ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.21, No.4, April 2010, pp.732−749
doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03708
© by *Institute of Software*, *the Chinese Academy of Sciences*. All rights reserved.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

MIMO 多跳无线网络*

李方敏+, 马小林, 方艺霖, 吴 鹏

(武汉理工大学 信息工程学院 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)

MIMO Muti-Hop Wireless Networks

LI Fang-Min+, MA Xiao-Lin, FANG Yi-Lin, WU Peng

(Hubei Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network, School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

+ Corresponding author: E-mail: lifangmin@whut.edu.cn

LI FM, Ma XL, Fang YL, Wu P. MIMO muti-hop wireless networks. *Journal of Software*, 2010,21(4): 732−749. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3708.htm

Abstract: After surveying the research of MIMO (multiple-input multiple-output) multi-hop wireless networks, this paper analyzes the MIMO mechanisms for multi-hop wireless networks and discusses the effect of MIMO upon separate network layer and the whole design of multi-hop wireless networks. Focusing on cross-layer design, it expounds the fundamental mechanism of existing representative protocols and algorithms for MIMO-based multi-hop wireless networks, and compares and analyzes their characteristics, performance as well as deficiencies. Finally, by pointing out current research development, it summarizes the restrictions to the practical applications of MIMO-based multi-hop wireless networks, and proposes the importance of designing an adaptive and high performance cross-layer model which based on MIMO technology for multi-hop wireless networks.

Key words: muti-hop wireless networks; MIMO (multiple-input multiple-output); cross-layer protocol design; practicality

摘 要: 综述了多跳无线网络 MIMO(multiple-input multiple-output)技术的研究进展,分析了 MIMO 技术的引入对多跳无线网络各层及整体设计的影响.以跨层协议设计为重点,详细介绍了当前典型的基于 MIMO 的多跳无线网络协议算法的核心机制,并比较分析了这些算法的特点和性能差异与存在的缺陷.最后,结合本领域内的研究现状,指出了基于 MIMO 的多跳无线网络走向实际工程应用环境所亟待解决的关键问题,指出了基于 MIMO 技术设计自适应调整、高性能多跳无线网络跨层模型及协议的重要性.

关键词: 多跳无线网络;MIMO;跨层协议设计;实用化

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

多跳无线网络(multi-hop wireless networks),如:无线网状网(wireless mesh networks)、无线自组织网络(wireless ad hoc networks)和无线传感器网络(wireless sensor networks)等,是一个融合了多学科多领域的高度集

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60970019, 60773212 (国家自然科学基金); the Hubei Provincial Natural Science Foundation of China under Grant No.2009CDA132 (湖北省自然科学基金)

Received 2009-03-19; Accepted 2009-07-29

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

成的热点研究领域[1,2].近年来,随着研究的深入和应用范围的日益扩大,多跳无线网络得到了迅猛发展,但诸如实时多媒体业务、高速宽带业务、车辆间通信等新的应用领域所要求的高容量/吞吐量、高实时性、高带宽等高性能要求[3],使得现有的多跳无线网络的缺陷日益明显,网络容量问题尤为突出[4,5].于是,多跳无线网络的研究者们不断引入新的技术,并出现了新的特点和方向,这也给现阶段及未来的研究工作带来了新的机遇和挑战.

传统的多跳无线网络大多采用单天线进行数据的收发,是典型的 SISO(single-input single-output)系统.这种系统不能同时进行数据收发,其容量无法突破 Shannon 容量公式的限制[1,6].随着无线通信技术的迅猛发展,在多跳无线网络物理层采用新技术已经成为可能.MIMO 技术便是一种能够突破 Shannon 容量限制的有效手段[7,8].这种技术利用多接口多信道同时进行数据收发,使成倍地提高多跳无线网络系统容量成为可能,并且无需扩展频谱,能够有效节约频谱资源,提高能量利用率[6,9−13].同时,MIMO 技术对多跳无线网络的吞吐量、实时性和拓扑连通性等性能均有显著影响,并可结合物理层特性联合 MAC 层、网络层进行跨层协议设计,优化网络性能,为系统提供较好的 QoS(quality of service).因此,MIMO 技术是提高多跳无线网络系统性能的关键技术之一.

本文分析和总结了近年来基于 MIMO 的多跳无线网络所取得的研究进展和成果.第 1 节解析多跳无线网络中的 MIMO 技术.第 2 节详细讨论一些典型的基于 MIMO 的多跳无线网络协议与算法.第 3 节分析 MIMO 技术对多跳无线网络拓扑控制、MAC 层和网络层的影响.第 4 节简述 MIMO 技术对多跳无线网络架构设计的影响和所带来的挑战.第 5 节对现有的典型协议与算法进行比较与分析.第 6 节对全文进行总结并指出未来的发展方向和亟待解决的问题.

1 多跳无线网络 MIMO 技术解析

MIMO 技术指的是利用多根发射天线和多根接收天线进行无线传输的技术,是无线通信智能天线技术领域的重大突破.它可在不增加系统物理带宽的情况下成倍地提高通信系统容量和频谱利用率,将是新一代无线通信系统的关键技术[6,7].其主要思想是把收发端天线的信号进行合并,以改进每个 MIMO 用户的通信质量和速率,达到提高传输可靠性和增加数据速率的目的.多跳无线网络中的 MIMO 技术也就是利用 MIMO 的优良特性获得无线信道的空间分集增益和实现无线信道的容量增益,以提高多跳无线网络链路质量和系统容量的技术.当多跳无线网络采用 MIMO 技术后,网络节点具有两根或两根以上的天线,并拥有多个可用信道.天线和信道的选择与调度对网络多方面的性能均具有显著影响.因此,如何高效地进行天线和信道的选择与调度以及如何充分利用多天线多信道带来的优良特性进行新的高层协议的设计是极为复杂、极具挑战性的研究课题[4,14,15],这也引起了学术界和产业界极大的研究兴趣.

MIMO 技术对多跳无线网络的系统性能具有显著影响,主要表现在以下几个方面:

(1) MIMO 技术对多跳无线网络容量的影响[10−12,16]

MIMO 技术对多跳无线网络容量的影响主要体现在 3 个方面:第一,MIMO 技术通过在正交信道上使用多天线机制,使节点能够同时与多个邻居节点进行并行通信;第二,通过使用多天线增加空间自由度,能够增强空间复用能力;第三,多天线在实现并行通信的同时,能够降低同一信道冲突域内的节点数,从而有效降低通信冲突的概率.MIMO 技术在这 3 方面均可提升多跳无线网络的容量.

(2) MIMO 技术对路由性能的影响

通过使用 MIMO 技术(如:波束赋形和分集技术)可极大地增加期望的信号传输范围,而扩大信号传输范围后,相应的路由跳数也会随之减少,但并没有链路质量的损失,有助于路由性能的提高.但是,使用 MIMO 技术提高路由性能仅仅使用最短跳数并不能达到最优化,甚至还会导致性能的恶化.因此,需要开发新的更合适的路由判据以适应 MIMO 技术的特点,如:加权累计期望传输时间(weighted cumulative expected transmission time,简称 WCETT)[17],等等.在这一领域中,仍然有很多有价值的工作有待完成.

(3) MIMO 技术对多跳无线网络拓扑结构与连通性的影响[18]

网络中两个节点只有当其天线接口调节到共同的信道时才能进行通信,而 MIMO 技术为多跳无线网络提供了多根天线,它们可以在不同信道同时操作.因此,分配多个天线到新的信道可以提供更加丰富的连接,充分

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

利用冗余连接可以适应快速的拓扑变化,并且提高网络的连通性.MIMO 技术使得多跳无线网络的拓扑结构和连通性问题变得更加复杂且富于挑战性,如何降低传输过程中由多个信道所带来的干扰,并维持有效连接,同时适应拓扑的动态变化,等等,这一系列问题都有待解决.

(4) MIMO 技术对多跳无线网络实时性的影响[3]

由于无线信道具有多径衰落特性,信道的波动性较大,传统的 SISO 多跳无线网络并不能很好地提供有一定服务质量要求的可靠的实时业务,如:视频业务.然而,利用 MIMO 系统的接收分集或多信道特性,网络节点可以平滑信道的波动,使得提供一个能够进行有效功率控制的、可靠的比特率信道成为可能.因此,利用 MIMO 技术,依据实际业务需求,设计跨层协议,有效利用 MIMO 技术物理层的信息动态改变高层协议的参数,可以提高多跳无线网络的实时性,满足支持特定 QoS 的实时业务需求.

(5) MIMO 技术对多跳无线网络能量效率的影响[19]

在无线多跳网络中,有限的能量供给是一个重要的问题,尤其是多跳无线 Ad Hoc 网络.降低传输功耗可以延长节点的寿命,并减少对其他节点的同道干扰.然而,减少传输功耗将导致源节点和目的节点之间跳数的增加,这意味着中继会消耗更多的能量.因此,不能只简单依靠减小传输功率来节省能量的总消耗量,以提高能量效率.MIMO 技术通过在空域使用波束赋形和分集技术,为多跳无线网络提供了一种有效聚集和使用能量的途径.利用 MIMO 技术,通过将能量效率指标与 MAC 层或网络层的设计联合考虑设计跨层协议,可以有效地提高多跳无线网络的能量效率.

(6) MIMO 技术对多跳无线网络 QoS 的影响[20]

随着多跳无线网络业务范围的扩大,越来越多的业务要求网络具有良好的 QoS 支持.相对于 SISO 系统,利用 MIMO 技术的 MIMO 系统能够保证更好的 QoS 支持,但是,MIMO 技术在物理层,而 QoS 相关的技术都在 MAC 层或更高层,如果 MAC 层不能有效地管理空闲资源,那么就不可能在网络内部提供良好的 QoS 支持.因此,需要考虑跨层优化问题.文献[20]分析了如何在 MIMO 系统中通过平衡分集增益和空间复用增益在不降低数据速率的条件下提高链路质量的方法,并提出一种在高信噪比环境下通过设置 MIMO 网络的输入速率,在链路之间实施最大最小分集增益以提供最优化链路差错率的策略,从而在链路可靠性方面获得接近最优的 QoS.通过 NS2 仿真,验证了该方案的有效性.文献[20]所采用的方法即是物理层与链路层联合的跨层优化方案.基于以上分析,在 MIMO 多跳无线网络中,通过将物理层特定因素与 MAC 层及更高层联合,进行跨层协议设计,是增强 QoS 的一种有效途径.

研究表明[21−23],为节点配有 M 个天线的 MIMO 系统并不意味着其网络容量能够提高 M 倍,MIMO 系统潜在的网络容量增益还取决于物理层、链路层和网络层的协调机制,因而,跨层优化不仅是有利的,而且是必要的.目前大多数基于 MIMO 的多跳无线网络的研究也正是基于跨层协议设计思想对系统进行设计与优化,以提高其整体性能.表 1 列举了近年来多跳无线网络,包括无线 Mesh 网络(WMNs)、无线 Ad Hoc 网络和无线传感器网络(WSNs)中的部分较为典型的基于 MIMO 技术的协议与算法.

Table 1 Protocols and algorithms for MIMO-based multi-hop wireless networks

表 1 基于 MIMO 的多跳无线网络协议与算法

<table>
<tr><td colspan="7">MAC layer protocols</td><td>Routing protocols</td><td colspan="4">Cross-Layer protocols and algorithms</td></tr>
<tr><td colspan="7">DCA (2000)</td><td></td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="7">MCSMA (2001)</td><td></td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="7">ICSMA (2003)</td><td></td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>SCMA (2004)</td><td colspan="2">NULL-HOC (2004)</td><td colspan="2">MUP (2004)</td><td colspan="2">PCAM (2004)</td><td>MR-LQSR (2004)</td><td colspan="4">Raniwala, et al. (2004)</td></tr>
<tr><td>MIMA-MAC (2005)</td><td>SPACE-MAC (2005)</td><td>BSCA (2005)</td><td>PDCA (2005)</td><td colspan="2">2P-TDMA (2005)</td><td>CLICA (2005)</td><td>LIBRA (2005)</td><td>Alicherry, et al. (2005)</td><td>Kyasanur, et al. (2005)</td><td colspan="2">Zhang, et al. (2005)</td></tr>
<tr><td colspan="3">DSMA (2006)</td><td colspan="4">HMCP (2006)</td><td></td><td colspan="2">Chen, et al (2006)</td><td colspan="2">Lin, et al (2006)</td></tr>
<tr><td colspan="7">HMCMP (2007)</td><td></td><td>Rasool, et al. (2007)</td><td>CRPBA (2007)</td><td>CMS (2007)</td><td>Chen, et al. (2007)</td></tr>
<tr><td colspan="7"></td><td></td><td>Liu, et al. (2008)</td><td>Hou, et al. (2008)</td><td>(CAEA, TSLS) (2008)</td><td>Casari, et al. (2008)</td></tr>
</table>

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

2 典型的基于 MIMO 的多跳无线网络协议与算法

目前,对于多跳无线网络,基于单频单信道的研究最多也最成熟,基于单频多信道的研究也在最近几年取得了较多研究成果,但基于多频多信道的 MIMO 多跳无线网络的研究成果并不多,尤其是实用化的成果更是寥寥无几.基于使用 MIMO 技术的方式和 MIMO 技术对网络架构设计的影响可将现有的基于 MIMO 的多跳无线网络协议与算法进行如下分类[6,7,16,24,25]:

(1) 集中式算法与分布式算法.这是一种根据拓扑结构的不同所进行的分类方法.在集中式算法中,节点的地位并不平等,是一种有中心的控制方法;分布式算法中,节点之间的地位是对等的,采用的是分布式控制方法.

(2) 在线算法与离线算法.在线算法(online algorithm)并不需要先前的网络输入业务强度(offered load)信息,并能自适应网络拓扑和输入业务强度的改变;反之,则为离线算法(offline algorithm).在目前的研究成果中,离线式算法居多.

(3) 闭环 MIMO 与开环 MIMO.根据发送器是否使用信道状态信息(channel state information,简称 CSI)可以将 MIMO 系统分为开环 MIMO(open-loop MIMO,简称 OL-MIMO)和闭环 MIMO(closed-loop MIMO,简称 CL-MIMO:),即:如果发送器使用 CSI,则 MIMO 系统为闭环 MIMO;如果发送器不使用 CSI,则该 MIMO 系统为开环 MIMO.

(4) 根据网络节点使用的信道数与接口数的比例,可将其分为两大类:基于信道数与接口数相等条件下开发的协议与算法以及基于信道数多于接口数条件下开发的协议与算法.前者的信道数与接口数相等,每个接口使用一个固定的专用信道,无需进行信道切换等操作;后者的接口数少于信道数,具有更加丰富的信道资源,需要进行信道切换,设计更加灵活,也更加富于挑战性.

分类(4)是 MIMO 系统特有的问题,也是开发各种基于 MIMO 的多跳无线网络协议的基本出发点之一,基于分类中的两种情况所需要考虑的因素也有很大区别.因此,本文根据分类(4)详细介绍一些典型的协议与算法,并对各种协议与算法的优缺点进行深入分析.

2.1 基于信道数与接口数相等的协议与算法

(1) DSMA(distributed scheduling for mimo ad hoc networks)[24]

典型的随机射频接入标准,如 IEEE802.11 DCF MAC,是一种完全的非协调方式,而文献[26]针对基于 MIMO 的 Ad Hoc 网络提出了一种新的分布式射频接入方案 DSMA,旨在实现邻居节点之间的协调,从而:i) 实现策略的完全分布化;ii) 即使在重负载情况下节点仍不会尝试同时接入信道;iii) 节点的发送角色与接收角色是轮换式的,这种方式使得节点不会持续获得发送的特权.再者,整个网络的组织是跨层方式的,即:物理层与媒质接入控制层(MAC 层)交换命令和信息,以提高解码过程的性能.DSMA 的基本出发点是实现在下一帧中利用接收方控制其他节点,以保证目的节点处于真正监听并准备作为一个接收节点进行操作的状态.在 DSMA 中,主要的特性集中于 ACKs 的设计中,接收节点在构造 ACK 之前,以概率 P_{reserve} 扫描积压任务队列(backlog queue),选取一个或多个目的节点分组头(最大深度为 $d_{\max}$),并在 ACK 中嵌入一个保留项(reservation)以指向这些目的节点.如果一些节点接收到 ACKs 并且意识到它们是保留的目的节点(reserved destination),则在下一帧中抑制发送.其中,ACKs 仅仅保留发送节点或空闲节点(idle node).并且,预订节点(reserving node)在本帧中是接收方,但将切换成发送方在下一帧中发送数据分组,而空闲节点以概率 P_{TX} 决定在下一帧中作为发送方,当空闲节点选择作为被发送的对象时,它们将作为保留节点(reserved node)并不会发送任何数据给接收方.因此,空闲节点很好地利用了 ACKs 中的信息.DSMA 的优点在于,它在物理层使用分层的空间多用户检测技术(layered space-time multi-user detector,简称 LAST-MUD)估算发送天线和接收天线之间的信道增益,通过利用 MIMO 的 SM(spatial multiplexing,空间分集)特性,以分布式方式管理发送方和接收方,从而提高基于 MIMO 的 Ad Hoc 网络的性能,并且无需引入任何新的开销,因为待发送的控制报文中的保留信息是加载式的.通过与指数退避策略比较,其仿真结果显示,DSMA 在调整好参数的情况下,能够获得更高的吞吐量和可靠性,表现出更好的性能.但是,DSMA 的性能与 P_{reserve} 和 P_{TX} 的选择有很大关系,在某些复杂情况下难以确定.

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

(2) NULLHOC[27]和 SPACE-MAC[28]

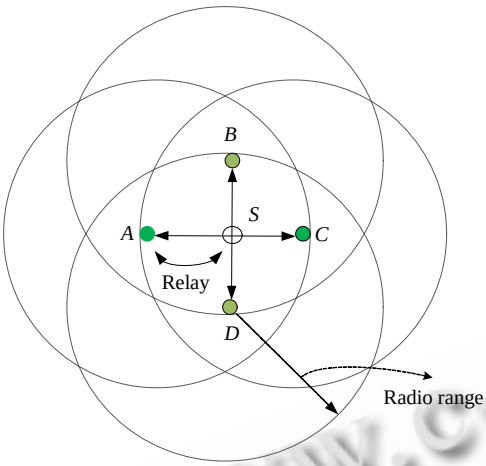

Fig.1 Topology where SPACE-MAC enables spatial reuse

图 1 SPACE-MAC 能进行的空间复用拓扑结构

文献[27]中提出了一种基于 MIMO 的 NULLHOC 协议,支持控制信息交换.该协议需要获知发送方和接收方以及两者的邻居的信道系数,以此系数设计所需的发送和接收波束权重.其关键特性是将链路层带宽分成两个分离的子信道分别用于控制信息和数据信息的传输,但这种方法将限制链路层带宽.文献[28]则针对 Ad Hoc 网络提出了一种基于多智能天线的完全分布式跨层 MAC 协议:SPACE-MAC 协议,它使用的设计方法与 NULLHOC 协议不同,不仅避免了信道分离,而且达到了相似的目标.SPACE-MAC 协议通过在节点对之间选择性的零陷信号以防止潜在的干扰传输所引起的冲突.SPACE-MAC 协议利用发送端和接收端的信道状态信息(CSI)为每个数据分组调整天线权重,从而实现了完全的分布式方式.SPACE-MAC 协议通过利用物理层的特性和跨层协议设计技术使其能够在多径散射环境中实现空间复用,同时,与基于零陷技术的智能天线 MAC 协议不同,SPACE-MAC 协议将天线赋予不同的权重,并设计天线权重选择机制,实现了源信号的区分,因而,SPACE-MAC 协议并不要求一个专用信道用于交换 CSI 便可以实现空间复用,并且拥有更高的信道利用率.与传统的 802.11 DCF MAC 相比,SPCE-MAC 的主要优势在于,它允许同一冲突域中的多个数据流同时传输,如图 1 所示,在单一冲突域内,SPACE-MAC 允许节点 *A* 发送数据分组给节点 *C* 的同时,节点 *B* 可发送数据分组给节点 *D*,因此,提高了网络的整体容量.但是,SPACE-MAC 需要引入新的信道控制开销以完成信道估计和波束协调,这一特点也使得该协议无法在实际应用时达到预期的吞吐量.

(3) SCMA(stream-controlled medium access)[24]

文献[24]为基于 MIMO 的 Ad Hoc 网络提出了一种分布式流控媒质接入协议 SCMA.该文献使用 OL-MIMO 方式进行控制分组的交换,但使用 CL-MIMO 方式传输数据分组.以此为出发点,该文献首先开发了一种集中式的 SCMA 算法,为分布式算法提供基础,该集中式算法具有以下几个关键点:标识瓶颈链路(记为红色链路);以无流控方式调度瓶颈链路;以纯流控方式调度非瓶颈链路(记为白色链路).分布式的 SCMA 算法是集中式 SCMA 算法的优化,它仅利用网络的本地信息而无需任何大规模的协调机制.与集中式 SCMA 算法相比,分布式 SCMA 优化了如下几个方面:i) 链路必须标识是否它们属于多冲突区域,据此以分布式方式着色它们本身;ii) 由于白色链路与红色链路的信道接入机制不同,白色链路的固有参数应用作适当的调整以确保一定的公平性;iii) 对于能够进行流控的白色链路,在冲突域内,以分布式方式为白色链路发送节点估计流的公平共享程度非常关键.SCMA 与 CSMA/CA 相比有更好的性能,但其退避域中并没有引入冲突解决机制,还有待进一步完善.

(4) MIMA-MAC[29]

虽然 802.11 MAC 协议的设计用来处理隐藏终端问题,但并没有很完美地解决这个问题,同时,802.11 MAC 限制了网络资源利用率.为了处理未解决的隐藏终端问题,并增加网络利用率,文献[29]将 MIMO 物理层空间复用(SM)技术与 MAC 协议结合,提出了一种新的 MAC 协议 MIMA-MAC(mitigating interference using multiple antennas-medium access control).该协议利用物理层的多天线机制减轻来自邻节点的干扰,从而能在同一冲突域内进行并行数据传输.MIMA-MAC 的基本思想是:假设发送节点有 M_t 个发送天线(M_t 为偶数)和 $M_r(>M_t)$个接收天线,在 MIMA-MAC 协议中,发送器使用 $M_t/2$ 个发送天线发送数据,接收器则使用全部 M_r 个接收天线.假设信道矩阵满列秩并且使用文献[30]中提出的干扰减轻算法,接收器便能区分 $M_t(=M_t/2+M_t/2)$个独立的数据流——来自于两个独立的发送器的并行数据流.如图 2 所示,当 $M_t=M_r=2$ 时,发送器,即:节点 0,仅使用一个天线用于数

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

据传输 $DATA_{0\to1}$,接收器节点 1 使用两个天线用于数据接收.由于节点 1 可利用干扰减轻算法接收并分离最多两个独立的数据流,相邻发送器(节点 2)能使用两个发送天线之一传输数据流 $DATA_{2\to3}$ 到目的节点 3,而并不会干扰节点 1.除非数据流是从节点 2 到节点 1,由于干扰的原因,节点 1 并不会成功解码数据流,而仅仅是丢弃它.因此,相邻的数据流 $DATA_{0\to1}$ 和 $DATA_{2\to3}$ 可在网络中无干扰共存.图 3 描述了 $M_t=M_r=2$ 时 MIMA-MAC 协议的基本帧结构.从图中可以看出,协议将时间分成固定大小的帧,每帧包括一个协商周期(negotiation period)和一个无冲突周期(contention-free period).在协商周期,待发送数据的发送器相互争用信道的使用权,协商周期包括两个争用时隙.在无冲突周期,获取信道使用权的发送器发送数据给目的接收器,无冲突周期包括两个训练序列(training-sequence)时隙、一个数据时隙和两个应答时隙(acknowledgement slots).再者,通过增加激活的发送器数量,能够进一步提高网络容量.

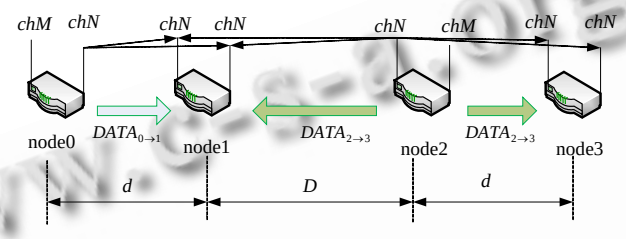

Fig.2 Basic idea of the MIMA-MAC protocols ($M_t=M_r=2$)

图 2 MIMA-MAC 协议基本思想($M_t=M_r=2$)

在文献[24]中,Sundaresan 等人已经利用 MIMO 链路可减轻干扰的能力开发了 SCMA 协议.然而,SCMA 协议必须通过交换一跳和两跳邻居之间的控制分组共享大量的信息,MIMA-MAC 则不需要如此.文献[29]在非关联 Rayleigh 衰落信道上从理论上推导了 MIMA-MAC 系统的容量,并与 802.11 比较.通过度量给定网络配置的各态历经容量,MIMA-MAC 系统比 802.11 表现出更好的性能,原因在于,MIMA-MAC 增加了主动发送(同时传输)的数量,从而增加了网络的利用率,最终增加了网络的吞吐量.但是,MIMA-MAC 协议在发送方发送数据时仅使用了一半数量的天线,因而资源利用率还有待进一步提高.

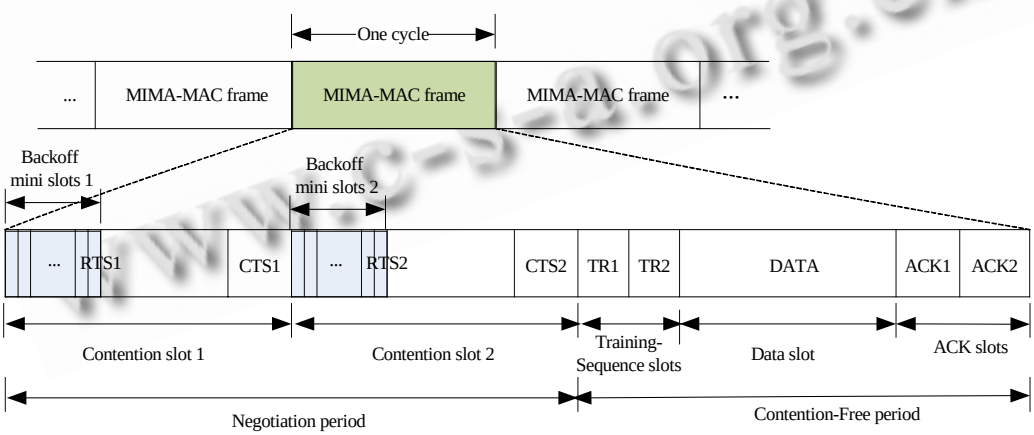

Fig.3 Frame structure of the MIMA-MAC protocol ($M_t=M_r=2$)

图 3 MIMA-MAC 协议帧结构($M_t=M_r=2$)

(5) ICSMA(interleaved carrier sense multiple access)[31]

ICSMA 是一种新的针对无线 Ad Hoc 网络设计的多信道 MAC 协议,主要用于解决暴露终端问题.ICSMA 是一个两信道的系统,与 CSMA/CA 的 RTS-CTS-DATA-ACK 的数据分组交换机制类似,但握手步骤在两个信道中交错进行.例如:如果发送端在信道 1 传送 RTS(request to send)且接收端愿意接受这个请求,它就在信道 2 上

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

发送响应 CTS(clear to send).如果发送端接收到 CTS 数据分组,它就开始在信道 1 上发送 DATA 数据分组.此外,如果数据在接收端被成功接收,则在信道 2 回应 ACK 数据分组.为了降低冲突,ICSMA 协议修改了 IEEE 802.11 DCF 机制中的 NAV(network allocation vector),扩展为 E-NAV(extended net work allocation vector).E-NAV 向量包括两个链路数据块列表,即:SEList 和 REList.每个数据块包含一个起始时间和一个结束时间.SEList 指示某节点是否将会在将来的某一时刻成为发送方暴露节点,REList 则用于指示某节点是否会在将来某一时刻成为接收方暴露节点.当接收到 RTS 或 CTS 分组时,两个列表将得以更新.该协议通过减轻暴露终端问题来提高性能,该协议性能提升的主要原因有两个:i) 如果一个节点在信道 1 收到 RTS,而在信道 2 没有收到 CTS,它就能知道发送端的暴露状态.因此,如果要使用 RTS 分组开始一个新的会话,则使用信道 2 来传送 RTS 分组;ii) 如果一个节点在任何一个信道监听到 CTS 分组(如信道 1),而在信道 2 上没有监听到 CTS,它就知道这是一个接收暴露节点.因此,这个节点就可以在信道 1 上发起一个新的 RTS-CTS 会话.故而,在不同的信道上交错传送数据分组可以提高节点的吞吐量.然而,ICSMA 协议只能用于双信道,可扩展性不强,很难应用于实际系统.

(6) MUP(multi-radio unification protocol)[32]

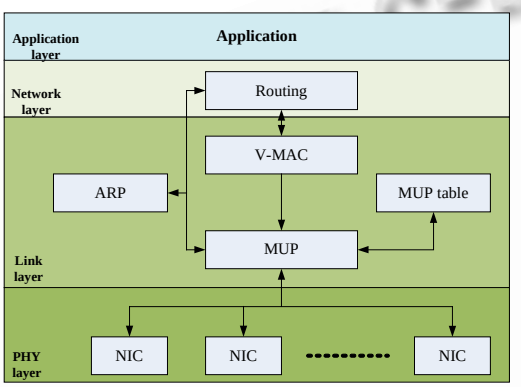

Fig.4 MUP architecture diagram
图 4 MUP 架构图

MUP 是一个在 WMN(wireless mesh networks)背景下开发的链路层协议,通过一个虚拟的层控制多射频接口来最优化地使用本地频谱.MUP 的频谱有效管理的主要设计目标是:最小化硬件的改动;避免改动高层协议;可以与遗留的非 MUP 节点共同工作;不依赖于全局拓扑信息.MUP 通过提供结构化的解决方案为高层提供一个简单的虚拟接口,多物理接口、在节点间选择合适的信道进行通信这些特性都会被隐藏.MUP 应用在链路层,网络层和更高层无需任何改动就能有效使用多个射频接口.MUP 的结构如图 4 所示.MUP 层最主要的任务是监控节点与其相邻节点的信道质量.这样,在节点需要与某个邻节点通信时就能选择最好的信道.为了给多个射频接口虚拟不同的 MAC 地址,MUP 使用一个虚拟的 MAC 地址,有效地隐藏了多个物理地址,在高层看来,物理层只有一个单一的地址.在有数据分组要传送给邻节点时,选用哪个信道进行传送的复杂过程由 MUP 来完成.MUP 包括两个主要模块:邻节点模块和信道选择模块.邻节点模块维护邻节点表并为邻节点分类,信道选择模块决定与相邻节点通信时选择哪个信道.MUP 的优点包括:它能与不支持 MUP 的单射频传统节点和多射频节点同时工作;高层协议不参与处理多个射频接口的复杂过程;提高了频谱利用率和系统吞吐量.MUP 也有其缺点:信道分配机制不精确,导致不能最好地使用可用的正交信道;MUP 的探测包需要支持优先级队列机制,不适用于基于 IEEE 802.11a/b/g 等流行的 MAC 机制的多跳无线网络;MUP 进行信道选择是一个局部动作,这与考虑全局资源使用相比是一个次优的方案.

2.2 基于信道数多于接口数的协议与算法

(1) DCA(dynamic channel assignment)[33]和 MCSMA(multi-channel carrier sense multiple access)[34]

文献[33]在 MANET 应用场景中开发了一种基于需求(on-demand)的多信道分配算法 DCA.在 DCA 中,总带宽分成一个控制信道和 n 个相同带宽的数据信道,控制信道用于解决数据信道的冲突问题,并为移动主机分配数据信道,数据信道用于传输数据分组和 ACKs.假设每个节点配置了两个半双工收发器,一个用于控制信道,另外一个能够在不同信道之间切换.为了进行信道选择和传送数据分组,配置了一个 5 次握手过程.所有的节点都保留两个数据结构,一个信道使用列表(channel usage list,简称 CUL)和一个空闲信道列表(free channel list,简称 FCL),用来跟踪正在使用的和空闲的数据信道.邻节点的控制消息携带有信道使用信息,节点监听该消息来建立自己的 CUL.在进行载波感知和回退后,发送端发送一个带有空闲信道列表的 RTS 消息.接收端接收到 RTS 消

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

息后,查看在它的无线范围之内发送端 FCL 的哪个信道可用.然后,接收端回送一个指示信道使用的 CTS 消息.在发送数据分组之前,发送端送出一个定制(reservation,简称 RES)包,将预定的数据信道告知它的邻节点.RTS,CTS 和 RES 消息通过控制信息发送,而数据分组和 ACK 分组通过数据信道发送.DCA 的优点在于,使用多信道可以减少数据信道的冲突,同时,控制信道和数据信道的分离减弱了隐藏终端问题.但是,DCA 算法中使用了专用控制信道,导致信道利用率低,同时,其对信道数有限制,即:信道数不能多于 $L_d/3L_c$,这里,L_c 表示控制包(CTS+RTS+RES)的长度,L_d 表示数据分组的长度,并且,在控制信道上需要进行 5 次握手,成为信道利用率的瓶颈.

文献[34]提出了一种用于多跳无线网络的多信道 MAC 协议 MCSMA MAC 协议.MCSMA MAC 使用基于接收端的信道选择(receiver-based channel selection,简称 RBCS)机制,其信道选择过程与 DCA 相似.在这种媒体访问方案中,可用带宽被分为非重叠的 n+1 个信道,其中包括 n 个数据信道和 1 个控制信道.信道的划分与系统中节点的数目无关.有数据分组要传送的节点选择合适的数据信道进行数据传送.当节点空闲时,即没有要传送的数据分组,它就会监听所有的 n 个数据信道,得到所有信道的接收信号强度总量(total received signal strength,简称 TRSS),这个值由信道所有的多径信号相加得到,若其低于一个感知门限(sensing threshold,简称 ST),就被标记为空闲信道.当一个信道空闲了足够长的时间后,就会被加入到可用信道列表.MCSMA 机制减轻了暴露终端问题,且允许等待广播区域的会话同时进行数据分组传输,从而能够极大地提高系统吞吐量.MCSMA MAC 在静态网络中表现良好,但在高密度移动网络中,由于多信道中较大的数据传输时间,该算法在时延性能上有所下降.

(2) PCAM(primary channel assignment based MAC)[35]

PCAM 协议是一种基于主信道分配的多信道 MAC 协议,以解决控制信道饱和的约束、复杂的时间同步问题,并提高带宽利用率.该协议基于 DCF (distributed coordination function)机制,但是要求有 3 个射频天线的多信道 MAC 协议,在 Ad Hoc 网络中具有良好的性能表现.在 PCAM 协议中,每个节点配置 3 个半双工收发器.其中主收发器和第 2 收发器用来传输数据,第 3 收发器用来发送和接收广播消息.在特殊情况下,第 3 收发器也可用来传输数据.第 2 个收发器主要用作发送数据,其信道分配是不固定的.在这种方案中,第 3 个收发器主要用来实现广播数据的收发.系统分配公共信道,所有的第 3 个收发器都使用这个信道.图 5 描述了一种可能的通信场景,信道 1 被作为广播信道.当两个节点有不同的主信道(P_{ch})分配方式(如图 5(a)所示)时,发送节点将切换它的第 2 接口到接收节点的主接口信道上,从而利用第 2 接口与接收节点的主接口进行通信;当两个节点拥有相同的主信道(如图 5(b)所示)时,节点将使用两者的主信道进行通信,然而,此时第 2 接口不能与主接口使用相同的信道,以防止接收主信道受到干扰.如图 5(c)所示,接收节点使用广播信道(信道 1)作为主信道,在这种情况下,接收节点的第 3 接口不可用,发送节点的第 3 接口用于与接收方主信道(P_{ch})通信.并且,由于主信道是预先分配好的,PCAM 协议并不需要任何专用控制信道以动态协商信道.这种机制可以实现数据信号与控制信号的分离,并且路由信息比数据优先级要高.该方案广播数据支持性较好,路由发现、路由维护等信息能够较好地传送.节点通过广播信息发送路由信息,能够避免隐藏终端的发生,减小网络时延,为信息最差的情况和最低要求进行保守设计.PCAM 的优点在于,不需要专用控制信道以及复杂的同步机制.但缺点也很明显,它需要进行频繁的信道切换,节点要在一个公共广播信道上守候,而且其需要的天线过多.如果采用收发器,则仅用 2 个天线即可,可降低成本,且该协议并没用充分利用 3 个天线的优势,信道利用率并不高.

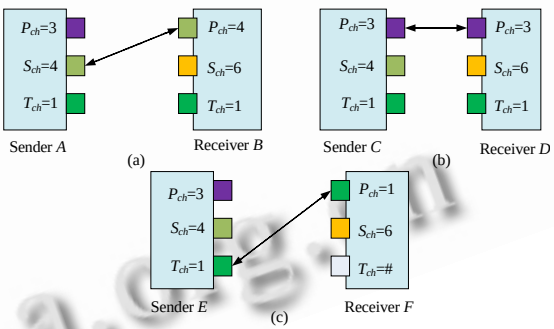

Fig.5 Channel assignment

图 5 信道分配

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

(3) CLICA(connected low interference channel assignment)[18]

文献[18]针对基于 IEEE 802.11 的多射频 Mesh 网络提出了一种新的贪婪的启发式信道分配算法 CLICA,用于将信道分配到射频接口.在 CLICA 中,将信道分配当作连通性约束条件下的拓扑控制优化问题,并利用图着色理论来处理此问题,将颜色与信道关联起来.CLICA 的核心思想是将灵活度作为确定待着色次序的向导.具体地,每个节点都与一个优先级关联,着色决定(coloring decisions)依据此优先级逐个节点进行.节点 i 的着色决定集包括为节点 i 以及其邻节点的射频接口选择颜色(即:信道),以便为连接图中的所有链路着色.CLICA 算法的特性是在执行期间能够变换节点的优先级,即:CLICA 是一种自适应优先级算法,利用这一算法能够发现可连接的、低干扰的拓扑结构.但此算法的假设比较理想化,若将其思想用于实际应用还需开发可调整的、动态的信道分配算法,还存在许多有待考虑的因素.

(4) CRPBA(cross-layer optimization on multi-hop/multi-path routing, power control, power allocation, and bandwidth allocation)[36]

在基于 FDMA(frequency division multiple access) MIMO 的 WMN 环境中,链路操作于正交信道.文献[36]针对这种 WMN 环境,研究了跨层优化的问题,联合网络层的多跳/多径路由、功率控制与分配和链路层的带宽分配开发了一种分布式算法 CRPBA.在 CRPBA 中,网络层变量与链路层变量通过链路容量约束绑定在一起,从而利用 Lagrangian 双重分解来解决 CRPBA 的有效性问题.文献[36]的主要贡献在于:开发了一种理论方案以解决 CRPBA 问题;针对可变链路层子问题,开发了一种严格的梯度设计方法;提出割平面法,不仅能解决 Lagrangian 双重性,还能较容易地恢复最佳可行性方案.仿真结果显示,该算法在 WMN 中具有很好的性能表现,但该算法要求发送方完全掌握信道状态信息.

(5) MR-LQSR(multi-radio link-quality source routing)[17]

文献[17]针对静态节点的基于 MIMO 的多跳无线网络(如:多射频 WMN)提出了一种新的路由判据 WCETT,并将此判据引入路由协议,开发了一种新的多射频链路质量源路由协议 MR-LQSR.MR-LQSR 是 DSR(dynamic source routing)协议的扩展.MR-LQSR 的主要贡献是使用新的判据 WCETT.WCETT 试图在多射频 WMN 环境中避免选择最短路由.MR-LQSR 协议中的主要模块有:邻居发现模块、链路权重分配模块、链路权重信息传播模块;路径发现模块.其中,邻居发现模块和链路权重信息传播模块与 DSR 协议类似,而链路权重分配模块和路径发现模块与 DSR 不同.由于 DSR 给所有链路分配相同的权重,MR-LQSR 使用更好的办法分配权重来提高性能.MR-LQSR 分配的链路权重与通过该链路成功传输一个数据分组的期望传输次数成比例.这个期望传输次数本质上由链路数据速率和丢包率决定.此外,DSR 使用基于加成的跳数的路由判据来获得 1 跳最短的路径,MR-LQSR 使用 WCETT 作为路由判据.WCETT 路由判据的主要设计原理是获得一个链路代价的判据,反映出以下特性:链路的丢包率和带宽;非负的链路代价;同道干扰的考虑.1 跳路径的 WCETT 路由判据可以根据以下公式来计算:

$$WCETT=(1-\alpha)\times\sum_{i=1}^{L}ETT_i+\alpha\times\max_{1\le ji\le k}X_j \tag{1}$$

这里,ETT_i 是长度为 L 的路径中链路 i 的期望传输时间,α是 0~1 之间的可调参数,X_j 是给定信道 j 上的传输时间之和.式(1)主要有两部分:第 1 部分是路径中的各个链路 ETT 之和,反映端到端延时因子;第 2 部分是信道差异因子,使用这个因子可降低一条路径中选用负载过重的信道的概率.其 X_j 的值由以下公式计算:

$$X_j=\forall_{1\le j\le k}\sum_{j,i\in L}ETT_i \tag{2}$$

这里,k 是系统中信道的数量,L 是路径长度.一般来说,路径带宽的瓶颈上限是带宽最低的链路.信道差异因子能够降低选择有瓶颈链路路径的可能性.可调因子α给减少端到端延时的因子和减少瓶颈链路的第 2 个因子之间提供一个平衡.

MR-LQSR 的主要优点是,与其他多射频路由判据相比可提升吞吐量性能.这个吞吐量的优势来自于 MR-LQSR 考虑备选路径的端到端延时和路径吞吐量之间的平衡.文献[17]通过仿真结果显示,WCETT 比 ETX (expected transmission count)路由判据性能提高了 89%,比最短路径路由提高了 254%.MR-LQSR 的一个明显的

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

缺点是,它没有考虑相邻链路的信道干扰,此外,在单个节点使用多射频会消耗额外的功率,在移动 WMN 中路由判据要考虑能量使用的有效性.因此,MR-LQSR 在有限移动性的 WMN 中性能并不好.同时,WCETT 可能会导致在网络中形成环路.虽然在按需路由协议中不会形成环路,但当使用距离矢量路由协议时,将会在某些情况下形成环路.

(6) HMCP(hybrid multi-channel protocol)[37]和 HMCMP(hybrid multi-channel MAC protocol)[38]

在文献[37]中,Kyasanur 等人针对 Ad Hoc 网络提出了一种路由与链路层结合的多信道协议 HMCP.在 HMCP 中,每个节点配备两个半双工收发器接口.一个接口称为固定接口,另一个称为可切换接口.固定接口被分配了一个静态固定信道.它在一个较长的时间周期内处于一个固定信道,以确保欲与邻居节点通信的节点能切换到其邻居节点的固定信道,从而与其邻居节点的固定接口通信;可切换接口可在除固定信道以外的多个可切换信道之间动态切换.在 HMCP 中,由于固定接口的存在,用作协商公共信息的通信开销不再需要,并且,每个节点从广播消息中收集其邻居节点的固定信道信息,因此,HMCP 并不需要一个分离的控制信道或时序同步策略.由于存在信道切换问题,HMCP 协议为每个主机配备的每个信道都设计一个队列,队列中的数据分组在相应信道中发送,以此方法来降低接口切换的延时开销.HMCP 协议具有良好的性能,但存在两个主要的缺陷:第一,每个信道在传输周期内是固定的,但流量负载是随时间动态变化的;第二,等待时间过长降低了可切换接口的利用率.文献[38]针对 WMN 提出了一种改进的 HMCP 协议,即:分层多信道 MAC 协议 HMCMP.该协议使用动态 DST(dynamic staying time)分配策略以动态地根据流量负载的变化调整发送时间,并开发了一种动态等待时间分配方案,以提高接口和信道的利用率.文献[38]的仿真比较结果显示,HMCMP 协议在吞吐量和平均端到端延时指标上稍优于 HMCP,但该协议的动态控制策略还有待进一步提高.

(7) BSCA(balanced static channel assignment)和 PDCA(packing dynamic channel assignment)[12]

文献[12]针对 WMN 提出了两种链路级信道分配算法:BSCA 和 PDCA.BSCA 是一种静态链路信道分配算法,而 PDCA 将链路信道分配和调度同时进行,是一种动态信道分配算法.BSCA 的主要思想是保证任何一个信道都不会受约束集的限制.在 BSCA 中,假定每个链路分配到一个信道,并且在不同的时隙不会进行信道切换.但在动态链路信道分配中,假定每个链路在每个 Td 时隙($Td>1$)具有切换一次信道的能力.PDCA 的主要思想是,在每个时间周期以贪婪的方式封装数据流.文献[12]通过仿真验证了 PDCA 接近最优,但 BSCA 也有较好的表现,都较大程度地提高了网络容量.但是,以上两种算法均是基于信道切换开销可忽略的假设,实际应用中这种假设一般不成立,因此,该算法在实际应用时,其性能将无法达到预期效果.

3 MIMO 技术对多跳无线网络拓扑控制、MAC 层和网络层的影响分析

MIMO 技术作为一种新的物理层技术,引入了空间自由度,能够实现空间多路复用、干扰抑制、空间分集等技术,以提高链路容量和质量,将其应用于多跳无线网络可改变多跳无线网络的底层通信环境,带来许多新的特性以及更多的可用链路参数,因而,对多跳无线网络的多个协议层都会产生重大影响,如:物理层的链路质量,MAC 层的带宽和空间复用度、信道资源的分配与调度,网络层的拓扑结构,传输层的拥塞控制,等等.MIMO 技术对网络的拓扑结构、信道分配与调度方法、MAC 协议与路由协议的影响尤为显著.

在多跳无线网络中,拓扑控制是指网络拓扑随着一个或多个参数变化而变化,这些参数包括节点的移动性、位置、发射功率、天线方向、网络接口状态等,有效的拓扑结构改善机制包括功率控制、节点分簇和信道分配[6].网络拓扑结构的控制和优化具有重要意义,对于延长网络的生存时间、减小通信干扰、提高 MAC 协议和路由协议的效率等具有重要意义[39],尤其是拓扑控制中的功率控制问题,对网络性能有着直接影响[40].MIMO 技术使用的多天线机制使得拓扑控制更加灵活,但也更加复杂.MIMO 技术引入了多天线多信道机制,并且,每个天线接口可拥有多个信道,因此,如何为接口分配信道以及如何进行信道切换等问题都将变得更为复杂,而这些问题的处理将直接影响网络的拓扑结构.多信道机制使得多跳无线网络能够在一个密集区域内共存多种拓扑结构,而具有信道切换能力的多个天线则为拓扑结构的动态管理提供了一种有效的途径.文献[18]将多频多信道中的信道分配问题作为一个拓扑控制问题来处理,并利用着色理论解决了信道分配问题,开发了一个低干扰

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

的信道分配算法 CLICA,获得了良好的性能.

MIMO 对 MAC 层的影响主要是引入了多信道机制,但比单射频多信道情况更为复杂,它不但要求 MAC 层能够有效管理信道,而且能够高效利用接口资源.DCA 和 MCSMA 协议利用多天线将控制信道与数据信道分离,分别用不同的接口进行控制信息和数据信息的传输,不但减轻了隐藏终端问题,而且极大地提高了网络容量.DSMA 协议利用 MIMO 技术的多天线优势协调邻居节点,实现了更高的网络吞吐量和可靠性.MIMA-MAC 协议利用多天线机制减轻来自邻节点的干扰,从而在同一冲突域内实现并行数据传输.除了以上单独在 MAC 层利用 MIMO 技术进行优化的协议以外,还有一部分 MAC 协议,如 HMCP,MR-LQSR 协议等,它们充分利用 MIMO 技术的多天线多信道优势,在设计 MAC 协议时考虑对路由协议的支持以及其他因素的影响,设计出了更高效的跨层 MAC 协议,这种方法也将是一种重要的途径和趋势.

在引入 MIMO 技术后,底层环境发生了革命性的变化,网络层的路由协议设计也因此出现新的方向和挑战.为了适应并更好地利用多天线环境,需要设计新的路由判据.传统的最短路径判据在 MIMO 环境中无法取得良好的表现.新的判据应充分考虑 MIMO 技术所带来的复杂的、动态的拓扑结构和更优的链路质量参数,并将多天线干扰以及流间干扰等各种因素纳入考虑范围.文献[17]提出的 WCETT 判据考虑了链路质量、信道变化和最小跳数,在时延和吞吐量之间达到了很好的平衡,并在其开发的 MR-LQSR 路由协议中应用此判据,获得极大的性能提升.而在 HMCP 协议中使用了多信道路由判据(MCR 判据),MCR 判据改进了 WCETT,考虑了多信道环境中的信道切换问题,将信道切换代价作为指标之一,在多信道环境中获得了更好的性能.因此,设计新的、更高效的路由判据是路由协议设计的关键因素.

4 MIMO 技术对多跳无线网络架构设计的影响分析

MIMO 技术对多跳无线网络的影响不仅表现在各独立层,还对多跳无线网络的整体架构设计提出了挑战.要运用 MIMO 技术使多跳无线网络性能得到实质性的提高,不仅要求开发合适的网络协议,还需要重新仔细考虑相关的网络体系结构问题.由于 MIMO 技术增加了空间自由度,需要考虑的问题更加复杂,要求各层彼此透明的独立层设计已经无法得到最优化的解决方案,因而需要设计新的体系结构.在基于 MIMO 的多跳无线网络中,高层协议可能受物理层信道的直接影响,因此,为了更进一步提高其性能,MAC 层、网络层和传输层协议需要与物理层一同协调工作,从而充分利用物理层的信息,并优化多端空时调度.MAC 层、网络层和传输层也需要相互协调.因此,不同层之间的跨层协议设计成为一种必需的策略.

目前,跨层协议设计有两种途径[1]:第一,通过考虑其他层的参数提高某一层的性能,通常是高层利用低层参数进行优化;第二,将多个层融合作为一个部分,如:在 Ad Hoc 网络中,将 MAC 层和网络层结合成一层以便更好地交互.第 1 种方法的优点在于并不要求全部放弃层间的透明性,而第 2 种方法虽然完全丧失了以上优势,却通过不同层之间的交互得到了更好的性能.跨层协议设计也有其危险性,需要考虑到协议的兼容性,以防止未来的工作难以进行.利用 MIMO 技术对网络进行跨层协议设计,目前已经取得了一部分有价值的研究成果,并且绝大部分均是从跨层协议设计的第 1 种途径出发.根据跨层协议设计时联合因素的不同,可将现有的基于 MIMO 的多跳无线网络跨层协议设计算法主要分为以下几大类:

(1) 联合网络层与 MAC 层为主进行协议设计

将网络层与 MAC 层联合进行跨层协议设计以优化整个系统的性能是目前研究中采用较多的一种方式.文献[41]将 MAC 层的信道分配与网络层联合对多射频 WMNs 进行优化设计以最大化吞吐量.该文献提出,多射频多信道能够用来降低干扰,但要实质性地提高吞吐量,路由和信道分配非常关键,在 WMNs 环境下设计一种有效的联合信道分配和路由的算法是设计时应重点考虑的问题.文献[42]除了考虑信道分配和路由问题以外,同时还结合带宽分配,以实现信道分配和带宽分配的智能化,在提高系统吞吐量方面取得了良好的效果.文献[37]提出的 HMCP 协议联合考虑了路由和链路层问题,设计了动态信道分配算法和新的路由判据 MCR,使路由选择更加适应底层信道环境的变化.文献[25]将路由、信道分配和调度三者联合开发了一种分布式在线算法,文献[43]仅联合优化路由和调度问题,以最小化系统整体的激活时间,从而在共存信道干扰约束和射频接口限制条件下

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

满足给定的端到端流量需求.文献[44]从 MIMO 本身的多接口特性角度考虑,将接口分配与网络层联合设计,实现了性能上的极大提高.根据以上分析,在联合网络层与 MAC 层进行协议设计时,网络层高效地利用 MAC 层提供的信道状态信息是设计时最应优先考虑的,若能进一步利用 MIMO 的优势,根据应用需求考虑诸如带宽分配、接口调度与分配或传输层拥塞控制等问题,甚至合并这两层中的某些功能,则可能实现整体性能的更大提高.

(2) 联合网络层与物理层为主进行协议设计

MIMO 是一种物理层技术,因此,将物理层与上层联合考虑是基于 MIMO 的多跳无线网络设计时最直接和最容易考虑到的方式.在 MIMO 系统中,物理层可供利用的因素很多,最常考虑的是功率控制.功率控制设计本身是一个比较复杂的问题,在设计功率控制算法时也经常运用跨层协议设计的思想,但重点在通过功率控制以控制网络拓扑等因素,从而减少干扰和增加空间复用.在 MIMO 系统中,联合网络层与物理层的功率控制技术可以使路由更好地适应网络拓扑结构的变化,并有助于选择最小干扰路径,减少路由失败.文献[45]联合优化物理层的 DPC 功率分配与网络层的多跳多径路由,实现了容量上限的提升.

(3) 联合 MAC 层与物理层为主进行协议设计

MAC 层与物理层在传统协议分层中便是相邻层,需要相互传递信息,但在传统的分层协议设计方法中,MAC 层和物理层的信息交互相当有限,为充分发挥 MIMO 技术的优势,需要更多的信息交互,以实现更加快速而灵活的控制.在 MIMO 系统中,进行 MAC 层协议设计时存在的一个非常重要的问题是信道分配(channel assignment,简称 CA)问题,这里,信道分配不仅包括可用信道的分配问题,还包括接口的分配问题,其共同的目标主要是减轻信道干扰或提高解码速率,以增加系统容量.目前,将这两层联合考虑进行协议设计的研究也比较多,第 2 节中分析的典型协议与算法中便有多个协议均出自 MAC 层与物理层的联合考虑,如:DSMA 协议即在物理层与 MAC 层之间交换命令和信息实现了解码过程的性能提高;SPACE-MAC 协议则利用信道状态信息(CSI)调整物理层的天线权重实现了多种源信号流的区分,从而无需专用控制信道,提高了信道利用率;MIMA-MAC 利用物理层空间复用(SM)特性与 MAC 相结合,减轻来自邻节点的干扰,从而能在同一冲突域内进行并行数据传输,增加了系统容量.而文献[46]则在 MIMO-OFDM 波束赋形系统中基于不同的 QoS 需求,考虑物理层信道边信息(channel side information)、连接的公平性和 MAC 层 QoS 需求,定义调度优化因子(scheduling priority factor,简称 SPF),设计基于连接的具有 QoS 保证的吞吐量最大化动态资源管理策略,获得了良好的 QoS 支持和较高的系统吞吐量.

(4) 联合网络层、MAC 层与物理层进行协议设计

在跨层协议设计时将这 3 层联合设计可供选择的因素更多,但面临的问题也更丰富.文献[47]联合考虑了 MAC 层的链路调度、物理层的功率控制和网络层路由问题,开发了一种本地集中式算法,以最小化系统平均功率的损耗.文献[48]则考虑优化每个节点的功率和带宽问题,目标是使网络利用率最大化,待解决的问题包括如何决定每个传输节点的最优化功率分配、每次传输的最优化带宽分配和网络最优化流量路由问题,为了解决这 3 个问题,该文献将问题分解为两个子问题:网络层子问题和链路/物理层子问题,并设计出了一种分布式算法,集中解决联合优化网络层的路由问题、链路层的带宽分配问题和物理层的功率分配问题.另外,CRPBA 协议同样也是考虑了路由、带宽分配和功率分配问题.由以上分析可知,目前将这 3 层联合设计的协议均是考虑功率、带宽和路由三者,从各自所达到的效果来看,均在某一方面取得了性能上的提高.

综上分析,MIMO 技术对多跳无线网络的架构设计带来了新机遇,但也产生了许多新的问题,跨层协议设计不仅是解决这些问题的一种有效手段,而且是有效运用 MIMO 技术提高多跳无线网络潜在性能的一条强有力的途径.在基于 MIMO 的多跳无线网络背景下进行跨层协议设计时,主要问题均集中于物理层、MAC 层和网络层,而在这 3 层中最常考虑的因素有:空间分集与空间复用、功率、带宽、链路干扰、拓扑和路由,面临的问题主要有:多端空时调度、功率控制、干扰抑制、天线接口的分配与调度、带宽分配、信道分配与调度、拓扑控制和多信道环境下的路由设计(包括新的路由判据的设计问题).另外,可供考虑的因素还有 QoS、负载和拥塞等因素,结合这些因素设计诸如 QoS 感知、负载感知、拥塞感知等协议,有助于进一步提高多跳无线网络的吞吐

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

量、减少端到端延时,从而增强实时性、提高负载公平性等性能.虽然跨层协议设计时可以考虑的因素有许多,但是如何在诸多因素中加以选择以形成最佳有机组合,从而最大化系统性能,从目前的研究来看,尚无定论.

从实用化角度考虑,进行跨层协议设计时,根据特定的业务需求,分析业务最敏感的性能,以此在某一点或几点上进行联合优化是比较明智的选择,如:对于视频图像等多媒体业务,其实时性要求比较高,因此,进行跨层优化时可重点考虑能够提高实时性的因素,例如减少端到端延时以及流量负载传输的稳定性等,从而增强实时性,并提供持续、清晰的图像;对于数据传输业务,则对数据的完整性和整体速率要求比较高,因而,需要考虑的因素与图像业务不同,优化的重点应在减少丢包率和提高吞吐量上.当然,实用化的跨层协议还应考虑诸如能量有效性利用、实现的复杂性、稳定的吞吐量等问题,很多时候都无法全面最优化,往往需要在各种性能之间进行折衷(trade-off),以实现一个在整体上接近最佳性能的系统.UIUC 的无线网络组(Wireless Networking Group at the University of Illinois)成员在文献[49]中所做的工作为实用化提供了良好的参考,他们在其开发的Net-X测试床上对其之前开发的跨层协议 HMCP 进行了实际的性能测试,并且通过 VoIP(voice over Internet protocol)测试了协议的延时特性,在实测的基础上提出了一种改进策略以降低频繁的信道切换所带来的延时,取得了良好的效果.但仍然有很多问题有待解决,如:交叉信道干扰、最小化信道滞留时间、更短的接口和信道切换延时、重负载下的路由失败问题,等等.总之,在实用化方面,跨层协议的设计涉及诸多的网络技术与无线通信物理层技术的有机融合,还存在很多开放性的关键问题亟待解决.

5 算法比较与分析

综上所述,分析了部分典型的基于MIMO的多跳无线网络协议与算法,它们都各自针对不同的应用需求和应用环境而提出,各有其优点以及侧重点,具有多样性,因而,很难以统一的标准对其好坏进行评判.为了进行全面的比较说明,下面采用列表的方式对以上各种算法进行综合比较分析.表2从跨层协议设计的角度出发,根据各协议与算法在设计时所联合的层的不同加以分类说明,如:物理层与MAC层联合设计(PHY-MAC)、MAC层与网络层联合设计(MAC-NETWORK),等等,对于只针对某一层进行设计的协议按传统方法分类,如:MAC层、网络层,等等.表3从性能角度,通过多个性能参数对以上各协议进行了综合分析.

Table 2 Comparison of classifications of MIMO-based multi-hop wireless networks protocols and algorithms

表 2 基于 MIMO 的多跳无线网络协议与算法分类比较

Protocol	A	B	C	D	E	F
DSMA	√					
SPACE-MAC	√					
NULLHOC	√					
SCMA					√	
MIMA-MAC	√					
ICSMA					√	
PCAM					√	
MUP					√	
BSCA			√			
PDCA			√			
DCA					√	
MCSMA					√	
CLICA					√	
CRPBA				√		
HMCP			√			
HMCMP					√	
MR-LQSR			√			

A: PHY-MAC; B: PHY-NETWORK; C: MAC-NETWORK;
D: PHY-MAC-NETWORK; E: MAC; F: NETWORK

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

Table 3 Comparison of performance of MIMO-based multi-hop wireless networks protocols and algorithms

表 3 基于 MIMO 的多跳无线网络协议与算法性能比较

Protocol	A	B	C	D	E	F	G
DSMA	Low	Not need	Backlog queue	√	Good	Moderate	Moderate
SPACE-MAC	High	Moderate	Holds antennas weight vector and CSI	√	Good	Moderate	Good
NULLHOC	High	High	Holds CSI	√	Moderate	Moderate	Good
SCMA	Moderate	High	Channel allocation vector	√	Moerate	Good	Good
MIMA-MAC	Moderate	High	Not need	√	Moderate	Moderate	Good
ICSMA	Low	High	Not need	√	Moderate	Good	Poor
PCAM	Not need	High	Not need	√	Moderate	Good	Moderate
MUP	Low	High	MUP neighbor table	×	Good	Moderate	Good
BSCA	Moderate	Moderate	Interference link nerghbors vector, Interference link incident vector	×	Moderate	Moderate	Poor
PDCA	High	High	Interference link nerghbors vector, Interference link incident vector	×	Moderate	Moderate	Moderate
DCA	Low	High	CUL (Channel usage list), FUL (Free channel list)	√	Moderate	Good	Moderate
MCSMA	Low	Moderate	FUL (Free channel list)	√	Moderate	Good	Moderate
CLICA	High	Moderate	Not need	×	Good	Moderate	Moderate
CRPBA	High	High	Not need	×	Good	Moderate	Good
HMCP	Moderate	High	Neighbor table, ChannelUsageList	√	Moderate	Good	Moderate
HMCMP	Moderate	High	Not need	×	Moderate	Good	Good
MR-LQSR	Low	Moderate	Neighbor table, Link cache	×	Good	Good	Moderate

A: Computation overhead; B: Control overhead; C: Storage overhead;

D: Node mobility; E: Robustness; F: Fairness; G: Adaptivity to changes

6 总结与展望

针对基于 MIMO 的多跳无线网络,最近几年来国内外的研究学者展开了大量的工作,提出了诸多新的协议与算法.从目前国内外的研究现状来看,好的基于 MIMO 的多跳无线网络协议与算法具有如下特点:根据具体的应用需求,从某一角度进行重点设计以满足业务需求;根据 MIMO 技术的特点,充分利用其空域特性,尽可能降低来自节点自身天线之间或邻居节点的链路干扰,以提高并行传输的效率;针对基于 MIMO 的多跳无线网络的拓扑结构的复杂性和动态变化特征,采用分布式动态信道分配策略和信道/链路感知或负载感知路由判据;针对 MIMO 技术所带来的新特性,充分发掘物理层资源,联合高层,设计能够自适应调整的智能化高性能跨层协议,提升系统整体性能.

虽然,近年来国内外的研究取得了很多有意义的成果,但这些研究成果在理论上均存在各种缺陷或不足,在实践环境中存在较大的局限性.目前,针对基于 MIMO 的多跳无线网络的实用化协议与算法的研究还处于探索阶段,欲形成最终成熟的应用技术,还存在诸多基础性问题和关键技术需要进一步研究和完善:

(1) MIMO 技术的多天线机制所带来的干扰.MIMO 技术的多天线机制是其主要特性,也是其优势所在,但多个天线的运用也不可避免地带来了天线之间的干扰,如何设计高效的 MIMO 干扰模型以减轻或抑制天线之间的干扰从而提高接收 SNR(signal to noise ratio)是一个非常重要的问题.加大天线之间的距离是一条看似有效的途径,但通信终端设备的微型化使得这一方法难以实现,因此,需要从新角度考虑这一问题,如:使用新的调制技术以及使用更好的策略操作正交信道.在这一方面,将 MIMO 与 OFDM 结合,即:MIMO-OFDM 是一种有效的手段[50],在 MIMO 系统中引入 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)技术可以解决频率选择性衰落问题,增强抗多径干扰能力.MIMO-OFDM 技术虽有诸多优点并被认为是 4G 的关键技术之一,但是,实际环境的多样性和复杂性,使得这一技术同样存在许多富于挑战性的问题有待解决.

(2) MIMO 技术的多天线所引入的多接口和多信道调度问题.在单天线系统中,即使面临多信道分配与调度问题,也仅仅需要考虑时间自由度和频谱自由度.然而,MIMO 技术使用多天线机制,引入空间自由度,从而在接口与信道调度时需要考虑空间、时间和频谱 3 种自由度.在实际应用中,可用正交信道的数量通常在选定天线后就被确定,因此,在可用信道受约束的条件下,如何设计合理的 MIMO 多接口/多信道调度模型,智能化管理多

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

接口与多信道,以高效地分配与调度接口和信道,并降低信道或接口切换延时,等等,这些问题都是基于 MIMO 的多跳无线网络性能在实际应用环境中获得实质性提升的关键.

(3) 针对 MIMO 的多信道 MAC 协议设计问题.MIMO 技术为网络节点提供了多个可用信道,提供了潜在的并行传输能力,增加了成倍提高吞吐量的可能性.但是,实际环境中的无线信道通常不稳定,多信道之间也可能存在交叉干扰.MAC 层信道分配算法必须能够适应这种不稳定的链路质量才能高效地通信.因此,如何在这种条件下有效地获取链路质量指标并根据网络层算法产生的拓扑结构快速动态调整信道,避免隐藏终端或暴露终端,从而降低冲突并提高多接口和多信道利用率,并基于此设计高效地动态自适应的 MIMO 信道分配算法等问题均非常重要并极富挑战性.

(4) 适用于 MIMO 系统的新的路由判据和路由协议设计问题.MIMO 技术的引入改变了底层物理环境,提升了链路质量,并带来了可能的冗余链路,但也增加了网络拓扑的复杂性,使得传统的基于最小跳数的路由在基于 MIMO 的多跳无线网络中无法达到路径选择的最优化,甚至在一定的环境中最小跳数判据无法正常工作.因而,设计新的能适应并能高效利用 MIMO 多信道机制的路由判据是路由协议设计的当务之急.在实际应用中,基于 MIMO 的多跳无线网络的网络拓扑结构可能具有多个分层并具有高度动态特性,同时,链路的质量也因周围环境的改变而出现较大的波动,每个通信链路的负载也随着时间的不同而产生波动,并且应用层业务流 QoS 也可能随时发生变化,这些特点使得新的路由判据的设计需要考虑的因素大为增加,如何平衡这些因素,提高路由性能,面临着巨大的挑战.

(5) 多目标设计的局限性以及跨层优化所带来的不确定性问题.从目前的研究发展来看,跨层优化是基于 MIMO 的多跳无线网络设计的趋势.跨层优化设计能让高层充分利用低层产生的冗余信息以提供更好的交互,从而提高协议的性能.基于 MIMO 的多跳无线网络的跨层优化问题在第 4 节已经作了比较详细的分析.由第 4 节的分析可知,MIMO 技术影响着多跳无线网络的多项性能,并存在多控制目标问题.通常情况下,不存在一种算法能够满足所有应用目标的最优性能要求.并且,在多跳无线网络中部分应用目标之间的矛盾难以调和,例如数据传输的高可靠性与高实时性.此外,针对具体的应用,有些目标必须首先得到满足,如 VoIP 应用中的实时性[49].因此,在理论与实践中,如何在多控制目标之间加以折衷,使网络整体性能最优化,是系统设计的关键.另一方面,跨层优化设计需要考虑跨层协议所带来的可能的不兼容性以及跨层协议自身的可扩展性.这两点是实用化所必须解决的问题,也是跨层协议走向实用化的关键.

(6) 适用于混合业务流 QoS 需求的跨层模型和协议的设计问题.任何系统最终都是要面向实际应用的,而在实际应用环境中,业务并流比仿真环境要复杂许多,往往是混合业务.而在实际混合业务环境中,各种特定业务具有其独特的 QoS 需求,系统应能在各种业务环境下具有一致的高稳定性才能获得良好的性能表现.因此,如何利用 MIMO 技术的特性和高层应用 QoS,并结合网络层路由,设计能够灵活交互的、高效利用各层资源的、高鲁棒性的跨层优化模型和协议,从而适应混合业务需求,是提高 MIMO 多跳无线网络整体性能的关键.

(7) 系统的实验研究及统计分析评估建模问题.实际应用环境往往比仿真环境复杂许多,在初步设计完成算法模型或协议之后,如何针对实测数据建立有效的统计分析评估模型和实验测试评估系统,并利用其对算法模型或协议进行多方面的性能评价,寻找更贴近实际环境的影响网络整体性能的因素,从而有针对性地改进模型和算法,是提升前期设计质量的重要途径.

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] Ian FA, Wang XD, Wang WL. Wireless mesh networks: A survey. Computer Networks, 2005,47(4):445−487. [doi: 10.1016/j.comnet.2004.12.001]

[2] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. Journal of Software, 2003,14(7):1282−1291 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

[3] Arulsaravana J, Magda EZ. A real-time cross-layer design of the multimedia application layer with a mimo based wireless physical layer. In: Proc. of the ISWPC 2008. Santorini Island: IEEE Communications Society, 2008. 455–458. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4556249

[4] Michelle XG, Scott FM, Shiwen M. On-Demand routing and channel assignment in multi-channel mobile ad hoc networks. Ad Hoc Networks, 2009,7(1):63–78. [doi: 10.1016/j.adhoc.2007.11.011]

[5] Ma J, Zhang Y, Su X, Yao Y. On capacity of wireless ad hoc networks with MIMO MMSE receivers. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2008,7(12):5493–5503. [doi: 10.1109/T-WC.2008.071452]

[6] Zhang Y, Luo JJ, Hu HL.Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 29–45 (in Chinese).

[7] Paularja AJ, Nabar DA, Bolcskei RU. An overview of MIMO communications—A key to gigabit wireless. Proc. of the IEEE, 2004,92(2):198–218. [doi: 10.1109/JPROC.2003.821915]

[8] Li ZZ, Tse DNC. Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple-antenna channels. IEEE Trans. on Information Theory, 2003,49(5):2–25.

[9] Li HQ, Guo W, Zheng H. Analysis of MIMO channel capacity for distributed antenna system. Journal of China Institute of Communications, 2005,26(8):134–138 (in Chinese with English abstract).

[10] Habiba S, Samik G, Luciao L, Marco C. Channel assignment strategies for multiradio wireless mesh networks: Issues and solutions. IEEE Communication Magazine, 2007,45(11):86–93. [doi: 10.1109/MCOM.2007.4378326]

[11] Akis S, Cauligi SR. Capacity bounds for ad-hoc networks using directional antennas. In: Akyildiz F, Li Y, Sivakumar R, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Communications (ICC 2003). Alaska: IEEE Press, 2003. 348–352.

[12] Murali K, Thyaga N. Characterizing the capacity region in multi-radio multichannel wireless mesh networks. In: Kumar PR, Andrew TC, Roger W, eds. Proc. of the 6th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2005). Urbana-Champaign: ACM, 2005. 73–87.

[13] Chen B, Gans MJ. MIMO communications in ad hoc networks. IEEE Trans. on Signal Process, 2006,54(7):2773–2783. [doi: 10.1109/TSP.2006.874842]

[14] Paramvir B, Atul A, Jitendra P, Alec W. Reconsidering wireless systems with multiple radios. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004,34(5):39–46. [doi: 10.1145/1039111.1039122]

[15] Chereddi C. System architecture for multi-channel multi-interface wireless networks [MS. Thesis]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2006.

[16] Kyasanur P, Vaidya NH. Capacity of multi-channel wireless networks: Impact of number of channels and interfaces. In: Thomas FLP, Christoph L, Elizabeth MBR, Songwu L, eds. Proc. of the 11th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2005). Cologne: ACM, 2005. 43–57.

[17] Draves R, Padhye J, Zill B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In: Zygmunt JH, Samir RD, Ravi J, eds. Proc. of the 10th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2004). Philadelphia: ACM, 2004. 114–128.

[18] Mahesh KM, Samir RD. A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Broadband Networks. Boston: IEEE Communications Society, 2005. 381–390. http://www.cs.sunysb.edu/~samir/Pubs/broadnets2005.pdf

[19] Kozat UC, Koutsopoulos I, Tassiulas L. A framework for cross-layer design of energy-efficient communication with QoS provisioning in multi-hop wireless networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. Hong Kong: IEEE Communications Society, 2004. 1446–1456. http://inf-server.inf.uth.gr/~jordan/INFOCOM-2004.pdf

[20] Baek SJ, Kim G, Nettles SM. A max-min strategy for QoS improvement in MIMO ad-hoc networks. In: Proc. of the IEEE 61st Vehicular Technology Conf. (VTC 2005). Stockholm: IEEE Vehicular Technology Society, 2005. 2473–2477. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1543780

[21] Akhtar N, Moessner K. On the nominal capacity of multi-radio multi-channel wireless mesh networks. Computer Communications, 2008,31(8):1475–1483. [doi: 10.1016/j.comcom.2008.01.056]

[22] Rad A, Wong V. Cross-Layer fair bandwidth sharing for multi-channel wireless mesh networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2008,7(9):3436–3445. [doi: 10.1109/TWC.2008.070238]

[23] Winters JH. Smart antenna techniques and their application to wireless Ad hoc networks. IEEE Wireless Communications Magzine, 2006,13(4):77–83. [doi: 10.1109/MWC.2006.1678168]

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

[24] Sundaresan K, Sivakumar R, Ingram MA, Chang T. A fair medium access control protocol for ad-hoc networks with MIMO links. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. Hong Kong: IEEE Communications Society, 2004. 2559−2570. http://www.ieee-infocom.org/2004/Papers/53_4.PDF

[25] Rasool S, Lin X. A distributed joint channel-assignment, scheduling and routing algorithm for multi-channel ad hoc wireless networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. Alask: IEEE Communications Society, 2007. 1118−1126. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4215716

[26] Casari P, Levorato M, Zorzi M. DSMA: An access method for mimo ad hoc networks based on distributed scheduling. In: Mohsen G, Hsiao-HC, Xi Z, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC 2007). Honolulu: ACM, 2007. 443−448.

[27] Mundarath JC, Ramanathan P, Van Veen BD. NULLHOC: A MAC protocol for adaptive antenna array based wireless ad hoc networks in multipath environments. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM 2004. Madrid: IEEE Communications Society, 2004. 2465−2469. http://www.utdallas.edu/~kxs028100/courses/Papers/Globecom04/MACforAdaptiveAntennaArrays.pdf

[28] Park J, Nandan A, Gerla M, Lee H. SPACE-MAC: Enabling spatial reuse in using MIMO-channel aware MAC. In: Proc. of the IEEE ICC 2005. Seoul: IEEE Communications Society, 2005. 3642−3636. http://www.unwired.ee.ucla.edu/papers/Space-Mac.pdf

[29] Park M, Choi SH, Nettles SM. Cross-Layer MAC design for wireless networks using MIMO. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM 2005. St Louis: IEEE Communications Society, 2005. 2870−2874. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01578283

[30] Paulraj A, Nabar R, Gore D. Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 218−240.

[31] Jagadeesan S, Manoj BS, Siva C. Interleaved carrier sense multiple access: An efficient MAC protocol for ad hoc wireless networks. In: Akyildiz F, Li Y, Sivakumar R, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Communications (ICC 2003). Alaska: IEEE Press, 2003. 1124−1128.

[32] Adya A, Paramvir B, Jitendra P, Alec W, Zhou L. A multi-radio unification protocol for IEEE 802.11 wireless networks. In: Proc. of the 1st Int'l Conf. on Broadband Networks (BROADNETS 2004). San Jose: IEEE Computer Society, 2004. 344−354. http://www.pmg.lcs.mit.edu/~adya/pubs/broadnets-2004.pdf

[33] Wu SL, Lin CY, Tseng YC, Sheu JP. A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks. In: Proc. of the Int'l Symp. on Parallel Architectures, Algorithms and Networks (ISPAN 2000). Dallas: IEEE Computer Society, 2000. 232−237. http://www.csie.nctu.edu.tw/~yctseng/papers.pub/mobile12-multicode-ISPAN2000.ps

[34] Das JN, Nasipuri SR. A multi-channel CSMA MAC protocol with receiver-based channel selection for multihop wireless networks. In: Jenny L, Ronald L, Park EK, eds. Proc. of the 10th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks. Arizona: IEEE Communications Society, 2001. 432−439.

[35] Das JSPA, Gupta AK. Primary channel assignment based MAC (PCAM): A multi-channel MAC protocol for multi-hop wireless networks. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Atlanta: IEEE Communications Society, 2004. 1110−1115. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01311343

[36] Jia L, Tae Y, Park H. Cross-Layer optimization of MIMO-based mesh networks under orthogonal channels. In: Proc. of the IEEE WCNC 2007. Hong Kong: IEEE Communications Society IEEE, 2007. 49−54. http://filebox.vt.edu/users/yshi/papers/Wcnc07.pdf

[37] Pradeep K, Vaidya NH. Routing and link-layer protocols for multi-channelmulti-interface ad hoc wireless networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2006,1(2):31−43.

[38] Li CY, Jeng AK, Jan RH. A MAC protocol for multi-channel multi-interface wireless mesh network using hybrid channel assignment scheme. Journal of Information Science and Engineering, 2007,23(4):1041−1055.

[39] Zhang X, Lu SL, Chen GH, Chen DX, Xie L. Topology control for wireless sensor networks. Journal of Software, 2007,18(4):943−954 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/943.htm [doi: 10.1360/jos180943]

[40] Li FM, Xu WJ, Liu XH. Power control for wireless sensor networks. Journal of Software, 2008,19(3):716−732 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/716.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.00716]

[41] Alicherry M, Bhatia R, Li L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks. In: Thomas FLP, Christoph L, Elizabeth MBR, Songwu L, eds. Proc. of the 11th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2005). Cologne: ACM, 2005. 58−72.

[42] Raniwala A, Gopalan K, Chiueh T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2004,8(2):50−65. [doi: 10.1145/997122.997130]

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

[43] Zhang JH, Wu HT, Zhang Q, Li B. Joint routing and scheduling in multi-radio multi-channel multi-hop wireless networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Broadband Networks. Boston: IEEE Communications Society, 2005. 631−640. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1589668

[44] Kyasanur P, Vaidya NH. Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless networks. Technical Report, 2004, University of Illinois at Urbana-Champaign: Department of Electrical and Computer Engineering and Coordinated Science Laboratory, 2004. 1−7.

[45] Liu J, Hou YT, Sherali HD. Routing and power allocation for mimo-based ad hoc networks with dirty paper coding. In: Proc. of the ICC 2008. Beijing: IEEE Communications Society, 2008. 2859−2864. http://mnet.skku.ac.kr/data/2008data/ICC2008/DATA/S07S24P01.PDF

[46] Hu YH. Cross layer dynamic resource management with guaranteed QoS in MIMO OFDM systems. In: Proc. of the Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2008). Dalian: IEEE Communications Society, 2008.1−6. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4678052

[47] Lin YH, Javidi T, Cruz RL, Milstein LB. Distributed link scheduling, power control and routing for multi-hop wireless MIMO networks. In: Proc. of the 40th Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers (ACSSC2006). Shanghai: IEEE Computer Society, 2006. 122−126. http://circuit.ucsd.edu/~tjavidi/asilomarssc_ver8.pdf

[48] Liu J, Hou YT, Shi Y, Sherali HD. Cross-Layer optimization for MIMO-based wireless ad hoc networks routing, power allocation, and bandwidth allocation. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008,26(6):913−926. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080808]

[49] Shen TB, Vaidya NH. Experiments on a multi-channel multi-interface wireless mesh network. Technical Report, University of Illinois at Urbana-Champaign: Department of Electrical and Computer Engineering and Coordinated Science Laboratory, 2008. 1−27.

[50] Fu WH, Yang XN, Liu NA, Zeng XW. MIMO systems in wideband wireless. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007,36(2):176−178, 206 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

[2] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1282−1291. http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm

[6] 张彦,罗济军,胡宏林.无线网状网:架构、协议与标准.北京:电子工业出版社,2008.29−45.

[9] 李汉强,郭伟,郑辉.分布式天线系统 MIMO 信道容量分析.通信学报,2005,26(8):134−138.

[39] 张学,陆桑璐,陈贵海,陈道蓄,谢立.无线传感器网络的拓扑控制.软件学报,2007,18(4):943−954. http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/943.htm [doi: 10.1360/jos180943]

[40] 李方敏,徐文君,刘新华.无线传感器网络功率控制技术.软件学报,2008,19(3):716−732. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/716.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.00716]

[50] 付卫红,杨小牛,刘乃安,曾兴雯.宽带无线通信中的 MIMO 系统.电子科技大学学报,2007,36(2):176−178,206.

李方敏(1968－),男,湖南涟源人,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络服务质量,新型网络体系结构,嵌入式系统.

方艺霖(1983－),男,博士,主要研究领域为无线自组织网络路由优化,跨层设计技术.

马小林(1984－),男,硕士,主要研究领域为无线自组织网络.

吴鹏(1983－),男,博士,主要研究领域为无线自组织网络路由优化,跨层设计技术.

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn