软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2011,22(1):101−114 [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03936]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

无线网络协作 MAC 机制*

李 云[1,2+], 杜 杨[2], 曹 傧[2], 尤肖虎[1]

[1](东南大学 移动通信国家重点实验室,江苏 南京 210096)
[2](重庆邮电大学 无线信息网络研究中心,重庆 400065)

Cooperative MAC for Wireless Networks

LI Yun[1,2+], DU Yang[2], CAO Bin[2], YOU Xiao-Hu[1]

[1](National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University of China, Nanjing 210096, China)
[2](Research Center of Wireless Information Networks, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)
+ Corresponding author: E-mail: liyun@cqupt.edu.cn

Li Y, Du Y, Cao B, You XH. Cooperative MAC for wireless networks. *Journal of Software*, 2011,22(1): 101−114. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3936.htm

Abstract: Cooperation Communication (CC) utilizes the antennas of idle nodes to create a virtual MIMO (multiple-input multiple-output) system. The CC can combat the fading in wireless links and achieve spatial diversity gains, which makes it a key technology for the next-generation wireless mobile networks. Nowadays, many researches focus on increasing the channel capacity, decreasing the energy consumption and outage probability by selecting appropriate cooperative nodes. New MAC (medium access control) mechanisms (cooperative MAC), however, are needed to satisfy the cooperation communication because the communication mode is changed in cooperation communication networks. In this paper, a survey on the cooperative MAC is given. The challenging issues for cooperative MAC are discussed, and some cooperative MACs are presented and analyzed. The research direction of cooperation MACs is discussed in the conclusion.
Key words: wireless network; cooperation communication; MAC (medium access control); relay selection

摘 要: 协作通信利用空闲节点的天线,构成虚拟的 MIMO(multiple-input multiple-output)系统,从而对抗无线信道衰落,获取分集增益.协作通信是下一代无线移动网络的关键技术,也是近几年的一个研究热点.目前,已有的研究成果大多集中在如何根据信道状态选取合适的协作节点,以增加信道容量、减低能量消耗及减小中断概率等方面.但由于协作通信改变了以往的传统通信模式,因此需要设计新的 MAC(medium access control)机制(协作 MAC 机制),以适应协作通信的特点.针对协作 MAC 机制进行综述,重点讨论了协作通信中 MAC 机制面临的问题,并对现有的协作 MAC 机制进行分析和比较,最后给出协作 MAC 的进一步的研究方向.
关键词: 无线网络;协作通信; MAC;中继选择
中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

* 基金项目: 国家自然科学基金(60702055, 61071118); 国家教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0914); 中国博士后自然科学基金(20090451158); 重庆市科委项目(CSTC2009BB2279)
收稿时间: 2010-04-15; 定稿时间: 2010-08-13
CNKI 网络优先出版: 2010-11-05 11:50, http://www.cnki.net/ kcms/detail/11-2560.TP.20101105.1150.004.html

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

无线网络系统中,由于受带宽、传输功率的限制,加上无线信道的多径衰落,很难达到理想的传输速率和通信质量.为了解决无线信道容量的瓶颈问题,人们提出了多输入多输出(multiple-input multiple-output,简称 MIMO)技术.MIMO 可以提供比传统单输入单输出(single-input single-output,简称 SISO)高出许多倍的信道容量,因此成为人们关注的热点.但是,由于受质量、体积、功耗以及成本等多方面的限制,MIMO 很难在移动终端实现.为此,人们进一步提出了协作通信(cooperative communication,简称 CC)[1]的概念,协作通信技术可在不增加硬件复杂度的情况下提高系统的性能.其核心思想就是,在多用户环境中,单天线终端通过一定规则共享其他用户的天线,形成一个虚拟 MIMO 阵列,从而达到空间分集的效果.这样,既无需配备多天线,同时也获得了协作分集增益.

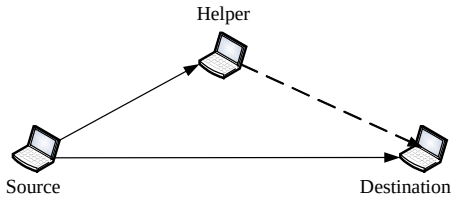


Fig.1 Cooperative communication

图 1 协作通信示意图

图 1 所示为典型的协作通信示意图,源节点在第 1 阶段以广播方式发送数据,第 2 阶段协作中继将监听到的数据转发给目的节点.根据中继节点对收到的数据处理方式的不同,转发方式[2]一般分为放大转发(amplify forward,简称 AF)和解码转发(decode forward,简称 DF)两种.目的节点将从多条独立路径上收到的数据进行合并,产生空间分集.目的节点获取的协作增益与源节点、中继节点及目的节点之间的信道状态密切相关.因此,如何在一系列邻居节点中选择合适的协作伙伴,一直是研究者关心的问题.现有的协作伙伴选择标准包括中断概率、吞吐量、时延、频谱效率、功耗等.

目前,人们在协作伙伴选择方面已取得了较多的研究成果.然而,由于协作通信改变了传统的通信模式,因此,现有的 MAC(medium access control)机制、路由协议等在协作通信模式下存在明显不足.如,协作点的引入会导致更多的碰撞,需要新的 MAC 机制来协调源节点、目的节点以及协作节点之间的信道分配.另一方面,在决定是否采用协作模式以及选择哪些协作节点时,我们不仅需要考虑信道状态,同时还应考虑 MAC 机制,甚至是由于路由协议引入的开销.当前,关于协作 MAC 和协作路由的研究相对还较少.本文重点对协作 MAC 机制的相关研究成果进行综述,分析现有 MAC 机制存在的不足及下一步的研究重点和方向,以为研究者提供参考.

1 非协作网络的 MAC 机制

由于无线信道是广播式的共享信道,一个节点的发送会干扰相邻节点的接收,因此,需要 MAC 机制协调竞争节点对无线信道的访问.

在传统的非协作无线网络中,针对不同无线网络的特点,人们提出了许多 MAC 机制.本节主要对无线局域网(IEEE 802.11)、无线城域网(IEEE 802.16)、无线 Ad Hoc 网络及无线传感器网络的 MAC 机制进行回顾,重点分析协作网络中 MAC 机制面临的新挑战.

无线网络协作 MAC 机制研究是建立在各种无线网络基础上的,因此本文首先对无线网络中的各种 MAC 机制作一个简单的介绍.

目前广泛使用的无线局域网的 MAC 机制在 IEEE 802.11 中得到了规范.IEEE 802.11 给出了两种 MAC 机制:分布式协调功能(distributed coordinate function,简称 DCF)和点协调功能(point coordinate function,简称 PCF).PCF 是集中式的,由接入点 AP 通过轮询(polling)机制为实时业务提供无竞争的服务.DCF 是分布式的,在 CSMA/CA 的基础上结合二进制指数退避方案来协调无线终端对信道的共享.为了支持服务质量(quality of service,简称 QoS)保证,IEEE 同时提出了 IEEE 802.11e 标准[3].该标准的一个主要功能是规范支持 QoS 的 MAC 机制——混合协调功能(HCF).HCF 包括 EDCA 和 HCCA.EDCA 通过为不同优先级的业务设置不同的竞争窗口(CW)、帧间间隔时间(AIFS)及回退指数以支持业务区分.HCCA 通过轮询的方式为不同优先级的业务分配不同的传输机会(TXOP).为了支持更高的传输速率,IEEE 制定了 IEEE 802.11n[4]标准.IEEE 802.11n 在物理层采用 MIMO-OFDM 方式,可以提供 300Mbps 甚至高达 600Mbps 的传输速率,并在 MAC 层通过聚合技术(aggregation),包括 A-MSDU 和 A-MPDU,将多个短帧合并为长帧,以减小 MAC 协议的开销,提高信道利用率.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

IEEE 802.16[5]是无线城域网的标准,其 MAC 层支持 PMP 和 Mesh 两种模式.PMP 支持 UGS,rtPS,nrtPS 和 BE 这 4 种业务类型,应用模式以基站(base station,简称 BS)为核心,采用点到多点的连接方式构建星形结构的接入网络.Mesh 应用模式采用多个基站(BS)以网状网方式扩大无线覆盖区,MAC 层采用请求(req)-回复(grant)-确认(confirm)等 3 次握手申请信道.现有 IEEE 802.16 MAC 机制的研究主要集中在时隙调度方面[6].

另外,Ad Hoc 网络也是近年来备受关注的无线网络之一,该网络 MAC 协议的功能是控制节点调度无线资源.现有的 MAC 协议主要有 MACA(multiple access collision avoidance)[7],MACAW(MACA for wireless LAN)[8]等.它们都是当发送方需要发送数据时,采取主动方式预约信道的协议.采用被动方式的 MAC 协议有 MACA-BI (MACA by invitation)[9]等.

而在其他无线网络中,如无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSN),除了考虑有效节能外,移动性管理和故障恢复策略也是无线传感器网络 MAC 协议首要关注的问题.例如,S-MAC 协议(sensor MAC)[10]是在 IEEE 802.11MAC 协议的基础上提出来的,目的是为了节省能量.它将时间分帧,帧长度由应用程序确定,帧内分为工作阶段和休眠阶段.认知无线电技术[11,12]由于采用机会频谱接入方式,MAC 必须考虑到频谱检测、频谱分配、安全、公平性、QoS 等一系列问题.目前,IEEE 802.22 正在加紧制定基于认知无线电技术的协议标准.

2 研究进展

对现有无线 MAC 机制的分析表明,尽管不同网络的 MAC 机制在具体实现上存在差别,但其主要功能均是协调节点访问无线信道,保证用户数据的有效传输,并高效利用无线信道资源.在非协作的无线网络中,通信模式主要是点到点的传输,在源节点和目的节点的一次通信中,MAC 机制主要解决发送节点和接收节点接入信道的问题.但在中继协作无线网络中,由于协作节点的参与,一次通信演变成点对多点、多点对点的通信模式.因此,MAC 机制不仅要考虑源节点与目的节点接入信道的问题,同时需要考虑协作节点对信道的访问,随之会产生 MAC 机制的调度、时延、重传、公平性、安全性以及其他 QoS 等问题.另外,在一次通信中,由于 MAC 机制需要同时协调调度源节点、协作节点、目的节点对信道的访问,必然引入新的开销,包括带宽开销、能量开销以及处理开销,相关开销会进一步影响对协作节点的选择.即,系统在选择协作节点时,需要考虑这部分开销来优化系统性能.

现有协作方法在协作点选择及资源调度上更多地考虑到信道特性,即考虑如何根据信道状态信息(channel state information,简称 CSI)来选择协作节点,以优化系统性能,包括增加系统信道容量、减小能量消耗、降低误符号/误码/误帧率等,而很少考虑为实现协作通信引入的 MAC 开销及相关的接入控制问题.与协作编码、协作点选择方法相比,关于无线网络的协作 MAC 机制的研究相对较少.在本节中,我们将对这方面的研究成果进行归纳总结、分析比较.

在分析无线网络现有的 MAC 机制时,我们根据选择的协作(中继)节点数量的不同,将其分为单中继协作方式和多中继协作方式.

2.1 单中继选择方案

协作伙伴选择方面,现有文献[13−17]针对单中继选择问题进行研究,下面将对几种比较典型的中继选择机制进行分析.

2.1.1 ERSP-CWSN (an efficient relay selection protocol for cooperative WSN)

针对无线传感器网络,文献[13]利用节点之间的地理信息选择最好的中继,最大化协作增益和最小化目的端误符号率(symbol error probability,简称 SEP).ERSP-CWSN 采用集群的思想,数据通过在集群之间传输,将多跳传输视为众多单跳传输的联合.采用 DF 转发方式,具体过程如图 2 所示.首先,有数据需要发送的传感器节点向它自己集群内的簇头发送数据.然后,簇头在这个集群内选择一个最优的协作传感器节点作为协作中继,向邻居簇头节点转发数据.最后,通过目的节点所在集群的簇头,将源节点的数据转发给目的节点.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

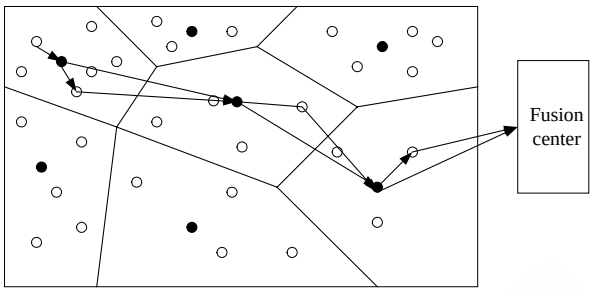


Fig.2 Example of ERSP-CWSN
图 2 ERSP-CWSN 示意图

该方法复杂度低,没有复杂的信道状态信息估计,从而减少了运算复杂度,同时,有效地提高了系统的可靠性,方便运用到快速时变信道中.但是,由于只考虑了地理位置,误差固定,并不能很好地适应时变特性,对于传感器网络十分敏感的能耗问题也没有考虑,这使得协作效果不能得到很好的保证.文献[18–20]从能耗的角度设计了协作通信 MAC 机制.

2.1.2 ITRS/MHRS (incremental transmission with relay selection/multi-hop with relay selection)

文献[14]讨论了在有限反馈条件下,高效频谱利用的中继选择方法.它针对两种不同拓扑结构提出 ITRS (incremental transmission with relay selection)和 MHRS(multi-hop with relay selection)两种协议,并分析了它们的分集复用效果.系统模型(如图 3 所示)由一个源节点、一个目的节点和 M 个半双工中继节点构成.

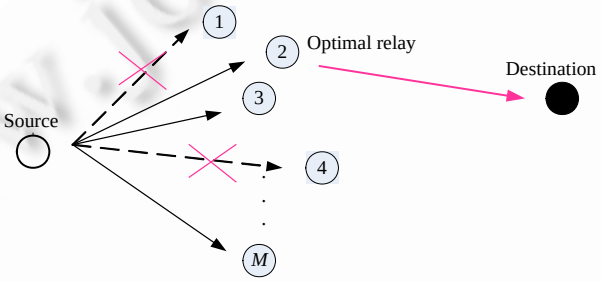


Fig.3 Topology model of ITRS/MHRS
图 3 ITRS/MHRS 系统拓扑模型图

如果直传链路和中继链路都可达,则采用 ITRS 协议,具体流程如下:

1) 源节点发送数据包;
2) 如果目的节点收到这个数据包后可以正确解码,便广播一个 ACK,系统返回到步骤 1);否则,目的节点广播 NACK;
3) 在收到 NACK 后,成功解码消息的中继节点将向目的节点发送 RTS 来报告自己的状态;
4) 目的节点根据收到的 RTS 里携带的信息,在成功解码源节点消息的中继中选择最好的那个中继节点,广播最好的中继标号;
5) 被选中的中继节点重传数据包,目的节点将两次收到的数据包结合并解码.

当源节点到目的节点之间直传链路不可达时,文献[14]给出了 MHRS 协议,如图 4 所示,具体流程如下:

1) 在第 1 个时隙里面源节点发送第 1 个数据包;
2) 在接下来的时隙,成功解码数据包的中继节点向目的节点发送 RTS 来通告自己的状态;
3) 目的节点根据 RTS 里携带的信息,选择性能最好的节点作为协作中继,并广播其标号;
4) 节点根据收到的广播信息判断自己是否被选为协作中继,如果不是,则保持空闲,在下一个时隙接收从源节点广播的数据包.否则,将数据包转发给目的节点.与此同时,源节点开始传输新的数据包;

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

5) 除正在转发的协作中继外,其他空闲节点接收这一时隙源节点广播的数据包,如果能够正确接收,则返回步骤 2),继续.

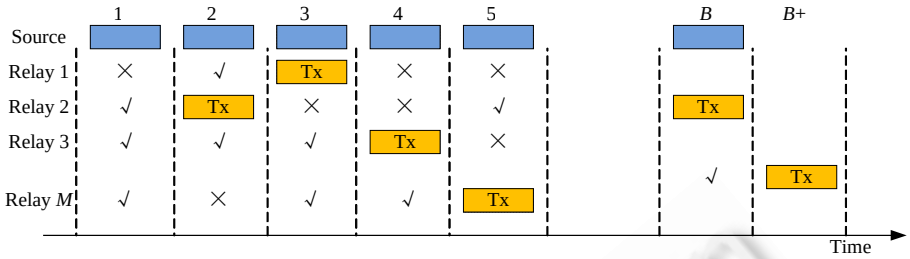


Fig.4 Example of MHRS

图 4 MHRS 示意图

ITRS/MHRS 着重讨论了中继选择方法和中断概率等问题以及怎样解决分集复用权衡,对现有的半双工中继方法和机会中继进行改进.进一步分析协作通信的中断概率,可参考文献[14,17,18,21].

2.1.3 CoopMAC (cooperative MAC)

文献[15]提出一种无线局域网的协作 MAC 机制(CoopMAC),旨在提高网络的吞吐量,降低传输时延(如图 5 所示).CoopMAC 与传统 802.11 网络协议兼容.在 CoopMAC 中,当源节点和目的节点之间的直传速率较低时,选取性能好的中继节点作为协作中继转发数据,以提升性能.CoopMAC 要求网络中的每个节点维护一张协作表,表里存储着协作判断所需要的网络信息,并不断更新.协作判断依据公式(1):

$$\frac{1}{R_{s,h}}+\frac{1}{R_{h,d}}<\frac{1}{R_{s,d}} \tag{1}$$

其中,$R_{s,d}$ 为源节点到目的节点之间的直传速率,$R_{s,h}$ 为源节点到中继节点之间的直传速率,$R_{h,d}$ 为中继节点到目的节点之间的直传速率.如果通过协作中继转发的时间小于直传,则采取协作,否则采取直传.

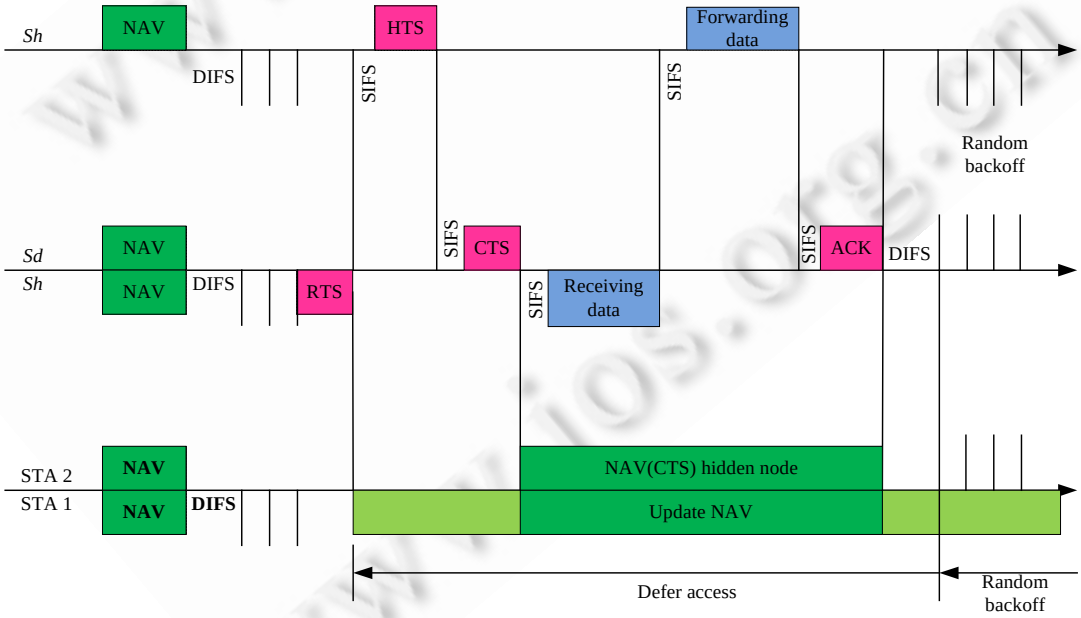


Fig.5 Data transmission in CoopMAC

图 5 CoopMAC 时序图

当源节点有数据需要发送时,首先查找自己的协作表,看是否有合适的协作伙伴节点,如果有,则采用协作

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

通信方式.否则,按照传统 802.11 模式直传.CoopMAC 按照 RTS/HTS/CTS 的模型进行 3 次握手,具体流程为:

1) 源节点发送 RTS(request to send);
2) 协作中继收到 RTS 后,回复 HTS(helper to send);
3) 目的节点收到 RTS/HTS 后,回复 CTS(relay clear to send);
4) 源节点收到 CTS 后,开始发送数据给协作中继;
5) 协作中继将收到的数据转发给目的节点;
6) 目的节点收到协作中继转发的数据包后,回复 ACK(acknowledgment),通信完成.

该方法思路简单、明了,实现复杂度低,与传统 IEEE 802.11 协议兼容,效果明显.但是,该方法并没有考虑协作分集增益,仅仅以好的两跳传输代替差的一跳传输,放弃了原有的直传信道.文献[10,15,37]讨论了将吞吐量作为衡量标准的协作点选择方法.

2.1.4 RS-HRP(relay selection-hybrid relaying protocols)

文献[16]在混合中继协议(HRP)的基础上提出了一种改进的中继选择方法(RS-HRP).在这个方法中,所有候选的中继伙伴节点都分为两组,分别为放大转发(AF)中继和解码转发(DF)中继.如果可以正确地解码,那么就划入 DF 组,剩下的不能正确解码的都划入 AF 组.之后,以目的端的帧错误率(frame error probability,简称 FER)最小化为目标,从 AF 和 DF 两组中各自选择一个协作效果最优的节点,再对这两个节点进行对比,选取最优的一个作为协作中继.图 6 为 RS-HRP 的原理图,具体流程如下:

1) 源节点广播数据包;
2) 根据能否正确解码,将中继节点划分为 AF 和 DF 组;
3) 在 AF 和 DF 组中分别选择最优的一个节点进行对比,其中性能最好的作为协作中继;
4) 协作中继转发数据包给目的节点.

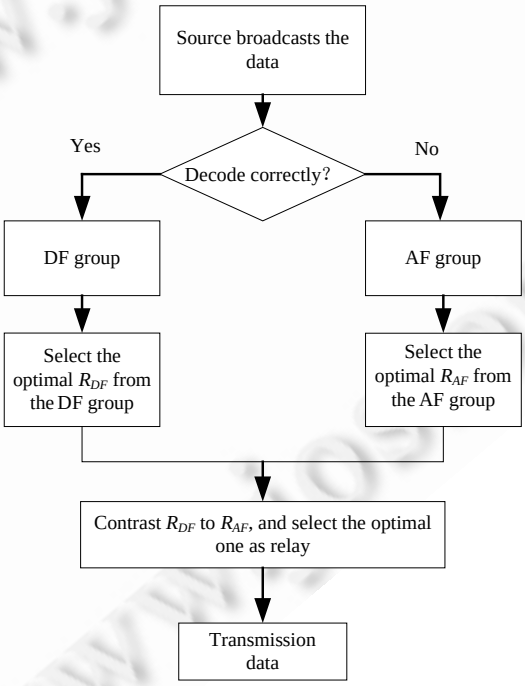


Fig.6 Flow chart of RS-HRP

图 6 RS-HRP 流程图

RS-HRP 比 AF 或者 DF 协作更为灵活,在 SNR 增加时,可以非常接近理想的 DF 选择方案.文献[16]并没有

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

考虑如何实时获取源节点、目的节点及协作节点之间的信道状态信息,但是分析了实时信道信息获取/更新所带来的开销.

2.1.5 CMAC-ARS(cooperative MAC with automatic relay selection)

文献[17]在分布式无线网络环境下采用被动选取模式,空闲节点监听相邻节点发送的 RTS/CTS,并根据 RTS/CTS 信息分析信道状态,从而判定自身是否能够帮助通信双方协作,如果可以,则回复 RRTS 应答.否则,保持空闲.该方法根据协作中继的增益大小将协作中继分为两类,效果好的协作中继会在第 1 时间优先发送 RRTS,通过设置忙音进行通告;次优的协作中继如果收到忙音后就不再发送 RRTS,否则,在第 2 时间发送 RRTS 参与协作.这样,在保证选取高质量协作中继的情况下减小了协作冲突.

CMAC-ARS 的时隙分配图如图 7 所示,它采用 DF 方式协作,选取单个协作中继.CMAC-ARS 由空闲节点通过监听 RTS/CTS 帧自主决定是否参与协作.当多个空闲节点均判断自己可以协作时,将同时发送 RRTS 帧,从而造成碰撞.尽管 CMAC-ARS 通过发送忙音信号来减小碰撞对系统性能的影响,但忙音信道的引入还是增加了硬件的实现复杂度.

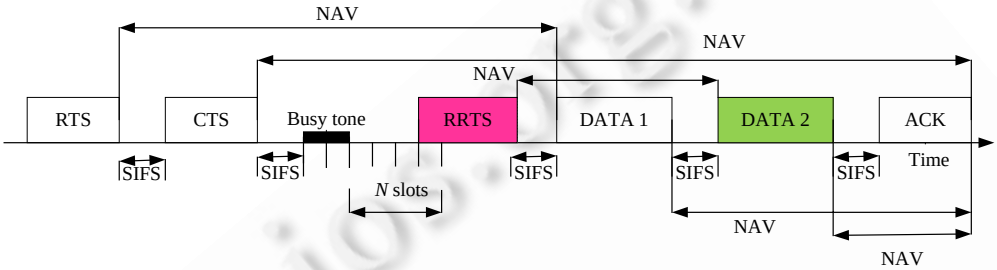


Fig.7 Data transmission in CMAC-ARS

图 7 CMAC-ARS 时隙图

2.2 多中继选择方案

文献[20,22–28]提出了基于多协作中继的选取方法.我们将对其中几种典型的协议进行分析.

2.2.1 DRSPC-MCC(distributed relay selection and power control for multi-user cooperative communication)

文献[22]较早地将博弈论的思想引入到协作伙伴选取中,在分布式网络中解决多用户协作通信资源分配问题,包括中继如何选择和功率如何分配.该协议采用两级博弈联合考虑源节点作为买家和中继节点作为卖家的好处,提出的方案不仅帮助源节点在相对较好的位置选择中继和购买合适的功率量,而且还帮助互相竞争的中继节点通过设置合理的价格来最大化自己的利用率.DRSPC-MCC 利用买卖博弈理论框架,结合不同的协作方式制定了一个优化问题.中继 ri 优化问题或卖家博弈可以由等式(2)表示:

$$\max_{\{p_i\}>0} U_{ri} = (p_i - c_i)p_{ri}, \forall i \tag{2}$$

C_i 表示中继数据所耗费的功率;P_i 表示中继 ri 出售给源节点 S 的每单位功率的价格;P_{ri} 表示从中继公布的价格来看,源节点愿意从中继 r 购买的功率量;ri 表示第 i 个中继.上述博弈的目的是通过最优价格 P_i 来最大化中继利润 U_{ri}.

如果可以选择的中继数增加,中继之间的竞争也会更加激烈,中继的平均价格也会下降.该方法以分布式方式实现,在最大化功率利用的同时可以减小开销,达到与集中式协作点选择方法近似的性能.

DRSPC-MCC 的主要问题是:为了获得最优效用而导致的来回议价过程在 MAC 机制中难以实现.同时,反复议价会在很大程度上增加 MAC 机制的开销.

2.2.2 DCMAC(dynamic cooperative MAC)

文献[23]提出一种选择多节点参与协作的动态协作 MAC 机制(DCMAC),DCMAC 基于 CoopMAC 的思路,加入了协作分集和多协作中继的概念,利用无线信道的广播特性来获得信道信息,选择最合适的协作节点参与

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

协作并高效预留信道.该方法涉及到协作节点的判断、选择、信道资源的预留以及协作表的更新维护.协作伙伴的选取在源节点进行,源节点通过协作表里的相关信息逐个分析,最后得出最大协作增益时所需的协作伙伴数以及相应的协作节点.协作增益定义为

$$F(H[i])=C(H[i])\frac{S(H[0])}{S(H[i])}-C(H[0]) \tag{3}$$

其中,$H[i]$为选定的协作伙伴集合,$C[0]$为直传的信道容量,$S(H[i])$为当有 i 个协作伙伴参与协作时所产生的 MAC 开销.该方法的最大特点就是,在协作选取过程中,考虑协作增益的同时,结合了实际产生的 MAC 开销. DCMAC 的帧交互图如图 8 所示.

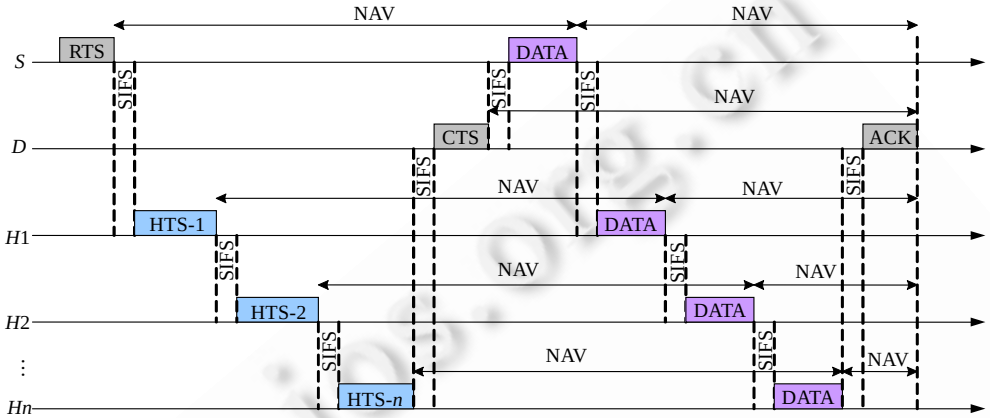


Fig.8 Data transmission in DCMAC

图 8 DCMAC 的帧交互图

2.2.3 MRS-CSM(multi-relay selection for cooperative spatial multiplexing)

文献[26]提出一种多中继选择方法,分析在 DF 模式下选择多个中继进行协作通信的中断容量和分集复用增益 DMT(diversity-multiplexing tradeoff)情况.中继选择基于贪婪算法有效地减少复杂度,文献[26]提出的中继选择算法分别和以下 3 种协议进行对比:1) 支持协作空间分集的解码转发协议 DF-SDiv(decode-and-forward with cooperative spatial diversity);2) 支持多中继选择的放大转发中继协议 AF-SDiv(relay protocol with multi-relay selection);3) 支持随机中继选择的空间复用解码转发协议 DF-SM-random(DF for spatial multiplexing with randomized relay selection).仿真结果表明,MRS-CSM 可以达到分集复用增益,如公式(4)所示:

$$d(r)=\frac{M+1}{N_r}\left((N_r-K+1)^2-(2(N_r-K)+1)\left(K-\frac{r}{1-r}\right)\right) \tag{4}$$

其中,M 为中继个数,r 为多路复用增益,N_r 为接收端天线个数.

具体传输协议如下:

假设监听阶段持续 N_1 时间,协作复用阶段持续 $N_2=N-N_1$ 时间,N 为整个通信时间.如果中继节点在监听阶段不能正确解码,那么监听阶段将持续 N 时间,并且目的节点只可以接收源节点数据.在源节点,编码器选择 2^{NR} 码字中的一个在第一 N_1 时间开始时传输.在监听阶段,所有中继和目的节点接收源节点数据,如果某个中继正确解码收到的数据,将会给目的节点发送一个 ACK.其他中继节点则继续监听源节点,直到目的节点收到第 M 个 ACK 结束.如果在 N 时间到达之前 M 个中继都可以解码,则系统将会转入协作传输阶段.在目的端,只要收到第 M 个 ACK,它将在 M+1 个节点中选择 N_r 个在协作传输阶段来传输,并将选定的节点告知源节点和中继节点.

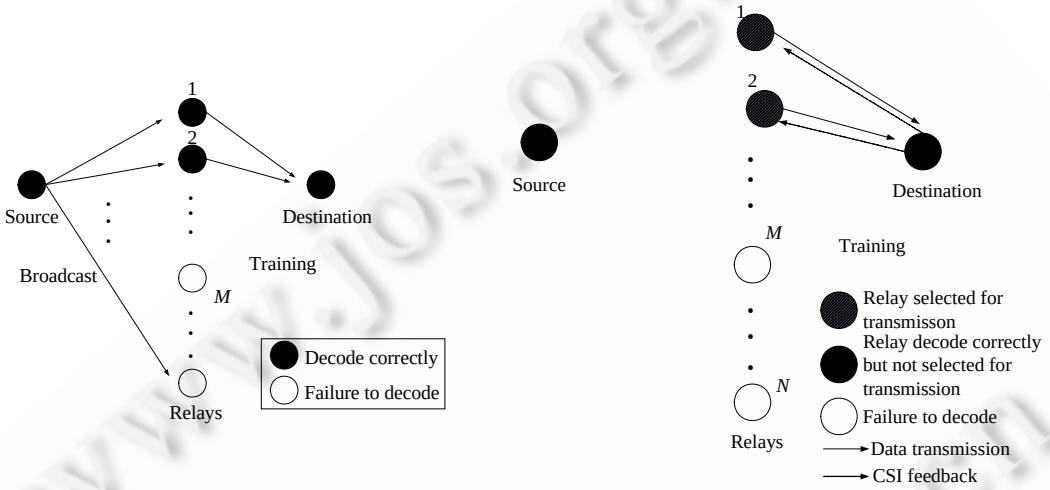
在协作传输阶段,已选定的 N_r 节点把前一阶段接收的数据重新编码成 N_r 流.每一个选定的中继节点传输 N_r 数据流中的一个.因此,总共 N_r 个重新编码的数据流在协作传输方案中通过 N_r 个中继节点进行转发. MRS-CSM 的优点是复杂度低、中断容量高,但是开销相对也较大.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

2.2.4 CRFC-SRC(cooperative relaying with simple relay selection)

文献[27]主要针对协作传输过程中的能量消耗进行分析和优化,在协作传输过程中,通过选取一个或多个协作伙伴达到协作增益最大化.协作传输过程如图 9 所示.在图 9 中,传输模型由源节点、目的节点和 N 个中继节点构成.源节点到中继节点,以及中继节点到目的节点之间都是频率非选择性衰落信道.整个协作传输过程由以下 3 个步骤构成:

1) 源节点广播数据,拥有足够高接收 SNR 的中继节点才可以正确解码数据,假设可以正确解码的中继个数为 M.只有正确解码的 M 个中继节点才可以向目的节点发送训练序列,用来估计自己和目的节点之间的 CSI;
2) 目的节点根据收到的训练序列得出信道功率增益,然后以中断概率 $p_{out}(M)$表明与中继节点之间不可通信,或者将通过训练序列得出的 CSI 信息反馈回中继节点;
3) 鉴于部分中继节点不能成功接收到训练序列或者与目的节点之间不能通信,因此,实际可以向目的节点发送数据的中继节点个数≤M.



(a) Broadcast and training
(a) 广播和训练

(b) CSI feedback and data transmission
(b) 数据传输和 CSI 反馈

Fig.9 Procedure of cooperative communication
图 9 协作通信过程

该方案可以获得较高的分集增益,而且在节能方面也有一定提高,但是 CSI 获得过程会增大开销.

2.2.5 RSM-WCC(relay selection methods for wireless cooperative communications)

文献[28]中协作中继系统模型如图 10 所示,由源节点、目的节点和 N 个均匀分布的中继节点构成.源节点通过选择一系列的协作中继优化包括源节点到中继节点以及中继节点到目的节点的整个传输时间.文献[28]提出两种中继选择方法:1) 自适应选择中继个数;2) 预先定义好中继个数.

网络模型方面分析了瑞利衰落对中继选择方法的影响,源节点到中继节点、中继节点到目的节点以及源节点到目的节点的信道衰落系数分别用 h_{si},h_{id} 和 h_{sd} 表示.

源节点需要发送的数据包为 D bits,如果采用直传方式,传输时间为 $T=\dfrac{D}{C_{sd}W}$.其中:W 为信道带宽;C_{sd} 为源节点到目的节点之间的信道容量,$C_{sd}=\log_2\left(1+\dfrac{p\,|hsd|^2}{\sigma^2}\right)$,$p$ 为发送方的平均功率,σ^2 为高斯白噪声变量.

整个通信过程由两个阶段组成:监听阶段和协作传输阶段.在监听阶段,源节点向中继节点广播数据,目的

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

节点不接收源节点的数据.源节点通过中继选择准则(自适应地选择中继个数或预先定义好中继个数),决定哪些中继节点参与协作.在协作阶段,协作组(包括源节点和选定的中继节点)同时向目的节点传输数据.整个协作传输时间为

$$T = T_L + T_C = \frac{D}{\min_{i\in A} C_{si} W} + \frac{D}{C_{sAd} W} \tag{5}$$

其中,C_{si} 是源节点和中继 i 之间的信道容量,C_{sAd} 是协作组和目的节点之间的信道容量. $C_{si} = \log_2\left(1+\frac{p|h_{si}|^2}{\sigma^2}\right)$, $C_{sAd} = \log_2\left(1+\frac{p}{\sigma^2}H_{sAd}^H H_{sAd}\right)$,$H_{sAd}$ 表示协作组和目的节点之间的信道矩阵,描述为 $H_{sAd}=[h_{sd}\ \ h_{i1d}\ \ h_{i2d}\ \ \dots\ \ h_{ikd}]^T$, $i_1,i_2,\dots,i_k$ 表示属于 A 中的中继编号.

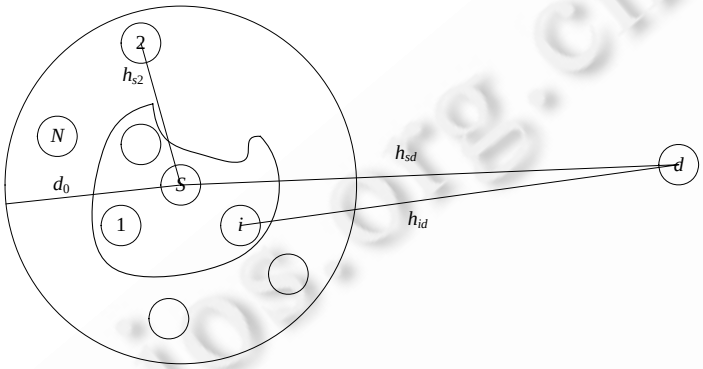


Fig.10 RSM-WCC model

图 10 RSM-WCC 模型

RSM-WCC 协作选择方法相对比较简单,传输时间减少,但是精确度受信道衰落和路径损失的影响;并且,只分析了信道衰落情况的影响,没有考虑路径损耗的影响.

而其他文献[1,29−35]讨论了协作与信噪比的增益.在文献[36,37]中,分析了采取协作对平均时延和时延抖动的改善,并针对协作通信设计了一种利用协作中继的 ARQ 机制.关于公平性和安全性等问题,在文献[38,39]中得到了研究.文献[40]通过开发分布式协作 MAC(C-MAC)和路由协议研究无线路由协议中的协作分集.另外,复杂度、频谱利用率、误码率、干扰和均衡等相关问题,也在文献[13,27,29−34]中被涉及到.表 1 从开销、协作点个数、分集增益、复杂度等方面对以上代表性单中继和多中继协议进行了比较.

Table 1 Comparison of several representative protocols

表 1 几种代表性协议比较

Features	Name									
	CWSN	DRSPC -MCC	ITRS /MHRS	Coop -MAC	CRFC -SRC	RS -HRP	DC -MAC	CMAC -ARS	MRS -CSM	RSM -WCC
Overhead	Quite high	High	Quite low	Quite low	High	Quite high	Quite high	Quite high	Low	Low
Available relays	Single	Many	Single	Single	Many	Single	Many	Single	Many	Many
Diversity gain	With	With	With/ Without	Without	With	With	With	With	With	With
Networking mode	WSN	W-LAN	W-LAN	802.11	Ad hoc	W-LAN	W-LAN	W-LAN	W-LAN	W-LAN
Selected mode	Cluster	Source	Source	Source	Destination	Source	Source	Relay	Destination	Source
Selected merits	SEP	Power	Outage probability	Throughput delay	CSI	FER	Capacity	Capacity	Outage capacity	Transmission time
Complexity	Quite low	High	Quite high	Quite low	Low	Quite high	Quite low	High	Low	Low

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

3 协作中继方法的性能仿真

为了仿真比较现有协作 MAC 机制,我们将其分为 3 类:第 1 类 MAC 机制[13,14]根据信道状态信息来选择协作点达到分集增益最大化;第 2 类是考虑了 MAC 开销和信道状态信息进行协作伙伴选择,但是没有考虑分集增益的 CoopMAC[15];第 3 类是联合考虑信道状态信息产生的分集增益以及 MAC 开销的协作方法 DCMAC[23].仿真参数见表 2.在本文中,我们主要仿真了 3 类 MAC 机制的协作增益.

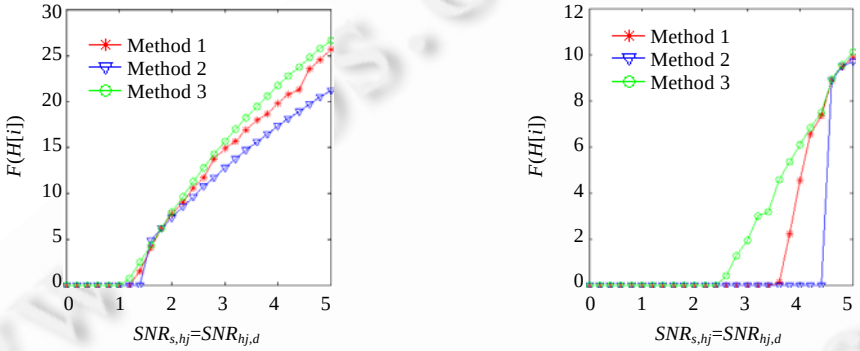
Table 2 Simulation parameters

表 2 仿真参数

RTS	(192+56×i) bits
HTS	136bits
CTS	160bits
ACK	160bits
W	20MHz
MAC and PHY header data rate	1Mbps
T_{SIFS}	1μs
L_{DATA}	1024Bytes

第 1 类方法协作增益表达式为公式(6),对应于图 11、图 12 中方法 1 曲线.

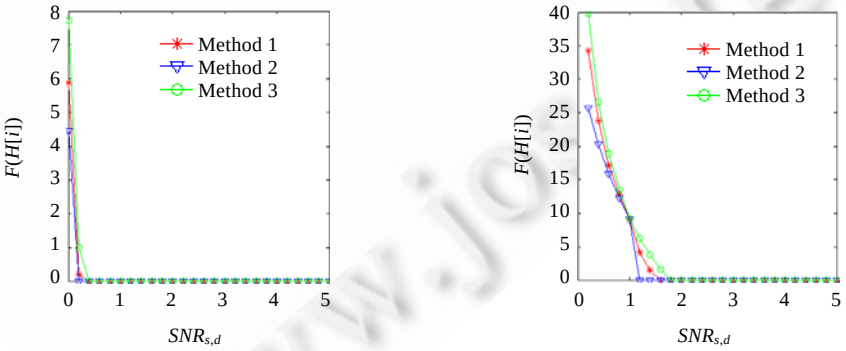
$$F(H[i])=C(H[i])-C(H[0]) \tag{6}$$



(a) $SNR_{s,d}$=0.414 (b) $SNR_{s,d}$=1

Fig.11 Cooperative gain

图 11 协作增益



(a) $SNR_{s,hj}$=$SNR_{hj,d}$=1 (b) $SNR_{s,hj}$=$SNR_{hj,d}$=4.657

Fig.12 Cooperative gain of three MAC mechanisms

图 12 3 类 MAC 机制的协作增益

第 2 类和第 3 类方法协作增益表达式为公式(3),对应于图 11、图 12 中方法 2 和方法 3 曲线.公式(3)中,

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$$C(H[i])=W\cdot\log_2\left(1+\frac{P_sG_{s,d}}{\sigma^2}+\sum_{j\in H[i]}Q(j)\right),\ Q(j)=\frac{\frac{P_sG_{s,hj}}{\sigma^2}\cdot\frac{P_sG_{hj,d}}{\sigma^2}}{1+\frac{P_sG_{s,hj}}{\sigma^2}+\frac{P_sG_{hj,d}}{\sigma^2}}.$$

在性能分析中均假设所有的协作中继节点性能相同.在源节点和目的节点之间的信道质量不同以及源节点和中继节点、中继节点和目的节点之间信道质量不同的情况下,仿真分析了上述3类方法的协作增益$F(H[i])$.

3.1 直传固定,协作改变

在图 11(a)和图 11(b)中,源节点到目的节点之间的数据包传输速率固定,即在 $SNR_{s,d}$ 分别固定为 0.414 和 1 时,$SNR_{s,hj}=SNR_{hj,d}$ 同时变化.从图中可以看出,$SNR_{s,hj}=SNR_{hj,d}$ 同时变化时所带来的协作增益是不同的.在 $SNR_{s,d}$,也就是在直接通信的信道质量较差时,采取合理的协作方式(如 $SNR_{s,hj}=SNR_{hj,d}$ 同时增大),可以带来协作增益.

3.2 协作固定,直传改变

图 12 为 $SNR_{s,hj}=SNR_{hj,d}$,即在源节点到中继节点和中继节点到目的节点的数据包传输速率固定不变(其中,图 12(a)对应的 $SNR_{s,hj}=SNR_{hj,d}$ 等于 1,图 12(b)对应的 $SNR_{s,hj}=SNR_{hj,d}$ 等于 4.657)、$SNR_{s,d}$ 变化的情况下,协作增益的变化情况.由图 12 可以看出,如果直传信道较好,那么再采取协作,只会导致网络资源的浪费,降低网络性能.

由图11和图12可以看出,在3种协作方法下,方法3的增益最好,其次是方法1,最后才是方法2.考虑了MAC开销和引入了协作分集以及多协作中继选择,方法 3 机制可比方法 2 获取更高的有效信道容量,这是因为,方法 2 没有虚拟 MIMO 增益.而方法 1 的增益介于方法 2 和方法 3 之间,因为方法 1 没有考虑 MAC 开销.但与方法 2 不同,方法 1 产生了协作增益.而且当协作和直传信噪比相差不大时,采用协作反而会出现增益减少的情况.

4 结束语

现有的协作通信设计大都是在常规的 MIMO 模型上展开的,而协作通信自身涉及到多终端、多跳等问题,必须考虑到物理层、无线资源调度、MAC、路由等问题来实现虚拟 MIMO.具体到现有的协作 MAC 协议,都是针对一些特定的协作模式,如分布式空时编码、机会中继等,以某一个或者几个性能参数作为指标进行优化,选取协作中继,分配信道.然而,针对基于全网和跨层联合的协作 MAC 的研究还不够,协作中继在帮助源节点和目的节点传输信息的同时,对其他周边节点的干扰、自身数据的发送、不同业务流的分配以及如何结合 PHY 增益,联合网络层信息,都是值得考虑的问题.

References:

[1] Nosratinia A, Hunter TE, Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10):74−80. [doi: 10.1109/MCOM.2004.1341264]

[2] Laneman JN, Tse DNC, Wornell GW. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. IEEE Trans. on Information, 2004,50(12):3062−3080. [doi: 10.1109/TIT.2004.838089]

[3] Mangold S, Choi S, Hiertz GR, Klein O. Analysis of IEEE 802.11e for QoS support in wireless LANs. IEEE Wireless Communications, 2003,10(6):40−50.

[4] Xiao Y. IEEE 802.11n: Enhancements for higher throughput in wireless LANs. IEEE Wireless Communications, 2005,12(6): 82−91.

[5] Steven WP, Robert WH. The future of WiMAX: Multihop relaying with IEEE 802.16j. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1):104−111.

[6] IEEE Std 802.16-2004. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. 2004.

[7] Lee KH, Cho DH. A multiple access collision avoidance protocol for multicast services in mobile ad hoc networks. IEEE Communications Letters, 2003,7(10):508−510. [doi: 10.1109/LCOMM.2003.817316]

[8] Harghavan B, Demers A, Shenker S, Zhang LX. MACAW: A media access protocol for wireless LANs. In: Proc. of the ACM SIGCOM (SIGCOM'94). London: ACM Press, 1994. 212−225. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.33.4812

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[9] Talucci F, Gerla M, Fratta L. MACABI (MACA by invitation): A receiver oriented access protocol for wireless multiple networks. In: Proc. of the 8th IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'97). Helsinki: IEEE Communication Society Press, 1997. 435−439. http://www.eee.metu.edu.tr/~elif/mac_literature/11.pdf

[10] Wei Y, John H, Deborah E. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2004,12(2):493−506. [doi: 10.1109/TNET.2004.828953]

[11] Simon H. Cognitive radio: Brain-Empowered wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Special Issue on Cognitive Networks), 2005,23(2):201−220.

[12] Mitola JIII, Maguire GQJ. Cognitive radio: Making software radios more personal. IEEE Personal Communications, 1999,6(4): 13−18. [doi: 10.1109/98.788210]

[13] Wang CL, Syue SJ. An efficient relay selection protocol for cooperative wireless sensor networks. In: Proc. of the Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC 2009). Budapest: IEEE Communication Society Press, 2009. 1−5. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4917575

[14] Tannious R, Nosratinia A. Spectrally-Efficient relay selection with limited feedback. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008,26(8):1419−1428. [doi: 10.1109/JSAC.2008.081008]

[15] Liu P, Tao ZF, Narayanan S, Korakis T. CoopMAC: A cooperative MAC for wireless LANs. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007,25(2):340−354. [doi: 10.1109/JSAC.2007.070210]

[16] Li YH, Vucetic B, Zhuo C, Yuan JH. An improved relay selection scheme with hybrid relaying protocols. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2007). Washington: IEEE Communication Society Press, 2007. 3704−3708. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4411613

[17] Chou CT, Yang J, Wang D. Cooperative MAC protocol with automatic relay selection in distributed wireless networks. In: Proc. of the 5th Annual IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM 2007). White Plains: IEEE Press, 2007. 526−531. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4144892

[18] Zhou K, Tat ML. A relay selection scheme under optimal power allocation. In: Proc. of the 11th IEEE Singapore Int'l Conf. on Communication Systems (ICCS 2008). Guangzhou: IEEE Press, 2008. 1609−1613. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4737454

[19] Zhou Z, Zhou SL, Cui JH, Cui SG. Energy-Efficient cooperative communication based on power control and selective relay in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Military Communications Conf. (MILCOM 2007). Orlando: IEEE Press, 2007. 1−7. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4455211

[20] Tam WP, Lok TM, Wong TF. Flow-Optimized asynchronous relay selection protocol for parallel relay networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2008). Beijing: IEEE Communication Society Press, 2008. 1024−1028. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4533236

[21] Bletsas A, Khisti A, Reed DP, Lippman A. A simple cooperative diversity method based on network path selection. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2006,24(3):659−672. [doi: 10.1109/JSAC.2005.862417]

[22] Wang BB, Zhu H, Liu KJR. Distributed relay selection and power control for multiuser cooperative communication networks using buyer/seller game. In: Proc. of the 26th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2007). Anchorage: IEEE Computer Society Press, 2007. 544−552. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4215652

[23] Li Y, Cao B, Wang CG, You XH. Dynamical cooperative MAC based on optimal selection of multiple helpers. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2009). Honolulu: IEEE Communication Society Press, 2009. 1−6. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5425531

[24] Jing YD, Jafarkhani H. Single and multiple relay selection schemes and their achievable diversity orders. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2009,8(3):1414−1423. [doi: 10.1109/TWC.2008.080109]

[25] Eisenberg Y, Logan C. Cooperative communications for improved throughput, range and covertness. In: Proc. of the IEEE Military Communications Conf. (MILCOM 2008). San Diego: IEEE Press, 2008. 1−7. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4753032

[26] Zhang SQ, Lau VKN. Design and analysis of multi-relay selection for cooperative spatial multiplexing. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2008). Beijing: IEEE Communication Society Press, 2008. 1129−1133.

[27] Madan R, Mehta NB, Molisch AF, Zhang J. Energy-Efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2008,7(8):3013−3025. [doi: 10.1109/TWC.2008.06090]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[28] Seunghoon N, Mai V, Tarokh V. Relay selection methods for wireless cooperative communications. In: Proc. of the 2008 Inform. Sciences and Systems (CISS 2008). Princeton: IEEE Press, 2008. 859−864. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4558640

[29] Huang JW, Han Z, Chiang M, Poor HV. Auction-Based resource allocation for cooperative communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008,26(7):1226−1237. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080919]

[30] Tae WB, Bang CJ, Dan KS, Choi W. Performance analysis of two relay selection schemes for cooperative diversity. In: Proc. of the IEEE 18th Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007). Athens: IEEE Press, 2007. 1−5. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4394552

[31] Hegyi B, Levendovszky J. Efficient, distributed, multiple-relay selection procedures for cooperative communications. In: Proc. of the 3rd Int'l Symp. on Wireless Pervasive Computing (ISWPC 2008). Santorini: IEEE Press, 2008. 170−174. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4556190

[32] Lin Z, Erkip E, Stefanov A. Cooperative regions and partner choice in coded cooperative systems. IEEE Trans. on Communications, 2006,54(7):1323−1334. [doi: 10.1109/TCOMM.2006.877963]

[33] Liang YB, Veeravalli VV. Cooperative relay broadcast channels. In: Proc. of the 2005 Int'l Conf. on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing (WCNM 2005). Wuhan: IEEE Press, 2005. 1449−1454. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1549626

[34] Nguyen HX, Figueiredo DR, Grossglauser M, Thiran P. Balanced relay allocation on heterogeneous unstructured overlays. In: Proc. of the 27th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2008). Phoenix: IEEE Computer Society Press, 2008. 126−130. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4509629

[35] Onat FA, Fan YJ, Yanikomeroglu H, Poor HV. Threshold based relay selection in cooperative wireless networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2008). New Orleans: IEEE Communication Society Press, 2008. 45−50. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4698696

[36] Dianati M, Ling XH, Naik K, Shen XM. A node-cooperative ARQ scheme for wireless ad hoc networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2006,55(3):1032−1044. [doi: 10.1109/TVT.2005.863426]

[37] Zhao Y, Adve R, Lim TJ. Improving amplify-and-forward relay networks: Optimal power allocation versus selection. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2007,6(8):3114−3123.

[38] Zhang JT, Zhuang HC, Liang T, Han J. A novel relay selection strategy for multi-user cooperative relaying networks. In: Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC 2009). Barcelona: IEEE Press, 2009. 1−5. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5073325

[39] Lidstrom K, Larsson T. Cooperative communication disturbance detection in vehicle safety systems. In: Proc. of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conf. (ITSC 2007). Seattle: IEEE Press, 2007. 522−527. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4357777

[40] Azgin A, Altunbasak Y, AlRegib G. Cooperative MAC and routing protocols for wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2005). St Louis: IEEE Communication Society Press, 2005. 2853−2859. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1578280

李云(1974－),男,四川西充人,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为宽带无线接入技术.

曹傧(1983－),男,硕士,主要研究领域为宽带无线接入技术.

杜杨(1983－),男,硕士,主要研究领域为宽带无线接入技术.

尤肖虎(1962－),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为移动通信.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn