实际系统中,这些因素的叠加更加增强了所获取 CSI 的不确定性.

双向中继系统在最近 3 年受到越来越多的关注.由于双向中继系统是网络编码的一种良好应用场景,在这种系统中,网络编码,尤其是 ANC 和 DNC,受到了普遍关注.文献[44]假设中继具有比特异或(XOR)类型网络编码能力,研究了双向 DF 单中继 OFDM 系统的资源分配问题,证实了网络编码有助于节省系统功率.文献[19]针对存在比特 XOR 网络编码的双向 OFDM 中继系统,在非对称流量情况下,研究最小化下行链路延时的资源分配,提出了一种低复杂度的次优算法,证实了在该系统中联合资源分配与网络编码,可获得更好的延时性能.其中,中继节点在一个子载波集上 XOR 接收到的数据,并利用剩余的子载波单播未编码的数据给目的接收节点;并且,每个子载波只能分配给一个流,以避免共信道干扰.文献[20]针对具备 ANC 能力的 OFDMA 双向中继网络,研究了基于子载波配对的中继-功率分配、中继选择、子载波分配联合优化问题,运用对偶分解法,提出了一种渐近最优算法,以最大化加权和速率.文献[16]同样研究具备 ANC 能力的双向多中继 OFDMA 系统的资源分配,运用凸性优化技术,提出了一种最优化的资源分配策略,包括:功率分配、中继选择和子载波分配,以最小化总传输功率,并给出了其闭环表达式.该文献发现,在存在网络编码的 OFDMA 双向中继系统中,最佳能效的子载波分配是机会子载波分配(即选择能最小化功率的中继作为该子载波的分配对象),且每个子载波被分配给一个中继节点.文献[31]则认为网络编码已成为一种新的协作技术,并从队列角度研究了网络编码协作中继在 Wi-Fi 网络中的应用,提出了一种缓冲队列分配算法,即:缓冲队列均衡的机会比特 XOR 网络编码,以期动态利用中间节点的缓冲空间,从而提供更高的网络吞吐量(与传统路由技术相比).

2 比较与存在的问题

2.1 网络编码在协作中继网络中的应用存在的问题

在无线协作中继网络中,对网络编码的运用目前还处于初步阶段,有许多问题有待研究解决.同时,网络编码自身已是一个非常活跃的研究领域,近 10 年的研究探索出了许多有价值的编码形式,并且一直在不继演进.即便是在无线协作中继网络中,已被应用的网络编码也至少包含 3 种:DNC,ANC,DF-PNC-1.表 1 对这 3 种网络编码的特点及性能进行了简要总结.

Table 1 Features and performance of network coding (DNC,ANC,DF-PNC-1)**表 1** 网络编码(DNC,ANC,DF-PNC-1)特点及性能

	A	B	C	D	E	F
DNC	3	Bit, or packet	Low (separate signal decoding)	×	Low	Low (reduced in asymmetric rate case)
	2		High (successive interference cancellation decoding)		High	Moderate (reduced when users increase)
ANC	2	Analog signal	No need (mix and amplify)	√	Moderate	Moderate (reduced when users increase)
DF-PNC-1	2	Bit, or packet	Low (separate signal decoding)	×	High	High (ascending when users increase)

A: Time Slots; B: Operation Object/Field; C: Decoding Complexity and Requirement; D: Noise Propagation;
E: Implementation Complexity; F: Coding Gain (excluding very low SNR scenarios).

从表 1 可看出,每种网络编码模式都有其优缺点,如:三时隙 DNC 实施最为简单,且无需精确同步和干扰消除,但增益偏低(主要源于额外的时隙消耗);由于无需解码,ANC 实施较简单(通常仍需精确同步),但存在噪声传递效应,且多用户(多于两用户)的扩展性不如 DNC;DF-PNC-1 可达性能增益最高,解码要求比两时隙 DNC 低,且可扩展性很好,但实施复杂度稍高(涉及高级的信道编码,如:Lattice 码或 LDPC 等)。

因而,在应用网络编码时面临一个基本问题:在无线协作中继网络中,如何选择网络编码,或哪种网络编码能给无线协作中继网络带来最佳的综合性能(如:编码增益、实现复杂度、与现有系统的兼容性、可扩展性,等等)。现阶段的工作主要集中于双向中继系统,而且大多使用 DNC 或 ANC.尽管理论分析和简单场景下的实践研究均显示这两种编码能带来较为可观的吞吐量或分集增益.然而,在其他无线协作中继场景中,如:多源单向多址接入场景或实际的混合场景中,它们能带来多大的性能增益?目前并不清楚.此外,具有更高理论性能的 DF-PNC-1 类型网络编码在不同场景和配置的协作中继网络中的性能表现如何,这方面的工作更加缺乏.因此,在做出选择之前,有必要结合实际系统较为全面的评测这些网络编码的综合性能。

2.2 协作中继网络资源分配策略存在的问题

在无线协作中继网络中,对资源分配方案的研究已取得了大量的研究成果.表 2 从网络场景、CSI 要求、协作策略、网络编码和系统级联合因素等方面对研究现状所提及的主要相关文献进行了简要总结。

从表 2 可看出,大多数方案都是在简化的条件或理想的假设前提下得出的.尽管这些方案有助于理解理想可达的性能限,为实践提供指导,但是,为了将理论实用化,仍然有必要放宽理想的假设条件,获取更贴近实际软硬件约束的方案.具体问题如下:

1) 大多数资源分配方案均假设系统拥有完全的信道状态信息,即完美 CSI.然而,在实际系统中,由于反馈控制开销约束以及反馈延时和差错等问题,难以或需以较大开销获取实时而精确的 CSI.因而,如何利用非完美 CSI,如:受限反馈 CSI、过时的 CSI,以设计鲁棒性的资源分配方案是资源分配方案面向实际应用必须关注的问题.特别是,当网络节点具有网络编码能力时,不准确的资源分配将影响到多条链路和多个流量,造成的差错具有更高的概率蔓延至整个网络,导致性能的急剧下降,可能抵消由网络编码所带来的性能增益.因此,较之无线网络编码的协作中继网络,融入网络编码的协作中继网络对资源分配方案的鲁棒性具有更高的要求.从表 2 可看出,这方面的研究较为欠缺。

2) 目前的工作主要集中于独立的设计资源分配方案和仿真评估所提方案的性能.在实际系统中,资源分配通常作为资源分配模块或调度单元在 MAC 层实施,其分配结果对同层的 MAC 协议和上层的路由协议都具有重要影响.但是,这种系统级的考虑并未得到足够重视.见表 2,大多数方案独立的考虑资源分配,部分方案虽对系统级因素有所涉及,但仅考虑调度、MAC 和路由或上层(如拥塞控制)中的一项或两项,不够全面;而在具备网络编码功能的网络中,鲜有系统级的方案发表.另一方面,表 2 所提及的方案均是通过数值仿真(包括:MATLAB 和 NS-2 平台)对所提策略进行性能评估.总体而言,系统级的研究及相关的实际原型系统设计较为缺乏.此外,尽管已存在一些协作中继网络方面的实际原型系统^[45,46],但主要关注协作中继通信的实现,并未充分考虑资源分配问题.然而,要使得所设计的资源分配方案具备实际可用性,在真实的协作中继系统中部署和评估所提资源分配

方案是极为必要的.目前,比较流行的可供选择的通用开发平台^[47]包括 Ettus Research 的 USRP 和 USRP2, RICE 大学的 WARP, RUTGERS 大学的 WINC2R,等等,均可作为搭建实测系统的候选平台.

Table 2 Summary of selected resource allocation strategies

表 2 研究现状中所提及的资源分配策略总结

	A	B	C	D	E	F
G	Multi-User OFDMA	Perfect	AF&DF	×	×	30
	Multi-Hop networks	Perfect	DF	×	Routing & congestion	31
	OFDM WMN	Perfect	DF	×	Packet scheduling	32
	Energy-Constraint networks	Perfect	No specification	×	Routing	33
	Multi-User networks	Estimated errors	No specification	×	×	34
H	One-Way single relay	Perfect	AF&DF	×	MAC-PHY	35
	One-Way multi-relay OFDM	Perfect	AF	×	×	36
	One-Way multi-relay OFDM	Perfect	DF	×	×	37
	One-Way MIMO-OFDMA	Perfect	AF&DF	×	Packet scheduling	38
	One-Way single relay OFDM	Limited feedback	No specification	×	×	39
	Multi-User multi-relay cellular	Uncertainty ¹	DF	×	×	40
	Two-Way single relay OFDM	Perfect	DF	XOR	×	41
	Two-Way multi-relay OFDM	Perfect	DF	XOR	×	16
	Two-Way multi-relay OFDM	Perfect	AF	ANC	×	17
	Two-Way multi-relay OFDM	Perfect	AF	ANC	×	13
	Wi-Fi	Perfect	DF	XOR	×	28 ²

A: Network Scenario; B: CSI Assumption C: Cooperative Strategy; D: Network Coding; E: Joint System-Level Consideration;

F: Reference Index; G: User Cooperation; H: Dedicated Relay Node

1: Two cases: (a) channel error of known variance, (b) bounded uncertainty region.

2: Buffering queue optimization.

3 融合网络编码的实用化资源分配方案设计

从上节对存在的问题的分析可以看出,针对融合网络编码的协作中继网络,欲设计实用化的资源分配方案,需要解决好三方面的问题:网络编码的选择、资源分配策略的鲁棒性和系统级优化.要解决网络编码的选择问题,需要深入分析网络编码对资源分配策略设计的影响,洞悉不同网络编码能获取的编码增益以及适用条件;而对这一点的分析也有助于解决网络编码与资源分配的有机融合这一挑战.对资源分配策略的鲁棒性增强则需要结合特定的非完美 CSI 模型对资源分配问题进行数学阐述,继而借助最优化理论进行求解.尽管网络编码的机会和成功率亦会受非完美 CSI 的影响,但若在数学阐述资源分配优化问题时便予以考虑非完美 CSI 这一因素,其负面影响可得以有效控制.并且,对这一问题的解决可在资源分配策略内部单独进行,不会对系统其他模块协议流程产生影响.与前两问题不同,系统级优化则对资源分配策略的可用性和实用化显得尤其重要,面临的难点也更多,如:资源分配策略与其他协议模块的有效协同、采用不同网络编码的系统之间的共存与互通、新的网络编码方法的集成与融合,等等.由于资源分配策略的鲁棒性可独立解决,因而本文不作重点讨论.下面,从对另两方面问题的探讨出发,本节为融合网络编码的实用化资源分配方案设计提供一种参考思路和建议,并于其中指出所涉及的设计基本原则.

3.1 网络编码对资源分配策略设计的影响

尽管现存的 3 种典型的网络编码(即数字网络编码(DNC)、模拟网络编码(ANC)和基于解码转发的物理层网络编码(DF-PNC-1))的编码条件和编解码模式均不一致,但它们具有一个本质的共同点:共享链路.从资源利用的角度来看,这便等价于资源共享,即:在同一时隙以相同功率使用同一频谱(广播或组播)传输编码信息.在无线协作中继网络中,这种资源共享通常在中继节点的转发过程中完成.因而,网络编码对资源分配的影响主要体

现在对中继节点接收和转发过程的变化中.这种改变包括:解码要求、噪声处理、干扰处理等(详见第 1.1 节).弄清这些改变后,便可确定源节点、中继节点和目的节点在时隙操作、传输功率和频谱分配这 3 个方面的要求.以采用 DNC(考虑 XOR 类型)的三时隙 DF 协作 OFDM 中继网络为例,网络编码带来的改变可简要分析如下:

如图 1 所示,在多个中继节点 RS 的支持下,源节点对 A 和 B 进行双向通信.所有节点均操作于半双工模式(无法同时收发数据).在前两时隙中,中继节点 RS 接收、解码并暂存来自 A 和 B 的数据,这一点与无网络编码的 DF 协作中继网络一致;在第 3 时隙中,若中继节点采用动态网络编码(注:静态网络编码,即:中继转发过程中在所有子载波上一直使用网络编码,通常无法达到最优容量),则其依据收集的转发链路信道状态信息,决定在哪些子载波上使用网络编码是有益的,并在所选子载波上对来自 A 和 B 的数据比特进行网络编码.传输编码数据的子载波将在此时隙中被 A 和 B 共享,即:中继节点在这些子载波上组播数据至 A 和 B(如图 1 所示 $R_{k,C}$).网络编码在这种通信场景中的最大益处在于节省子载波数(理想情况下,所使用子载波数可降低至无网络编码情形的 1/2),但由于需要保证编码的数据能被 A 和 B 同时正确解码,子载波的功率分配需根据 RS-A 和 RS-B 链路中的较小信道增益系数调节,即:功率分配受约束于最坏信道.然而,在无网络编码的情形中,中继节点的功率分配仅需依据各链路的自身信道状态进行.因此,网络编码使得中继节点的子载波分配(即频谱分配)方式和传输功率分配方式均发生了改变.ANC 对两时隙 AF 协作中继网络亦有类似影响;与三时隙 DF 情形相比,载波共享还可发生于多址接入阶段(即 A 和 B 同时传输数据至 RS,但不考虑相互之间的直接链路).此外,若中继节点具备高级的干扰消除能力,或者,所有节点均支持全双工操作,则三时隙 DF 协作可变为两时隙 DF 协作,从而提升了时隙资源利用率,但网络编码对资源分配的影响与三时隙情形基本一致.

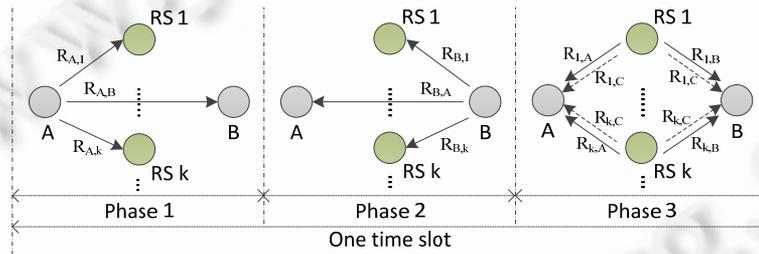


Fig.1 Three-Phase DF OFDM relaying networks with DNC

图 1 基于 DNC 的三时隙 DF 协作 OFDM 中继网络

由于网络编码改变了协作中继系统对功率和频谱资源的利用方式,资源分配策略的设计势必受其影响,并需要做出相应的调整.资源分配策略的设计通常包括两部分:问题建模和算法设计.问题建模是资源分配策略设计的切入点,其需要数学阐述和规划的内容主要涉及两点:优化目标和约束条件.优化目标需依据设计需求而定,主要有 3 类:加权和速率最大化(如频谱效率为首要需求)、功率最小化(如能量或对邻近网络的干扰为首要需求)或利用率最大化(如满足上层混合业务特性为首要需求).约束条件则更多受限于系统设置和用户需求,如:业务流的 QoS 需求(如最低数据传输速率保证、最大或平均延时保证)约束、用户公平性约束、节点平均峰值功率约束、干扰约束(如认知无线网络中,次用户通信对主用户网络的干扰限制^[48])、频谱约束(如 OFDM 系统中的子载波互斥约束),等等.当协作中继网络具备网络编码能力时,与干扰、频谱和功率相关的约束均需考虑网络编码的特性,使得最终阐述的问题模型呈现出更加复杂的表现形式,如:以上所述三时隙 DF 协作中继网络的资源分配优化问题通常会被阐述为高复杂度的等式约束与不等式约束并存的非线性整数规划问题.另一方面,资源分配的算法设计通常分为两个阶段:优化问题求解和算法实施.优化问题求解一般运用最优化理论(如凸优化理论)、博弈论或图论进行.网络编码并不会对其求解流程带来较大影响.然而,对于算法实施,网络编码可能引入额外的控制开销并增加实施复杂度,这一点在分布式实施中需予以重视,以谨防控制开销以及实施复杂度引入的代价使得网络编码带来的性能增益不再具有吸引力.

综上所述,网络编码对无线协作中继网络的操作流程和资源利用方式产生了多方面的影响,并且,不同的网络编码模式带来的影响不尽相同.同时,网络编码不但可能引入额外的控制开销,而且并非在任何时候均是有益

的(进一步的分析见第 3.2 节).因此,对网络编码的选择需要结合特定的应用环境和系统配置要求进行.然而,实际通信场景通常是动态变化的,如:信道条件、中继节点位置、上层业务流需求均可能随时发生变化.这一事实使得任何一种网络编码模式都难以确保优于其他网络编码模式.从而,在实际系统中,在系统配置允许的条件下,动态混合使用多种网络编码在获取优化的系统性能方面更具潜力;并且,这种方式为采用不同网络编码模式的系统之间的共存和互通提供了一种方法.

3.2 系统级优化框架及设计基本原则

上一节分析了网络编码对资源分配策略设计的影响因素,其重点关注的是物理层射频资源的优化利用.然而,作为系统的关键模块之一,资源分配模块(注:在实际通信系统中,资源分配策略通常在链路层实现,并与调度模块紧密结合)不仅负责动态调度底层的射频资源,而且其输入的参数和分配的结果与同层的 MAC 协议和上层的路由协议都有着密切的联系.因此,有必要从系统视角对资源分配模块作进一步的优化调整,以使其能高效的与相关功能模块无冲突的协同工作.通过对研究现状的综合分析,结合跨层设计思想,本文建议一种以资源分配策略为核心的系统级优化框架,如图 2 所示,以获取系统整体性能的提升.

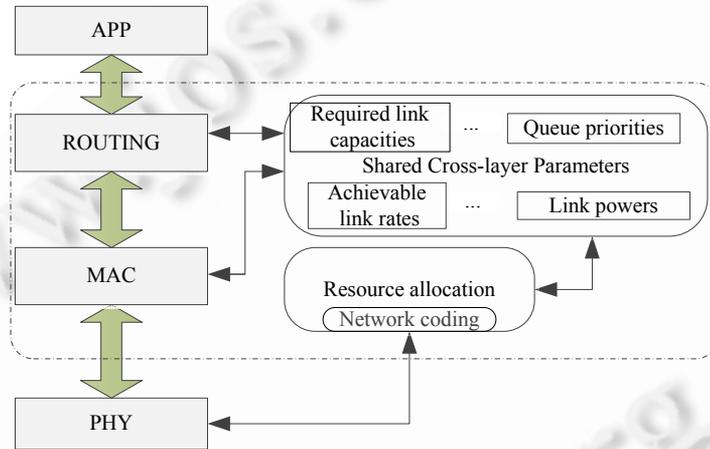


Fig.2 Resource allocation-centric system-level optimization framework

图 2 以资源分配为核心的系统级优化框架

在运用此优化框架进行系统级设计过程中,需要重点关注两方面的问题:跨层接口和扩展机制.跨层接口的目的在于使各相关模块间更好的沟通,是进行系统级优化的有效手段.扩展机制的目的则在于使得系统有能力以较小改动吸纳新的技术,为系统性能的提升预留更大的空间,有助于维持系统框架的生命力.从这两方面出发,针对系统级优化设计,本文进一步建议如下设计基本原则:

1) 跨层设计与标准协议模块共存.广义上讲,在标准协议体系之外创建新的模块间接口均可视为跨层^[49].同时,完全新的协议体系及接口设计也可视为跨层设计,这种跨层设计模式可能有助于最大化新技术带来的增益,但在系统的兼容性和有效利用已有协议两方面很可能遭遇巨大挑战.如图 2 所示,本文建议采用信息库共享的跨层设计模式.这种方式有助于最大限度的维持现有模块的内部结构,但同样能知悉来自其他模块的必要参数,从而可依据相关参数的变化调整各自的算法或流程.本文重点关注与资源分配策略相关的跨层优化,主要包括与 MAC 协议和路由协议间的跨层优化.资源分配策略与 MAC 协议之间具有相互影响,可互为输入,且影响着用户 QoS 需求的满意度,因而有必要增加相应的接口,如:将 MAC 队列优先级信息作为加权系数向量传递给资源分配模块,在资源分配策略中优化加权和速率,实现差异化资源分配,从而为不同优先级的业务流提供 QoS 保证.由于资源分配对链路的传输功率有着直接影响,而传输功率的大小影响着链路容量和对相邻链路的干扰,这一点对基于干扰准则或链路状态的路由协议有着极大的影响,因而有必要建立新的交互接口,设计参数以期平衡路径选择和协作中继资源分配.因此,这种基于信息库共享的跨层设计可根据需求增设新的接口,对 MAC 协

议、路由协议以及资源分配模块的内部流程干预较少,有助于实现跨层设计与标准协议模块的共存.

2) 网络编码功能模块化.良好的系统框架需具备吸收新技术的能力.网络编码是一个备受关注且发展迅速的研究领域,新的优异的编码方法随时可能诞生.因而,系统级优化框架需要能适应多种网络编码方法,即:优化框架需要具有灵活的扩展机制;并且,网络编码方法的改变不应应对资源分配策略产生严重影响.这便要求网络编码功能具备模块化特性,可独立升级.本文建议两种参考思路:(1) 在网络编码模型中预留网络编码扩展接口;(2) 抽象网络编码模型.在第 1 种思路中,每一种网络编码方法对应一个编码接口,并拥有各自独立的实现机制和触发条件;当新增网络编码方法时,便新增编码接口.这种方法简单直接,但计算量会随网络编码方法的增多而增加,稍显臃肿.第 2 种思路可视作统一法,需要深入量化不同的网络编码对资源分配的影响因子,抽象出统一的参量,从而建立简洁的网络编码模型.

3) 网络编码使能动态化.网络编码的益处通常在特定的通信场景下才较为显著,如:对称场景.这里的对称包括:信道对称和业务流对称.信道对称源于编码链路功率分配遵循最坏信道规则(详见第 3.1 节分析),对称性越高编码增益越大,即:含有编码数据的组播信道的信道增益系数差距越小,网络编码带来的编码增益越大;反之,增益越小.在无线协作中继系统中,影响信道对称的主要因素为中继节点的位置:中继节点越接近源节点对中点,中继转发信道对称性越高.业务流对称则要求被编码的数据流速率差距较小;这一点为网络编码提供了数据源,是网络编码的先决条件.在实际应用场景中,业务流的对称与业务调度策略有关,可在跨层设计中得以优化.此外,业务流的优先级和 QoS 需求影响着业务流对资源的占用情况,从而也会影响业务流的对称性,继而对网络编码的增益产生影响.另一方面,在非对称通信场景中,为维持静态网络编码的编码和解码正确率,通常需要通过资源分配策略提升拥有较差信道的源节点的传输功率或降低拥有较好信道的源节点的传输速率,以迫使源节点对的通信呈现对称性;在此情况下,系统频谱或能量资源的利用率无法达到最优.因此,在实际通信场景中,采用静态网络编码并非最优选择,动态化使能网络编码有助于获取更优的系统性能增益.

4 总结与展望

针对无线协作中继网络,本文从资源分配和网络编码两方面调研了最近几年来国内外的相关研究成果.从目前的研究现状来看,可得出以下总体结论:(1) 链路层及物理层网络编码在无线协作中继网络中的应用已得到普遍重视,其与协作策略的深度结合在提升资源利用率方面极具潜力,并已成为研究热点之一;(2) 资源分配优化设计在理论上已取得大量有价值的研究成果,在多种协作通信场景中均在理论上表现出显著的资源利用率的提升,相关研究工作已逐步开始考虑实际通信环境的影响因素,实用化已成为需要重点关注的研究点之一;(3) 资源分配与网络编码的结合在理论上被证实是进一步提升无线协作中继网络资源利用率和系统性能的有效途径,此方面的理论和实用化研究具有重要意义,但相关研究工作并不成熟;(4) 跨层设计是实现资源分配策略与系统其它协议模块协同工作并提升系统整体性能的可行方法,但系统性的研究成果相对欠缺,是新的研究机遇.

虽然,目前相关领域的研究提供了诸多有价值的参考成果,但这些研究成果在理论上仍然存在进一步的改进空间,在实际应用环境中还存在较大的局限性.综合分析融合网络编码的无线协作中继网络资源分配相关的研究工作,欲获取实用化的系统级资源分配方案,还存在诸多基础性和关键技术有待进一步研究和完善:

(1) 在实际复杂网络环境中,网络编码的综合性能分析与评估问题.此问题涉及不同网络编码的适用范围以及实际系统对网络编码的选择,是实际部署网络编码时需要考虑的首要问题;

(2) 多种网络编码的共存或融合问题.这一问题对于采用不同网络编码的多个系统并存互通至关重要,也影响着系统对新的网络编码技术的吸纳能力,但在理论和技术实现上均是一个亟需解决的难点;

(3) 系统级跨层优化问题.此问题是资源分配策略迈向实用化的关键问题之一.其中,设计具有良好扩展机制的协同优化的跨层框架是此问题涉及的主要难点.针对这些问题,本文建议了一种系统级优化框架并给出了相应的设计基本原则.所建议的框架运用了松耦合的跨层设计,有利于增强资源分配策略与协议栈中其他模块协同的灵活性,而其中所提的网络编码模块化,则有利于网络编码方法的自身优化和扩展.但此框架仅供概要设

计参考,诸多技术细节和难点均有待深入研究;

(4) 系统的实测研究及统计分析评估问题.实际应用环境往往比仿真环境及理论分析假设要复杂许多.在完成理论设计工作后,如何构建实测平台,并基于实测数据统计分析和综合评估理论模型的性能,从而针对性的优化模型和算法,是获取实用化系统级方案的后期设计关键步骤.

以上 4 点问题均是融合网络编码的无线协作中继网络资源分配研究亟需解决的问题.除此之外,如何与新兴技术和理念相结合也是极为有意义的研究问题和新的研究增长点,如:针对移动多媒体等新兴应用的资源分配策略设计^[50]、以云计算为支撑平台的资源分配策略设计、针对大规模多跳协作中继网络的分布式资源分配策略设计,等等,这些极富开创性和挑战性的问题都值得研究者在当前和未来展开深入探讨和研究.

致谢 我们向给予本文工作支持和建议的同行以及武汉理工大学信息工程学院光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室和宽带无线通信与传感器网络湖北省重点实验室的老师和同学表示感谢.

References:

- [1] Xie XZ. Cognitive and Cooperative Wireless Communication Networks. Beijing: Posts & Telecom Press, 2012 (in Chinese).
- [2] IBM Global Technology Services (GTS). Security and high availability in the cloud computing environment. IBM Technique White Book, 2011 (in Chinese).
- [3] Feng DG, Zhang M, Zhang Y, Xu Z. Study on cloud computing security. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2011,22(1):71–83 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3958.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03958]
- [4] Nosratinia A, Hunter TE, Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10):74–80.
- [5] Laneman JN, Tse DNC, Wornell GW. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. IEEE Trans. on Information Theory, 2004,50(12):3062–3080.
- [6] Hu RY, Ti J. Practical compress-forward in user cooperation: Wyner-Ziv cooperation. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Information Theory (ISIT). Seattle: IEEE Press, 2006. 489–493.
- [7] Hunter TE, Nosratinia A. Diversity through coded cooperation. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2006,5(2):283–289.
- [8] Xiao L, Fuja T, Klierer J, Costello D. A network coding approach to cooperative diversity. IEEE Trans. on Information Theory, 2007,53(10):3714–3722.
- [9] Wang HR, Huang YM, Yang LX. Cooperative transmission design combining network coding and superposition coding. Journal of Communications, 2012,33(8):1–9 (in Chinese with English abstract).
- [10] Rossetto F, Zorzi M. Mixing network coding and cooperation for reliable wireless communications. IEEE Wireless Communications, 2011,18(1):15–21.
- [11] Peng MG, Yang CQ, Zhao ZY, Wang WB, Chen HH. Cooperative network coding in relay-based IMT-advanced systems. IEEE Communications Magazine, 2012,50(4):76–84.
- [12] Sachin K. Network coded wireless architecture [Ph.D. Thesis]. 2008. <http://www.stanford.edu/~skatti/pubs.html>
- [13] Popovski P, Yomo H. Physical network coding in two-way wireless relay channels. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). Glasgow: IEEE Press, 2007. 707–712.
- [14] Zhou QF, Li YH, Lau FCM, Vucetic B. Decode-and-Forward two-way relaying with network coding and opportunistic relay selection. IEEE Trans. on Communications, 2010,58(11):3070–3076.
- [15] Li W, Li J, Fan PY. Network coding for two-way relaying networks over rayleigh fading channels. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2010,59(9):4476–4488.
- [16] Zhou M, Cui QM, Valkama M, Tao XF. Energy-Efficient resource allocation for OFDMA-based two-way relay channel with physical-layer network coding. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 66.
- [17] Han B, Wang WB, Peng MG. Optimal resource allocation for network coding in multiple two-way relay OFDM systems. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). Paris: IEEE Press, 2012. 1642–1647.

- [18] Lin C, Liu Y, Tao M. Cross-Layer optimization of two-way relaying for statistical QoS guarantees. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013,(99):1–14. [doi: 10.1109/JSAC.2013.130820]
- [19] Ke X, Fan PY, Ben K, Su Y, Lei M. Resource allocation for minimal downlink delay in two-way OFDM relaying with network coding. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. Ottawa: IEEE Press, 2012. 5343–5347.
- [20] Zhang H, Liu Y, Tao MX. Resource allocation with subcarrier pairing in OFDMA two-way relay networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012,1(2):61–64.
- [21] Nazer B, Gastpar M. Compute-and-Forward: Harnessing interference through structured codes. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2011,57(10):6463–6486.
- [22] Peng MG, Liu HM, Wang WB, Chen HH. Cooperative network coding with MIMO transmission in wireless decode-and-forward relay networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2010,59(7):3577–3588.
- [23] Li ZY, Peng MG, Wu ZJ, Wang WB. Network coding scheme based on ldpc product codes in multiple-access relay system. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications Workshops (ICC)*. Kyoto: IEEE Press, 2011. 1–4.
- [24] Fan PY, Chen Z, Chen W, Ben K. Reliable relay assisted wireless multicast using network coding. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009,27(5):749–762.
- [25] Ahlswede R, Cai N, Li SYR, Yeung RW. Network information flow. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2000,46(4):1204–1216.
- [26] Dong QF, Wu JM, Hu WJ, Jon C. Practical network coding in wireless networks. In: *Proc. of the ACM MobiCom 2007*. New York: ACM, 2007. 306–309.
- [27] Zhang S, Liew SC, Patrick PL. Hot topic: Physical-Layer network coding. In: *Proc. of the ACM MobiCom 2006*. New York: ACM, 2006. 358–365.
- [28] Katti S, Gollakota S, Katabi D. Embracing wireless interference: Analog network coding. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM 2007*. New York: ACM, 2007. 397–408.
- [29] Rossetto F, Zorzi M. A practical architecture for OFDM-based decode-and-forward physical layer network coding. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2012,60(9):4747–4757.
- [30] Rankov B, Wittneben A. Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007,25(2):379–389.
- [31] Chiochan S, Hossain E. Cooperative relaying in Wi-Fi networks with network coding. *IEEE Wireless Communications*, 2012, 19(2):57–65.
- [32] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity, Part I, System description. *IEEE Trans. on Communications*, 2003, 51(11):1927–1938.
- [33] Truman CYN, Yu W. Joint optimization of relay strategies and resource allocations in cooperative cellular networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007,25(2):328–339.
- [34] Le L, Hossain E. Cross-Layer optimization frameworks for multihop wireless networks using cooperative diversity. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2008,7(7):2592–2602.
- [35] Cheng HT, Zhuang WH. QoS-Driven MAC-layer resource allocation for wireless mesh networks with non-altruistic node cooperation and service differentiation. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2009,8(12):6089–6103.
- [36] Chen W, Dai L, Ben LK, Cao ZG. A unified cross-layer framework for resource allocation in cooperative networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2008,7(8):3000–3012.
- [37] Tran PT, Lehnert JS. Joint optimization of relay selection and power allocation in cooperative OFDM networks with imperfect channel estimation. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*. Paris: IEEE Press, 2012. 2076–2080.
- [38] Tang J, Zhang X. Cross-Layer resource allocation over wireless relay networks for quality of service provisioning. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007,25(4):645–656.
- [39] Dang WB, Tao MX, Mu H, Huang JW. Subcarrier-Pair based resource allocation for cooperative multi-relay OFDM systems. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2010,9(5):1640–1649.
- [40] Wang T, Vandendorpe L. Sum rate maximized resource allocation in multiple DF relays aided OFDM transmission. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011,29(8):1559–1571.

- [41] Ng DWK, Lo ES, Schober R. Dynamic resource allocation in MIMO-OFDMA systems with full-duplex and hybrid relaying. *IEEE Trans. on Communications*, 2012,60(5):1291–1304.
- [42] Liu Y, Chen W. Limited-Feedback-Based adaptive power allocation and subcarrier pairing for OFDM DF relay networks with diversity. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2012,61(6):2559–2571.
- [43] Mallick S, Rashid MM, Bhargava VK. Joint relay selection and power allocation for decode-and-forward cellular relay network with channel uncertainty. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2012,11(10):3496–3508.
- [44] Zhao HH, Iloff J. Adaptive resource allocation in OFDMA relay networks with network coding. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. Kyoto: IEEE Press, 2011. 1–5.
- [45] Zhang J, Jia JC, Zhang Q, Lo EMK. Implementation and evaluation of cooperative communication schemes in software-defined radio testbed. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2010*. San Diego: IEEE Press, 2010. 1–9.
- [46] Valentin S, Hermann S. Cooperative relaying and its application—from analysis to prototypes: Tutorial TA-2. Bell Lab., 2011.
- [47] Raychaudhuri D, Mandayam NB. Frontiers of wireless and mobile communications. *Proc. of the IEEE*, 2012,100(4):824–840.
- [48] Yang W, Ban DS, Liang WF, Dou WH. Algorithms for joint spectrum allocation and cooperation set partition in cognitive radio networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23(1):122–139 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4077.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04077]
- [49] Srivastava V, Motani M. Cross-Layer design: A survey and the road ahead. *IEEE Communications Magazine*, 2005,43(12):112–119.
- [50] Sacchi C, Granelli F, Schlegel C. A qoe-oriented strategy for ofdma radio resource allocation based on min-mos maximization. *IEEE Communications Letters*, 2011,15(5):494–496.

附中文参考文献:

- [1] 谢显中. 认知与协作无线通信网络. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [2] IBM 全球信息科技服务部. 云计算环境中的安全性和高可用性. IBM 白皮书, 2011.
- [3] 冯登国, 张敏, 张妍, 徐震. 云计算安全研究. *软件学报*, 2011, 22(1): 71–83. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3958.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03958]
- [9] 王海荣, 黄永明, 杨绿溪. 联合网络编码和叠加编码的协作发射策略. *通信学报*, 2012, 33(8): 1–9.
- [48] 杨威, 班冬松, 梁维发, 窦文华. 认知无线电网络频谱分配与协作集划分算法. *软件学报*, 2012, 23(1): 122–139. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4077.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04077]



马小林(1984—),男,湖北武汉人,博士生,主要研究领域为无线协作中继网络优化,射频资源分配,网络编码.

E-mail: maxiaolin0615@whut.edu.cn



刘新华(1974—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线自组织网络,无线传感器/执行器网络.

E-mail: liuxinhua@whut.edu.cn



李方敏(1968—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线多跳网络,网络服务质量,新型网络体系结构.

E-mail: lifangmin@whut.edu.cn