ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.21, No.6, June 2010, pp.1308−1325
doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03777
© 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

无线 Mesh 网络组播路由协议*

方艺霖, 李方敏+, 吴 鹏, 刘新华, 马小林

(武汉理工大学 信息工程学院,湖北 武汉 430070)

Multicast Routing Protocol for Wireless Mesh Networks

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

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

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

Fang YL, Li FM, Wu P, Liu XH, Ma XL. Multicast routing protocol for wireless mesh networks. *Journal of Software*, 2010,21(6):1308−1325. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3777.htm

Abstract: In wireless mesh networks, multicast routing is one of the supporting technologies for its practical application, and has become the research focus. Since the traditional multicast routing protocols don't adapt themselves directly to the structure characteristic and performance requirement of wireless mesh networks, a variety of protocols for wireless mesh networks are studied. This paper summarizes the design targets, principles and classification methods for protocols. The fundamental mechanism, characteristics and performance of existing representative protocols are discussed and compared in detail. Finally, the influences of multi-radio multi-channel and multi-rate on the design of multicast routing protocol are analyzed, and the importance of establishing the cross-layer optimization model and the mechanism of the multicast routing based on actual environment and practical design are pointed out.
Key words: wireless mesh networks; routing; multicast; broadcast; cross-layer design

摘 要: 组播服务是无线 Mesh 网络面向实际应用的一种重要服务,网络层组播路由协议则是服务实现的核心支撑协议.无线 Mesh 网络独有的结构特征、性能要求以及多射频、多信道和多速率的引入使得许多传统组播路由协议无法直接进行应用,近几年来,已有不少针对特定无线 Mesh 网络的组播路由协议相继提出.归纳总结了协议的设计目标、原则和分类方法;阐述了各类典型协议的主要机制,并就这些协议的技术特点和性能差异进行了详细比较;最后结合无线 Mesh 网络的发展趋势和协议面向实际混合业务环境的实用化目标分析了多射频、多信道以及多速率对组播路由的影响,指出了基于实测环境和实际业务需求建立组播路由跨层优化模型与具体优化机制的重要性.
关键词: 无线 Mesh 网络;路由;组播;广播;跨层设计
中图法分类号: TP393 文献标识码: A

* 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 2009-04-30; Accepted 2009-11-09

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

无线 Mesh 网络[1](wireless mesh networks,简称 WMNs)作为一种定位于高容量、高速率的新型宽带多跳无线网络,在部署目标、网络结构和流量特征方面与移动 Ad Hoc 网络(mobile Ad Hoc networks,简称 MANETs)、无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSNs)等传统多跳无线网络相比均存在诸多差异.其骨干路由节点准静止、能量无约束等特征使 WMNs 在增加网络容量、扩大无线覆盖范围、支持多频段无线设备、提高网络可靠性和鲁棒性方面显示出很大的优势.网络非常适合为城市、乡村、校园等不同规模和环境下的业务提供宽带无线接入,因此具有广阔的应用前景.

使用户获取可随时随地的高质量无线宽带通信服务是 WMNs 的设计目标,组播作为一种能够有效节省网络资源[2]的通信服务则是其基本构件之一,它是许多 WMNs 主流业务(如大规模视频会议、远程教学及多人在线游戏等多用户协同类业务)的基础.因此,提供高质量组播服务是 WMNs 面向实用化的必然趋势,而研究适合 WMNs 网络特征和需求的组播路由协议则是实现这种服务的关键,其已成为 WMNs 领域中的研究热点[3−9].近年来,已有学者开展了相关研究,并取得了一定进展.为借鉴经验、分析不足,本文对其中一些典型协议进行了分析和总结.第 1 节讨论 WMNs 组播路由协议设计目标、原则和协议分类.第 2 节介绍并分析现有典型的组播路由协议.第 3 节分析多射频、多信道和多速率对 WMNs 组播路由的影响.第 4 节介绍 WMNs 组播路由跨层优化技术.第 5 节对现有典型的协议算法进行分类比较.第 6 节对全文进行总结,并指出未来的研究策略与重点.

1 WMNs 组播路由协议概述

1.1 WMNs组播路由协议设计目标和原则

通过组播路由方式,源节点可同时交付数据给其他组成员节点,与单播路由相比,可以有效节省带宽和网络资源,广播路由则可看成全网节点均为组播组成员的一类特殊组播路由[1,7].组播路由和路由度量密不可分,路由度量用来反映具体设计目标下的组播路由属性,从而判别路由的优劣,其一般可面向节点、链路或路径等进行设计[10].研究 WMNs 组播路由是指基于具体组播需求和网络特征为网络组播设计合适的路由度量,构造并维护最优化组播分发拓扑,以达到提高组播性能的目的.由于 WMNs 从传统无线网络发展而来[11],因此这些网络中业已成熟的路由设计思想与方法能够对 WMNs 组播路由研究提供帮助;另一方面,WMNs 独有的业务需求、网络特征以及流量分布模型又使得 WMNs 组播路由协议在设计目标、设计原则和技术手段方面有所不同.

单播和组播路由的 MAC(medium access control)层数据帧交换方式存在显著差异.如图 1 所示,当前基于 802.11MAC 的单播一般采取 RTS(request to send)/CTS(clear to send)/DATA/ACK(acknowledgement)方式实现数据帧的可靠交付,在组播方式下,如果父节点与每个子节点均基于这种方式进行数据传输,则会带来较高的控制开销,极大地增加数据碰撞概率.此外,由于没有利用无线信道固有的无线广播属性(wireless broadcast advantage,简称 WBA),也会造成大量传输冗余.因此当前针对组播路由在 MAC 层一般采用直接广播的机制,但这种不存在 RTS/CTS 交换和数据确认重传的方式无法保证数据在每跳之间的交付可靠性,目前已有学者采取伪广播[12]等策略来解决这一问题.基于上述比较易知组播路由相对单播路由在设计空间和约束条件上区别较大,使用单播路由协议进行数据组播会造成网络资源的极大浪费,那些基于单播设计的路由度量如 RTT,PP,ETX,ETT,WCETT,AETD 和 BLC 等及其相关设计准则[13]均难以直接适用于 WMNs 组播路由,可以结合具体业务需求、WMNs 网络特征和单向无重传[6]的组播路由方式对其进行改进.

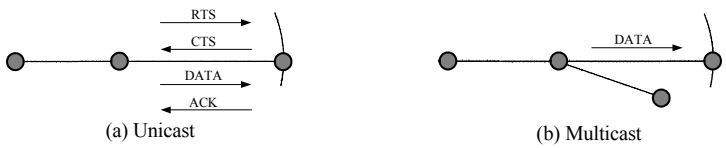

Fig.1 Comparison of packet exchanges at MAC layer during unicast and multicast routing

图 1 单播和组播路由的 MAC 层数据帧交换方式比较

一些针对传统多跳无线网络如 MANETs、WSNs 等设计的组播路由同样不能直接应用于 WMNs.在这些传统网络中,节点移动性或传输能耗是协议设计的关键约束,组播路由协议的设计目标主要集中于维护网络连

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

通、减少传输能耗和提高路由拓扑稳定度方面,依据最小跳数进行选路是使用得最为广泛的一种策略.WMNs 则是一种定位于高容量、高速率的网络系统,其骨干网络拓扑较稳定,路由节点和网关节点相对而言不受能耗的限制,提供面向实用化的高性能无线宽带通信服务是系统设计的首要目标.传统基于最小跳数进行选路的组播路由协议通常假定网络传输信道质量恒定,传输节点能够以固定传输速率进行分组传输.但在实际环境中,无线链路质量受到信道的噪声、衰落和干扰等制约具有时变性,节点有效传输速率也将受到信道可用带宽、传输竞争强度以及误包率等因素的影响,且最小跳数意味着每跳的传输距离较长,其将使传输冲突域增大,分组丢失率变高,有效带宽变少[14].因此,这种度量指标并不适宜为有高性能需求的 WMNs 进行组播选路,针对 WMNs 的组播路由设计应当研究能够感知链路质量、流量负载等实时网络信息的高性能路由度量,并使协议能够依据业务服务质量(quality of service,简称 QoS)需求快速建立整体优化的组播分发拓扑[4,6,15].

近几年随着底层无线通信技术的演化和 WMNs 自身研究的深入,WMNs 发展趋势呈现出以多射频、多信道和多速率(multi-radio multi-channel multi-rate,简称 MR^2-MC)为基本网络特征的全新形态[16−19],这种改变进一步增强了 WMNs 的特点和优势,同时也为现阶段及未来针对组播路由的研究提出了新的方向和挑战.

考虑多射频、多信道后,WMNs 中的无线链路变得更加复杂多变,链路质量变化更大,网络的连通性和拓扑结构由于受到信道分配的动态约束[20]而变得更加难以控制,网络有效带宽的评估和调度也更加困难,这些复杂因素使传统组播路由协议难以有效应用于新的网络环境.基于多射频、多信道 WMNs 的组播路由设计需结合相匹配的信道分配策略来同步进行.通过网络相邻节点间的协调寻求良好的组播路由和传输信道以期充分发挥多射频、多信道引入的空间自由度和并发传输能力,在保证网络有效连通、信道资源有效利用的前提下尽量使用信道多样性来降低组播流内和流间干扰强度,优化网络拓扑辅助组播流在各信道间的负载均衡,避免出现局部过载,以合理改善组播端到端传输延时、传输吞吐量等相关协议性能.

另外,网络的多速率特征也为 WMNs 组播路由协议带来了新的设计自由度.组播节点一般均采取 MAC 层本地广播方式进行数据帧的传递,其传输速率被传输节点与其所有子节点间的最低单播速率所限制.WMNs 组播路由协议在选路时可利用速率多样性在单跳传输性能和组播传输节点规模之间进行权衡,通过为单次 MAC 本地广播选取传输速率来确定适当的子节点集以解决最低单播速率的约束,确保在限制传输次数、减小网络干扰的同时能够以较高的速率进行传输,从而达到有效改善组播延时等协议性能的目的[4,16−18].

基于上述分析可以得出实用化 WMNs 组播路由协议的设计目标和原则,即面向 WMNs 出现的新特点和新方向,针对业务的不同 QoS 需求,结合 WMNs 网络具体特征进行协议设计,利用跨层联合优化策略加强网络层面和通信层面的结合度,协同匹配组播传输方式的信道分配策略和速率选择机制来充分发掘网络的多射频、多信道以及多速率资源,设计能够反映链路质量和网络负载的组播路由度量,结合网络流量负载分布提高网络带宽资源的利用率,尽可能保证实际复杂环境下全网组播流的整体高效路由.当然,影响传统多跳无线网络组播路由设计的一些基本问题,如组播拓扑鲁棒性、传输可靠性、公平性[21]、安全性[22−24]、协议可扩展性、节点间的异构性、节点的动态加入和离开对组播路由的影响以及实际网络流量类型混杂等问题在 WMNs 组播路由协议中依然存在.由于 WMNs 自身骨干拓扑较稳定且骨干路由节点能量基本无约束等网络优势,对比 MANETs、WSNs 等传统多跳无线网络,这些问题将更易于得到合理解决.

1.2 协议分类

面向实际复杂网络环境的 WMNs 组播路由优化可归纳为多约束条件下组合全局最优化求解问题.由于组播路由协议是 WMNs 面向实用化的关键技术,目前已有一些研究人员基于不同侧重点对 WMNs 组播路由问题进行研究.可从射频信道及速率的使用、路由拓扑结构、网络异构互连设计、协议的信息维护方式、执行方式、设计策略等方面对协议进行分类[5,10,25,26]:

(1) 基于单射频单信道(single-radio single-channel,简称 SR-SC)的协议和基于多射频、多信道(multi-radio multi-channel,简称 MR-MC)的协议.相对前者,后者可利用多射频、多信道引入的空间自由度和并发传输能力来获取更多可用网络带宽,通过良好的协议设计能够取得更大的性能增益,但协议设计复杂度较高.

(2) 基于单速率(single-rate)的协议和基于多速率(multi-rate)的协议.前者采取单一速率进行 MAC 层广播,

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

在传输功率一定时其通信范围基本不变,节点邻居集相对固定;后者则在组播选路时引入速率多样性能力,相比前者拥有更大的设计自由度.

(3) 基于树状的协议和基于网状的协议.前者转发效率高,但对网络拓扑变化敏感,鲁棒性较差,可细分为共享树和源节点树;后者对网络拓扑变化相对不敏感,每一源目的节点对间存在多条不相交路径,协议鲁棒性好,数据传输更可靠,但其转发冗余度大,易出现路由环路.由于 WMNs 骨干网络拓扑较稳定,组播路由协议一般采取基于树的构造策略[27].

(4) 基于路径花费树、整体花费树、条件约束树和混合树的协议.基于路径花费树的协议为每一源目的节点对独立计算最优路径,易于分布式实现,组播组动态维护方便,但整树花费大,可细分为最短路径树(shortest path trees,简称 SPTs)和最优路径树;基于整体花费树的协议整体花费小,但单一源目的节点对间路径非最优,不易于分布式实现,组播组动态维护困难,可细分为最小生成树、最小斯坦树(minimum Steiner trees,简称 MSTs)、最小传输次数树(minimum number of transmissions trees,简称 MNTs);基于条件约束树的协议对树的构造进行附加性能约束,一般与前两种策略联合使用;基于混合树的协议则结合前述策略混合进行设计.

(5) 基于 WMNs 内部资源的协议和基于异构网络资源的协议.前者主要利用网内优化技术进行协议设计;相对前者,后者一般还会通过 Mesh 网关来利用异构网络资源以进一步优化 WMNs 组播路由协议性能.

(6) 有状态和无状态协议.前者由网络负责维护路由信息;后者将路由信息存储在数据包的头部,网络无须维护组播路由状态,但会导致大量冗余控制信息.

(7) 集中式和分布式协议.前者基于全局网络信息进行集中式路由计算和控制,易于获取最优路由,但协议可扩展性差;后者基于本地信息交互协同进行组播路由,路由结果一般为次优,但协议可扩展性好.

(8) 基于纯泛洪、概率转发、区域和邻居信息的协议.该分类方式针对于广播路由协议.基于纯泛洪的协议简单进行数据帧的 MAC 广播,会导致大量冗余传输,造成网络拥塞等问题;基于概率转发和区域的协议通过评估节点对广播的共享来决定节点是否参与转发,可以得到较小转发集,但协议无法保证网络覆盖完全;基于邻居信息的协议一般则使用邻居本地信息构造连通支配集(connected dominating set,简称 CDS)进行广播.

(9) 基于启发式求解的协议和具备最优化数理支撑的协议.前者易于实现,但普遍缺乏严谨的理论支持,大部分未提供结果近似度的理论分析;后者分析结果严谨,组播路由优化度高,但算法复杂,协议不易实现.

2 WMNs 组播路由协议分析

多跳无线网络容量受限、传输质量时变、数据流带宽分配不公等问题的存在,使得研究 WMNs 和其他多跳无线网络下的高性能组播路由协议及其相关优化机制一直以来都是相当有挑战性的任务.已有学者[28−31]对多跳无线网络的容量和估计技术进行了深入研究.文献[28]指出在基于 IEEE 802.11 的单信道多跳无线网络中,网络吞吐量正比于 $\Theta(W\times n^{-1/d})$.文献[29]使用线状拓扑进行实验,结果表明随着节点数 n 的增加,网络吞吐量呈递减趋势,并近似为原始信道容量的 $1/n$.上述对网络容量的研究都反映出多跳无线网络一个共同缺陷:网络数据吞吐量随着跳数的增加而急剧下降.其在 MANETs、WSNs 中表现得尤为明显.

与这些传统多跳无线网络不同,WMNs 拥有自身独特的网络优势,可以采用多射频、多信道通信方式以及使用支持多速率调节的 MAC 协议来突破这一性能瓶颈.随着射频硬件设计水平的成熟,结合 MIMO(multi-input multi-output)等通信技术在节点上装备多个射频接口,利用多信道进行并发通信已经成为增加网络容量、改善吞吐量公平性、提高 WMNs 组播路由性能的一个有效途径[20].另一方面,通过对现有 MAC 协议进行扩展,设计速率自适应机制使节点能够动态调节物理层广播速率,进而利用节点的 MAC 多速率本地广播特性进行高性能组播路由协议研究,这也是当前的领域研究热点之一.可以预见,对多射频、多信道和多速率 WMNs 的相关研究将是该领域未来的主导方向.鉴于此,本节将结合上述前两种分类方法,基于协议对多射频、多信道以及多速率网络特征的利用情况对当前一些有代表性的 WMNs 组播路由协议进行分类阐述,并对其中的研究思想和方法进行剖析.

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

2.1 基于SR-SC单速率WMNs的组播路由协议

2.1.1 MNT 和 MDWICS[32,33]

文献[32]首次提出以最小传输数作为度量来构造 WMNs 组播路由拓扑.从图 2 可以了解到,在无线多跳环境下,这种方式相比传统基于 SPTs 和 MSTs 的构造方式,能够有效地利用无线媒介的 WBA 属性,进一步减小传输干扰,降低网络带宽花费,提高路由性能.MNT(minimal number of transmissions)[32]就是一种基于最小传输数的组播路由构造协议,其思想是建立多棵成本效益子树使尽可能多的组播目的节点成为组播树的叶子节点,以达到减小组播传输次数的目的.在 MNT 的分布式实现中,协议分别从每个目的节点开始,依次建立多棵成本效益子树,并利用 RREQ-RREP 交互来近似 MSTs 构造方式完成各子树根节点间的互连.协议在降低网络带宽花费上较一些基于 SPTs 或 MSTs 的典型协议具有更好的性能表现,但也会带来较大的平均转发路径长度.其更适用于节点稠密的网络环境.

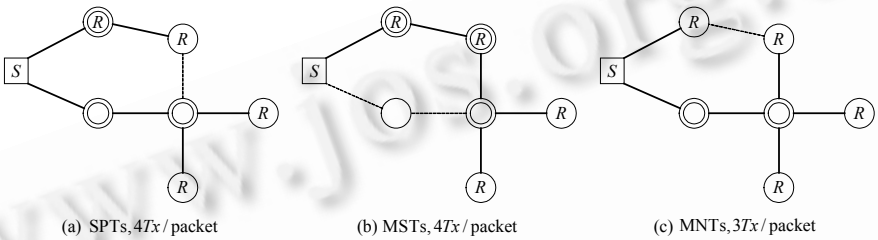

Fig.2 Comparison of cost for SPTs, MSTs and MNTs over the same WMNs

图 2 相同 WMNs 环境下 SPTs,MSTs 和 MNTs 三类组播树的传输花费比较

相邻传输间的干扰是制约组播有效带宽的一个重要因素.MNT 利用最小化传输数降低带宽花费,可在一定程度节省网络带宽,不过其并未直接从降低干扰的角度进行优化,因此组播吞吐量无法得到保证.MDWICS (minimum-degree weakly induced connected subgraph)[33]则考虑利用干扰图以最小化组播流内干扰来提高组播吞吐量,其采取剪枝策略对全网节点进行遍历以获取组播转发节点集.在每次迭代时,协议选取干扰图中入度最大的节点进行剪枝,如果在剪枝后能够保证每对源目的节点间的连通性,则移除该节点.仿真显示,这种策略能够有效减小组播流内干扰.然而,协议的集中式构造方式需要获取网络拓扑信息并对所有节点进行遍历,当网络规模增大而组播组较小时,构造效率值会变低.

2.1.2 Reliable-Based protocol[15,34−36]

无线信道质量的时变性和组播 MAC 数据帧交换的不可靠性使得可靠组播路由变得困难,一种基于网络层的解决方案是为每对源目的节点对构造多条链路分离路径(link-disjoint path)或节点分离路径(node-disjoint path),旨在以冗余路由换取分发拓扑的稳定度,提高传输可靠性.NDT(node-disjoint tree)、RNDT(revised node-disjoint tree)、SDM(shared disjoint mesh)和 MDM(minimal disjoint mesh)[34]即为 4 种通过冗余节点分离路径来提高组播可靠性的 WMNs 组播路由构造协议,它们分别使用基于树或直接基于源目的节点对建立分离路径的策略为组播构造分发拓扑.4 种构造协议中,由于 MDM 最大化的利用了已确定传输节点的 WBA 属性,因而能够获取最小转发冗余度的组播路由.

上述构造策略在保证传输次数较小的同时能够尽可能地为组播提供备份转发路径,减轻了网络节点或链路失效对组播的影响,可以一定程度地提高组播可靠性.然而,这种可靠能力的获取是以牺牲网络资源为代价,冗余路由的维护无疑会带来大量的额外开销.此外,单纯从网络层使用冗余路径的方式难以从根本解决 WMNs 组播的不可靠性,无法保证 100%的分组交付率.鉴于此,文献[15]分别讨论了 MAC 层的点到点和传输层端到端的组播可靠性问题,并采取邻居节点间的确认重传、源目的节点间的自动重传请求(automatic repeat request,简称 ARQ)和前向纠错(forward error correction,简称 FEC)技术对其进行改进.文献[35]就 FEC 和混合 ARQ-FEC 技术对 WMNs 组播传输的适用性进行了分析.此外,文献[36]在假定 MAC 广播具有可靠重传的基础上提出一种能够反映信道质量和 WBA 的组播路由度量 EMT(expected multicast transmissions),用以提供高性能的可靠组播路

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

由.不过,上述从有线网络借鉴过来的 ARQ 和 FEC 技术也会带来较大传输冗余,并易招致“ACK 爆炸”等问题.网络编码[37−39](network coding,简称 NC)是近年比较主流的一种能够有效提高网络带宽的可靠传输技术,将其应用于组播路由可以有效提升传输效率,并保证数据组播的可靠性,本文将在后续部分对该技术及现有相关研究进行阐述.

2.2 基于SR-SC多速率WMNs的组播路由协议

2.2.1 BIB 和 WCDS[4,16,40]

这两种旨在利用速率多样性来降低广播延时、提高传输吞吐的广播路由协议大体类似,其基本思想是:在网络层构建低延时广播数据分发拓扑,然后基于延时最小进行全网范围内的集中式 MAC 层传输分组和传输时间调度,主要不同之处则在于分发拓扑构造策略上.在 BIB(broadcast incremental bandwidth)中,链路的传输延时花费与链路传输速率成反比.在每次迭代过程中,协议选择花费 $C(x)$最小的节点 x 加入到树中,同时对 x 的子节点以及兄弟节点中的非树节点增量更新 $C(.)$.这种更新方式确保了 BIB 每次增加的延时花费最小,是一种典型的贪婪算法思想.与 BIB 单个分支的增量构建方式不同,WCDS(weighted connected dominating set)采用节点传输速率与传输范围内未被覆盖节点个数的乘积作为度量来尽可能多的贪婪构建分发树的分支.这种构造方式综合权衡了传输范围与传输速率对广播性能的影响,相比 BIB,能够获取更低延时的广播数据分发树.

上述两种协议有效利用了 WBA、速率多样性以及多速率 MAC 组播(multi-rate MAC multicast)的设计自由度,均不同程度地提升了广播路由性能,且 WCDS 在广播延时和传输吞吐量上要更优于 BIB.在网络节点资源有限时(SR-SC),仿真显示使用多速率 MAC 组播对广播性能的影响并不显著,可以结合多射频、多信道及 NC 等作进一步研究.它们有待完善的地方有:协议针对的是单包传输,未考虑流内干扰和流间干扰造成的干扰延时以及其他控制开销,协议不具备感知网络流量负载变化的能力,不适用于流量负载较高的网络,而理想集中式路由构造及 MAC 调度也降低了协议的可扩展性和鲁棒性.此外,协议的复杂性和集中式策略需要 WMNs 节点拥有较强的通信能力和计算能力,对节点有较高的时钟同步要求.

2.2.2 MEW,MDW 和 MRRA[41]

WCDS 所采用的集中构造方式要求多速率 WMNs 节点了解网络的全局视图,同时也造成协议对网络拓扑变化过于敏感,网络将存在大量的协议通信开销,协议扩展性较差.MEW(multi-rate expedited-pruning Wu-Li)、MDW(multi-rate delayed-pruning Wu-Li)和 MRRA(multi-point rate-maximized relaying)针对这一缺陷进行改进,提出一种基于连通支配集(connected dominating set,简称 CDS)的分布式低延时广播路由构造策略,包含初始化标记、邻居分组及速率最大化、分发树构造 3 个阶段,而 3 种协议的主要不同点则在于第 1 阶段对 CDS 的初始化策略上.3 种协议中,只有 MDW 在初始标记阶段未采取任何剪枝优化措施,故其初始 CDS 中包含了最多的标记节点,这一方面会造成额外的协议开销,但另一方面也提高了各标记节点增加传输速率的概率,从而使协议可以更为充分地运用网络的多速率特性.相较而言,MDW 能够获取较优的广播延时性能.

多速率 WMNs 中的任意节点可通过邻居节点间的信息交互了解两跳范围内的网络拓扑信息,并运用上述 3 种协议来实现分布式广播路由拓扑的构造,结合分布式 802.11 MAC 调度,能够有效实现单包的低延时广播.与 WCDS 相比,它们虽然在广播性能上有所差距,但采用的分布式方式使得协议的扩展性得到提高.然而,由于这些协议均是针对单包进行设计,因而仍然不适用于流量负载较高的网络.此外,实际网络中基于分布式 802.11 MAC 调度的方式并未给 MAC 广播提供数据重传等可靠性保障机制,在流量负载较高时,数据包因为碰撞而丢失的概率变大.可以结合实际网络中时变的链路质量信息对上述协议进行改进,提高广播传输可靠性,以进一步增强协议的实用性.

2.2.3 RCA 和 RCAM[42,43]

实际网络中存在大量的流内干扰和流间干扰,一些针对单流研究设计的 WMNs 组播路由协议并不能很好地适应这种环境.因此,如何在多组播流并存的网络环境下准确度量节点的传输能力,合理分配有限网络资源以提升网络有效承载能力是协议面向实用化的关键问题之一.RCA(RTTF-aware coverage)和 RCAM(rate and contention aware multicast)正是针对这一问题而提出的两种具备负载感知能力的广播和组播路由协议.

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

RCA 广播路由协议的负载感知能力主要体现在路由度量中的 RTTF(residual transmission time fraction)指标和构造过程中的接入控制两方面,其中 RTTF 反映了传输节点以某一速率传输时冲突域内的忙闲状况,给出了接入该传输后的下限剩余带宽.在多流并存的网络环境下,传输的 RTTF 值与其对应的冲突域信息密切相关,在如图 3 所示实例中,候选传输 $\tau(v_1,F_1)$ 与其他传输均存在干扰,其对应的冲突图如图 4 所示.因此, $\tau(v_1,F_1)$ 的 RTTF 值将由冲突域内所有传输的传输占空比来决定.RCA 通过比较各候选传输 RTTF 值是否非负来确定可行传输集,如果可行传输集为空,则表明网络当前无足够空闲资源,广播流的该次接入请求将被拒绝.由于组播方式无法事先获知候选传输的冲突域信息,相较 RCA,RCAM 组播路由协议采用了一种接入流无关的节点负载指标 CTTF 来近似度量节点的当前负载,同时结合速率多样性计算网络链路的权值,如果链路不能承载接入负载,则权值置为无穷大,各接收节点依次基于链路权值获取与树分支节点集间的最短路径以加入到组播树.

通过综合利用并权衡速率多样性、WBA 以及节点传输的可用带宽,上述两种协议均能很好地感知网络负载,精确地进行数据流的接入控制,尤其 RCAM 能够正确地检测并避开负载较高的过热区域,极大地提高了网络资源的利用率.两种协议均可有效提升网络有效承载容量,完成高性能(高吞吐量、低延时)的广播和组播路由.但是,从实验结果可知,RCA 和 RCAM 的包交付率均不够理想,这主要是缺乏可靠的广播和组播数据帧交付机制所致,过低的包交付率将极大地降低协议的实用性.此外,RCA 和 RCAM 还存在着集中式策略、度量指标计算复杂等有待改进之处.

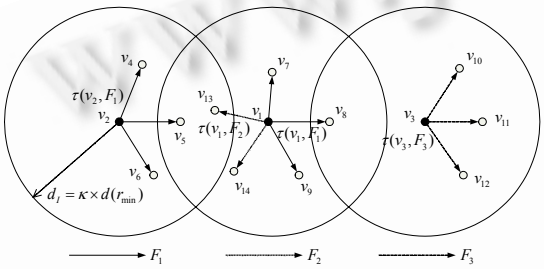

Fig.3 Example showing the interference among multiple transmissions

图 3 网络传输冲突示例

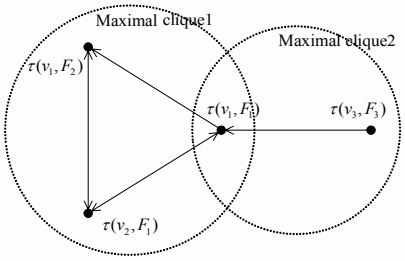

Fig.4 Conflict graph using maximal clique

图 4 基于最大集合的传输冲突图

2.2.4 DRF 和 RF[44,45]

文献[44]提出的分布式广播路由协议 DRF(distributed rate first)在全网范围内使用基于概率的方法选择数据包的转发节点集,旨在建立规模较小的网络 CDS 来完成数据的低延时广播.在 DRF 中,节点 i 以 $1/(K\delta_{im})$的概率选择传输速率 R_m 宣告成为转发节点,收到多个宣告信息的节点选择 R_m 最大的子树加入.路由构造的分布式使 DRF 具备良好的可扩展性,其速率优先的构造思想使转发节点更倾向于采取较高的传输速率.文献[45]同样基于这种速率优先的思想选择节点的传输速率,确立广播中继 CDS 以降低广播延时.RF(rate first)从源节点开始,首先在邻近覆盖节点集中选择具备非零最大速率值的节点集 S,然后在 S 中选取未覆盖邻居节点数最大的节点作为本次迭代的广播节点加入广播中继 CDS.RF 集中式的广播路由构造思想从 WCDS 改进而来,与 WCDS 的传输速率与传输范围的乘积(rate-area product,简称 RAP)选择策略相比,RF 优先考虑节点传输速率,这种做法可使构造过程尽快收敛,但与 DRF 一样,其也存在中间转发节点的规模较大的问题.

2.3 基于MR-MC单速率WMNs的组播路由协议

2.3.1 MCSP 和 BRCS[26,46]

MCSP(multi-channel self-pruning)[26]和 BRCS(broadcast routing and channel selection)[46]均从减小数据广播冗余的角度对路由进行优化,指出在 MR-MC 网络环境下,广播树的中继传输信道数相比中继传输节点数更适合作为广播冗余的度量标准.这两种协议的设计思想类似,都是基于 MR-MC 网络的射频信道映射图来计算中继传输信道数最小的广播路由,不同之处在于两者对中继传输信道数的定义和采取的网络映射策略上.在

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

MCSP 中,各相邻节点通过交互获取基于节点射频的本地有向图,通过该图来确定节点的转发状态和转发信道,而 BRCS 中的映射图 $\omega(G)$的节点则被分为影节点和信道节点两类,协议通过求解由 $\omega(G)$部分信道节点组成的最小核心集来间接获取原图 G 的 BRCS 树.该类协议所采用的扩展图为 MR-MC 网络的多射频、多信道处理提供了一种新思路,其以最小化转发信道数为目标,能够获取传输冗余较小的数据广播路由.但是,协议均假定输入网络已预先分配信道,并未考虑网络的射频信道分配问题.

2.3.2 MCM[47]

针对实际正交信道资源有限的问题,文献[47]对部分交叠信道间的干扰进行研究,指出不同信道间的干扰强度随信道间隔的增大而减小,并参考该结果提出一种基于部分交叠信道和正交信道的组播路由协议 MCM (multi-channel multicast).由于能够利用全部有效信道来降低相邻传输的干扰,提高邻近传输的并发性,该协议与一些单纯基于正交信道的协议相比可以进一步改善网络吞吐量、端到端延时等协议性能.

MCM 采取了路由构造优先信道分配随后的分步次优设计方法.在路由构造阶段,协议从源节点开始利用广度优先搜索建立初始分级结构,并可基于广播或组播需求分别从叶节点开始剔除冗余传输,从而达到为除源节点外的所有有效节点确立唯一父节点的目的.为进一步降低传输干扰,MCM 在信道分配阶段以最小化与一跳邻居间的总干扰距离为目标,为节点 u 同其子节点间的传输选择满足干扰强度 $F(u,c)$最小的候选信道 c.这种信道分配算法针对组播方式而设计,其在策略性地吸纳了部分交叠信道资源的同时也结合了 WBA 属性,能够有效降低传输干扰,提高协议性能.然而,其信道分配算法的设计仍存在不足:因为 $F(u,c)$的计算只考虑了节点 u 与一跳邻居间的干扰分布,所以节点 u 与其两跳邻居可能被分配相同的信道,两者的传输会在 u 的一跳邻居范围造成干扰,降低了分配算法的性能.此外,算法用于求解 $F(u,c)$的干扰因子δ依赖于传输速率以及具体网络属性,计算困难,而其随机选择最小 $F(u,c)$值信道的方式也无法保证可以获取最优的信道分配方案.

为解决上述问题,文献[19]提出了改进的信道分配算法 M4(minimum interference multi-channel multi-radio multicast).M4 的主要目的是确保信道 c 与节点 u 两跳邻居使用的信道的总信道间隔最大,从而尽量减小传输干扰比重.通过考虑节点 u 的两跳邻居干扰分布,M4 能够有效避免上述隐藏信道问题,而 $F(u,c)$只涉及到系统的传输信道,因此 $F(u,c)$值的获取也将更为简单快捷.文献[48]则给出另外一种信道分配算法 BFVC(breadth first vertex coloring).该算法为节点 u 选择满足干扰值 $F(u,c)$最小的候选信道 c 进行传输,然而文献并未给出求解所需的信道工作概率值的计算方法.当网络规模扩大时,BFVC 的计算同样困难,且算法信息的获取及维护会带来较高的额外开销.此外,文献[49]的 LCMR(load-aware and channel-constrained multicast)也提出一种干扰感知信道分配算法,其为端用户数较大的路由节点分配有限的正交信道,不过其不能保证所有端节点最终都能被覆盖完全.上述针对组播的信道分配策略存在一个共有问题是均只考虑最小化流内干扰,而对流间干扰均并未作具体优化处理.

2.3.3 Optimization-Based protocol[50−53]

与 MCM 等协议所采取的分步处理策略不同,文献[50]选择利用模拟退火(simulated annealing,简称 SA)算法来联合优化 MR-MC WMNs 网络环境下基于端到端延时约束的 QoS 组播路由和干扰最小化信道分配问题,相比分步策略或其他组合优化策略如局部搜索算法,这种策略更可能获取整体范围内的最优解.SA 算法采取在给定范围内随机搜索最优解的思想,其冷却进度表中各参数的设计是决定组合优化算法实现质量和效率的关键,选取不当则容易造成随机搜索效率低下,算法收敛性是设计时需考虑的一个难点.文献[51]则对保证 MR-MC WMNs 的网络最大信道利用率的广播问题进行研究,其联合路由、信道分配和传输调度来实现各并行广播流在网络各信道上的负载均衡,以最大化网络广播流量的总体承载能力.这类基于最优化理论与算法的优化求解策略可广泛应用于各种约束下的组播路由联合优化,其分析结果严谨,组播路由优化度高,但算法一般比较复杂,协议不易实现,已有的相关研究还有文献[52]的遗传算法、文献[53]的蚁群算法以及原始-对偶算法等.

2.4 基于MR^2-MC WMNs的组播路由协议

2.4.1 MSPT,MWT,LMT 和 PAMT[4,17]

小标题所示这 4 种协议的目的均在于结合射频、信道以及速率多样性来优化广播分发拓扑以最小化广播

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

延时.其中,MSPT 的拓扑构造方法由 Dijkstra 算法改进而来.在 MSPT(MR-MC shortest-path tree)中,虽然各源目的节点对间拥有最小延时路径,但由于网络射频信道是受限资源,各无线传输不可能无干扰的进行,且构造过程中未考虑 WBA,因此 MSPT 的构造算法难以获取较优的广播分发拓扑. MWT(MR-MC weighted CDS tree)、LMT(locally parallelized MR-MC Weighted CDS tree)及 PAMT(parallelized approximate-shortest MR-MC Weighted CDS tree)则是 WCDS 在 MR^2-MC WMNs 环境下的 3 种改进协议.在 MWT 中,有效覆盖节点的选择并未引入多射频、多信道并发传输的能力,因而未能充分利用网络的多射频、多信道资源,且当节点的射频和可用信道数目增加时,这一问题将更为明显.鉴于此,LMT 和 PAMT 对有效覆盖节点集进行了重新定义,相比 MWT 虽然增加了中间传输次数,但都不同程度地达到了利用多射频、多信道资源来增加数据传输并行度的目的,在网络的射频信道资源充足时,LMT 及 PAMT 的性能优势十分明显.

总体而言,它们的不足之处包括:协议针对单包单源设计,不能感知网络各信道上的流量负载和应用需求,因而协议的扩展性不高,应用场景受到限制.同时,通过实验可知,信道分配策略对广播协议性能的影响显著,而以上协议均假定输入网络已预先分配信道,并未考虑与射频信道分配策略的联合优化问题.因此,如何基于广播特点和需求来权衡高网络连通性和低传输冲突的影响,研究相匹配的协同信道分配策略也是协议需要继续完善的地方.此外,协议的复杂性、集中式、理想 MAC 调度以及节点间需要精确的时钟同步等限制依然存在.

2.4.2 PCDS[54]

实际基于 802.11 的 CSMA/CA 公平信道存取方式会导致相邻区域的吞吐量低于区域内使用的最低传输速率.因此,在理想的 MAC 调度方式下利用速率多样性设计的一些组播路由协议在实际环境下一般无法达到预期值.PCDS(parallelized CDS)即是针对多速率环境下低吞吐量问题对 PAMT 的一种改进协议,其在拓扑构造之前先依据具体网络参数,从可用传输速率集中选取 RAP 值最大的速率用于数据传输,以此方式达到在协议性能和实用性之间进行折中的目的.在实际操作中,如果给定网络的节点密度较低,则可能出现为维护网络连通性而无法选取 RAP 最大速率的情况,因此协议更适用于节点稠密的 MR^2-MC WMNs.PCDS 的拓扑构造及传输调度算法与原协议类似,且无须考虑多速率下的传输分组等问题,因而实现更为简单.由于其主要关注于限制多速率组播来提高协议在特定实际网络环境下的实用性,未充分发挥网络资源优势,牺牲了部分协议性能.

2.4.3 MRDT[18]

文献[18]提出的 MRDT(multi-radio distributed tree)是一种以最小化 MR^2-MC WMNs 广播延时为目的,基于局部网络拓扑信息,利用连通支配集辅助广播路由构造的分布式低延时广播路由协议,其是 MEW,MDW 及 MRRA 在多射频、多信道环境下的扩展.该分布式协议在设计时充分考虑并减轻了路由构造带来的计算开销和传输开销,因此具有较好的扩展性.MRDT 由初始标记算法 IM、邻居分组算法 NG、速率最大化算法 RM 和分发树构造算法 TC 这几部分构成,其对多射频、多信道的利用主要体现在速率最大化阶段.RM 算法提出了两步速率最大化策略:局部速率最大化 LRM 和外部速率最大化 ERM.其中,LRM 策略通过将低速邻居节点合理分配到各射频以提高节点射频的传输速率,而 ERM 策略则是借助具有公共信道的其他邻近标记节点射频来达到节点各射频速率增加的目的.在 MEW 等协议的基础上,MRDT 又结合了多信道并行传输的能力,可以自适应网络可用射频及信道资源,因而能获得较低的传输延时.实验表明,在基于 802.11 的实际网络环境中,分布式 MRDT 广播协议与集中式 PAMT 协议在广播延时上相当.不过 MRDT 也依然存在着与原协议类似的问题.

2.5 其他组播路由协议及相关研究工作

鉴于 WMNs 的网络结构和流量特征,如何利用 Mesh 网关与其他网络进行交互,实现异构网络环境下的组播路由也是网络面向实用化的关键之一.目前研究 Ad Hoc 网络与 Internet 互操作的文献中从该角度去考虑 WMNs 组播路由的研究工作还比较缺乏.文献[55]以 WMNs 组播与有线 IP 组播无缝互连为目标提出了一种 WMNs 集成组播路由方案.该方案使用前缀连续性(prefix continuity)为 Mesh 节点分配有序的全局路由地址,如图 5(a)所示.Mesh 节点与各 Mesh 网关进行周期性交互来建立到网关节点的最短路由或最稳定路由,基于 MMARP(multicast MANETs routing protocol)完成与有线 IP 组播的无缝互连,而对于 WMNs 内部组播则借用 MNT[32]协议的分布式方式完成,如图 5(b)所示.方案所采用的节点缺省网关发现机制能够有效控制组播数据转

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

发范围,降低网络控制开销,但其无负载感知的特点也容易导致各 Mesh 网关成为网络的性能瓶颈节点.文献[5]提出的 RMG 则主要关注于如何合理利用较稳定的有线资源来减少无线传输跳数,改进 WMNs 组播性能.源节点根据可负载感知的无线跳数阈值 K 选择可直接通信的目的节点建立直接访问域,通过网关利用有线链路为其他目的节点建立间接访问域,其分层架构如图 6 所示.这种分层的方式可以控制源目的节点对间的无线跳数,较大程度地减小中间转发节点的通信开销,从而提高协议的可扩展性,但其也要求 WMNs 拥有足够的网关资源可供利用.文献[56]提出了一种基于网关的负载均衡组播路由协议 GAMP(gateway associated multicast protocol).在 GAMP 中,Mesh 端节点或 Mesh 路由节点分别与各自的上层节点通过信息交互选取负载最轻的 Mesh 路由节点或 Mesh 网关节点进行注册,各层节点与下层中的组播源节点或目的节点进行信息交互建立并负责维护对应的组播路由信息,同层节点间进行信息交互共同完成网络负载的均衡,然而文献并未详述如何通过外部网络完成网关间的路由,且未给出其他网络节点的负载估计方法.这类协议的共同优点在于能够利用更为充足可靠的有线资源,但其难点也在于与有线网络的无缝连接上,可以将其同前述 WMNs 网内优化技术进行整合研究以考虑更好地提高 WMNs 组播路由性能.

一些研究人员从影响 WMNs 组播路由性能的各个侧面来进行理论研究和仿真实验,为 WMNs 组播路由协议设计提供了很多有参考价值的意见和数据.文献[6]对 SR-SC 单速率 WMNs 环境下的组播链路质量指标进行了研究.作者基于无线组播的特点对已有单播链路质量指标进行改进,给出了 5 种适用于 SR-SC 单速率 WMNs 组播的度量指标:PP,ETX,ETT,METX 和 SPP,并结合修改后的 ODMRP(on-demand multicast routing protocol)协议分别在仿真环境和真实实验平台下就 5 种度量指标对网络吞吐、传输延时以及协议控制开销等组播性能的影响进行比较分析,详细讨论了造成性能差异的各种原因,不过文献采取探针包测量的方式会使得到的度量具有不可靠性,一种更好的方式是基于跨层思想直接从底层获取实时信道环境信息进行度量计算.文献[7]研究比较了 SPTs,MSTs 和 MNTs 这 3 种组播树的组播性能.作者针对 3 种组播树的构造策略选择对应的组播路由协议进行仿真分析,在比较了 3 种组播树的包丢失率、吞吐量、端到端延时、延时抖动等性能后指出,基于 SPTs 的组播路由协议最适合在 WMNs 中部署,然而文献用于仿真的网络环境趋于理想化,其假定网络每跳的权值相同,仿真结果未能有效反映实际无线网络时变链路质量的影响.文献[57]分别选取 MOSPF(multicast open shortest path first),MAODV(multicast ad hoc on-demand distance vector)和 ODMRP 进行仿真实验,来分析比较前摄式和反应式组播路由协议在 WMNs 中的适用性.文献[58]则基于时间自由度对 WMNs 容错广播问题进行了理论研究.此外,文献[59]给出了一种混合式 QoS 组播路由框架,其在骨干网和终端网分别采用前摄式网状寻路和按需式树状寻路,以达到缩短骨干网络拓扑构造延时和降低终端网路由控制开销的目的,不过文献并未给出针对该框架的性能评估结果.

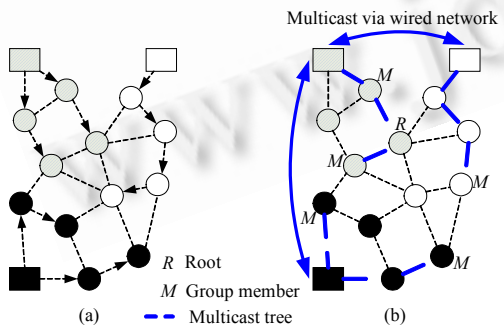

Fig.5 Integrated solution for multicast routing in WMNs based on prefix continuity

图 5 基于前缀连续性的 WMNs 集成组播路由方案

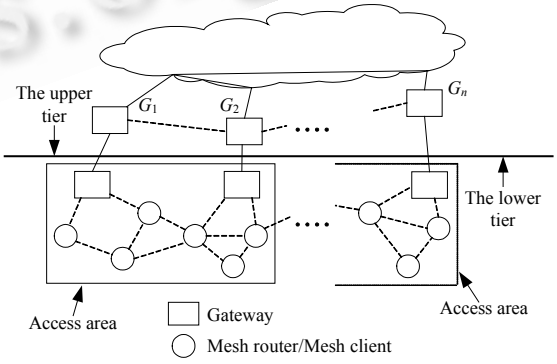

Fig.6 The two-tier integrated architecture of WMNs

图 6 WMNs 两层集成架构

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

3 多射频、多信道以及多速率对 WMNs 组播路由的影响分析

从上节对已有研究成果的分析可知,MR^2-MC 为 WMNs 组播路由提供了更多可用网络资源,为协议设计带来了更复杂的技术挑战和更广阔、更灵活的设计空间.多射频和多信道引入的空间自由度和并发传输能力可以有效均衡网络传输竞争强度,提高网络吞吐公平性,改善组播吞吐量和延时等性能.理论上,在资源允许的情况下,可以充分利用信道多样性来实现单组播流的完全并发传输,但对其不合理的利用也会导致单组播流占用过多信道资源,使信道使用效率下降,网络整体承载能力降低.网络速率多样性使组播传输节点可以采取不同的传输速率选择适当的子节点集进行 MAC 层本地广播,不同的传输速率拥有不同的接收灵敏度和传输信噪比,一般在节点定发射功率状态下,使用高速率可以降低组播分组单跳延时,缩小传输范围从而缓解单个传输的信道竞争强度,但高速率同时也增加了组播传输节点数,使网络传输数增大,增加网络冲突率,而且速率多样性也易造成网络链路的非对称性,加剧网络隐蔽站等问题.因此,MR^2-MC 会对组播路由优化及协议设计产生显著影响[16−19],使得 WMNs 的通信传输模型和传输干扰模型等底层通信环境发生改变,WMNs 组播路由所依赖的网络拓扑结构受信道分配、速率调节的控制趋于动态,WMNs 组播路由优化需要考虑的不确定因素更多,高性能协议设计更为复杂.

在多射频、多信道环境下,信道分配决定着 WMNs 组播路由所依赖的网络拓扑连通性和干扰分布,而 WMNs 组播路由所产生的链路通信负载又对信道分配产生影响.因此,WMNs 组播路由的优化与良好的信道分配密不可分[60],其研究重点在于如何合理考虑并量化多射频、多信道引入的信道多样性、信道切换花费、射频间干扰以及多信道交叉干扰等因子,提出适当的组播路由度量,以及如何联合动态信道分配进行网络拓扑优化.鉴于联合设计的复杂性,当前相关研究工作主要基于两者分离的次优方式进行,如 MCSP,BRCS,PAMT,PCDS 和 MRDT 等协议均未考虑信道分配问题.

已有针对多射频、多速率 WMNs 组播路由的研究成果中,大部分还是直接采取如 CCA,VCA 和 INSTC 等针对单播设计的静态信道分配策略获取组播路由所需网络拓扑.而实际上,由于组播与单播在传输方式上存在较大差别,那些针对单播的信道分配策略并不能有效运用于组播路由[4],且所采用的静态信道分配策略难以有效利用多信道资源,难以感知网络负载和组播路由带宽需求,无法为 WMNs 组播路由提供优化网络拓扑.良好的动态或混合信道分配策略可以联合 WMNs 组播路由解决这些问题,但其又会引入复杂的信道切换协调等问题.因此,如何针对多射频、多信道网络环境进行 WMNs 组播路由优化与设计还存在着很大的研究空间.

利用网络多速率特征进行 WMNs 组播路由性能优化的关键在于,如何结合其他设计约束为各组播传输节点策略性选择合适的 MAC 本地广播速率.协议通过动态改变速率大小,在保证目的组播节点可达、整体传输规模可控的前提下提高单跳传输性能,优化网络拓扑结构,降低网络竞争,协同其他约束为组播分组构造分发拓扑,从而有效提升组播路由质量.其优化一般需协同能够动态调节物理层广播速率的 MAC 层速率选择机制同步进行.除速率多样性外,多速率特征为 WMNs 组播路由还引入了多速率 MAC 组播[16,40]的附加设计自由度.这种方式可以让传输节点先选取关键子节点集采用最优速率进行优先传输,之后再进行到次关键节点的分组传输.在延时敏感的业务中,其能够更进一步提升组播路由性能,不过由于增加了分组传输次数,也可能导致组播吞吐量的下降,且一般都会增加组播路由带宽耗费,应针对特定业务需求合理运用.

基于网络的多速率特征来优化 WMNs 组播路由性能的研究相对较多,其中大部分工作均参考 RAP[16]为 MAC 本地广播选择最优速率或直接使用最大速率两种策略来进行组播分组的转发.RAP 为传输速率的有效性提供了一种判别准则,而如何为特定应用场景下的 WMNs 确定有效传输速率数目,如何保证最优传输速率组合的选取等问题决定了这类协议所使用速率的整体效率,目前针对该问题的研究还是空白,有待研究人员去解决.

由于 MR^2-MC 可以提高网络容量[61]、优化网络拓扑,能够有效改善 WMNs 组播路由的底层通信质量,为组播提供更多可用带宽资源,因此其对 WMNs 组播路由端到端延时、组播吞吐量等各方面的性能都有显著影响.已有研究表明[4],通过合理地运用信道多样性、速率多样性以及良好的全局 MAC 层广播调度,可以最大限度地降低组播路由端到端延时.本文利用图 7 所示的实例拓扑就这两种设计自由度以及 MAC 层多次广播能力对组播延时的影响进行比较,结果如图 8 所示.其中,Alt1,Alt2,Alt3 和 Alt4 分别表示 4 种不同设计空间下的分组传输

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

操作方式.可以看到,在充分利用 MR^2-MC 的情况下,Alt4 的传输延时能下降到 Alt1 的 1/3.文献[16]则从理论上分析了 MAC 层传输速率对广播路由性能的影响,提出利用传输速率与传输范围的乘积 RAP 来预测传输速率的有效性.其依据 Shannon 公式推出理想调制机制下 $RAP(=R\pi d^2)$为传输距离 d 的凸函数,存在极值速率使 RAP 最大.作者基于仿真结果得出以下结论:对于给定的一组传输速率组合,如果其他速率与最低速率相比较具备更高的 RAP 值,则使用该组合进行多速率广播,相对单速率可以降低传输延时,提高传输吞吐量,且 RAP 值越大的传输速率对路由性能影响越显著.

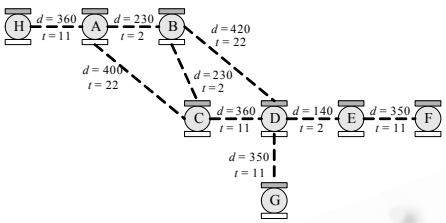

Fig.7 Sample WMNs topology illustrating multi-rate and multi-channel operation

图 7 演示多速率和多信道操作的 WMNs 实例拓扑

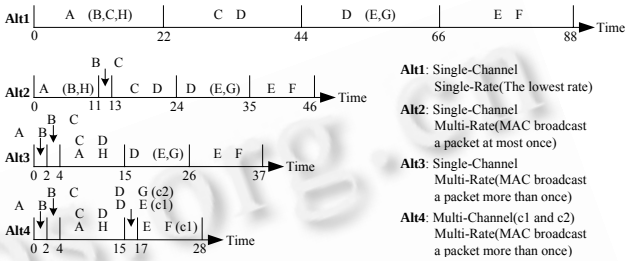

Fig.8 Comparison of delay for Alt1, Alt2, Alt3 and Alt4

图 8 4 种操作方式的传输延时比较

由上述分析可知,MR^2-MC 可以全面提升 WMNs 组播路由性能,但其也使得协议设计环境变得复杂,需要基于 MR^2-MC 对于组播路由性能优化以及协议设计的影响,联合适当的信道分配、速率调节和传输调度及其他设计因素,根据网络的实际混合业务 QoS 对组播路由进行研究,提出能够反映复杂网络特征、实际业务需求的度量指标,优化 WMNs 组播分发拓扑.另外,从上述影响分析可知网络层和 MAC 层的交互关系十分紧密,合并这两层的相应功能是提升组播路由性能的一种有效途径,然而目前还鲜有基于这类思路的研究工作.本文将在下节对组播路由跨层优化进行阐述.

4 面向实用化的 WMNs 组播路由跨层优化机制

考虑到 WMNs 多射频、多信道以及多速率的网络发展趋势和协议面向实际混合业务环境的实用化目标,单纯基于网络层对组播路由进行设计难以快速准确地感知和调度物理多射频、多信道以及多速率资源,难以适应通信容量和质量时变的无线链路,难以保证网络的最佳资源利用率和业务流的 QoS 需求.实际上,在研究面向实用化 WMNs 网络层组播路由时还应同时兼顾来自物理层、MAC 层、传输层乃至应用层的交互,例如物理层使用的传输功率和速率能够影响 MAC 层的吞吐量和网络层的路由决策,网络层的路由选择也会对 MAC 层的冲突级别造成影响[10].因此,WMNs 组播路由设计一般应依据具体网络环境和业务 QoS 需求部分或全部的考虑与链路干扰抑制、链路质量估计、射频信道分配及调度、速率调节、功率控制、网络拓扑控制、NC、带宽分配及调度、流/拥塞控制、差错控制等设计因素之间的制约关系,通过联合优化以期最大化特定约束下的系统组播性能,这种非层次化的统一设计模式虽然增加了系统的复杂度和通信开销,但却是一种必要的全局优化实现手段[1].

当前国内外已有部分工作讨论了 WMNs 组播路由跨层联合优化问题,除本文前述利用模拟退火算法[50]、遗传算法[52]以及蚁群算法[53]等最优化求解方法之外,一些学者还从其他方面采取不同设计组合对其进行研究.文献[62]联合 WMNs 组播路由和功率控制进行跨层优化,其依据对偶原理将系统吞吐量最大化联合优化问题分解为组播路由和功率控制两个层间独立子问题,并基于对偶变量来协调层间的资源需求和供给,通过迭代求解子问题和更新对偶变量来最终收敛到联合优化问题的全局最优解.同样,依据这种 Lagrange 对偶分解的求解思路,文献[63]对覆盖多播的流速率控制及流所消耗资源的最优分配进行组合优化研究.作者将流速率和链路功率消耗一起纳入网络效用最大化模型,并采用基于效用的定价机制动态进行链路功率控制和流速率调整,从

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

而达到网络效用最优的设计目标.

以上工作基于对偶分解最优化理论,从优化模型和数理分析方法上不仅对 WMNs 组播路由跨层优化进行研究,还进行了组合最优解的获取.但该类协议的复杂度普遍较高,对实际网络环境下分组组播性能的优化度还有待验证.文献[8]针对 WiMax 网络应用场景对基站和各用户站间的传输进行跨层优化.作者通过联合流接纳控制和信道全局调度保证流的带宽需求,采用应用层 Patching 技术确保请求节点能够加入已进行中的组播组,通过综合这些层间优化机制以最大化网络带宽利用率,提高全网负载承载能力.文献[9]联合流量工程对组播路由进行研究,通过对接入流请求进行接纳控制和为每个接纳流分别生成经过预处理的特殊拓扑来达到给组播路由提供流量工程的能力,这种方式有效地实现了流量的负载均衡,减小了链路带宽碎片影响,提高了带宽利用率和网络吞吐量.文献[39]使用 NC 对物理层、MAC 层和网络层进行联合优化以提高组播路由吞吐量.当节点获得发送机会时,其随机选择局部编码系数对输入缓冲区中的数据包进行编码,使用求取传输干扰和误包率平衡点所获取的最优发射功率将分组广播给所有邻居节点.文献[64]的 Pacifier 协议通过联合基于树的机会路由、NC、源速率控制以及数据包循环分批传输的策略来获取高吞吐的可靠组播传输.此外,文献[65]的 R-Code 也是一种基于 NC 的广播协议,其为各节点选取 ETX(expected transmission count)较小的可靠邻近节点作为父节点,进行数据的可靠接收和解码.NC 在理论上等同于点到点的 FEC 技术,将其纳入 WMNs 组播路由跨层优化中可以显著减小网络传输数,降低传输干扰,提高组播吞吐量,但也会改变节点原有存储转发策略,增加处理延时,且其需要数据分批发送,也会带来 crying baby 问题[64].在实际设计过程中,可以根据应用需求对组播吞吐量和端到端延时进行权衡,选取合适级别的 NC 来优化组播路由性能.

目前,针对多射频、多信道和多速率复杂网络环境下 WMNs 组播路由整体跨层优化的研究仍然较少,上述研究成果也主要关注于单频单信道和单速率网络层面的组播路由跨层优化,其所使用的通信模型和假定约束普遍比较理想,与实际物理通信技术基本脱节,高层协议难以快速感知实际不可靠物理信道的影响.如何基于实测环境将 MIMO、OFDM 等实际物理通信技术同上层网络设计相结合,利用跨层优化技术实现物理层复杂网络资源的准确感知和快速调度,结合应用层 QoS 需求辅助网络完成高效的资源分配和流量调度,是 WMNs 组播路由性能得到继续提升的关键.这类面向实际通信环境的整体跨层优化研究将是 WMNs 组播路由研究的主要方向,也是协议面向实用化的有效途径,需要研究人员作进一步地深入研究.

5 WMNs 组播路由协议比较

WMNs 网络特征复杂、应用场景广阔,因此前述 WSN 组播路由协议也呈现出多样性的特点,为使大家能够对目前 WMNs 组播路由协议有一个整体、直观的了解,本节采取列表方式主要对第 2 节中重点分析的协议进行了综合比较.表 1 对这些协议的特点进行比较,比较的范围包括优化目标、路由结构、设计空间和实现方式等方面.表 2 对这些协议的性能进行比较,比较的范围包括协议的路由开销、吞吐量、时延、鲁棒性、可量测性以及网络带宽花费等性能指标.

6 总结和展望

近年来,研究人员针对 WMNs 组播路由进行了大量研究,提出了许多新的组播路由协议和优化策略.由于这些研究面向的具体应用场景、优化的性能指标、关注的网络特征和采取的技术手段各不相同,因而所提出的组播路由协议效果各异.在对已有研究成果进行分析和比较后可以了解到,这些成果大部分从网络层面联合相邻层进行组播路由某一种或几种性能的优化,尚缺乏针对复杂网络特征和混合业务需求下 WMNs 组播路由的整体优化研究.另外,这些成果基本都是基于理论分析和仿真实验所得出,协议设计使用的传输模型、干扰模型以及其他假定约束普遍较理想,难以准确反映实际特定业务环境下的无线通信质量和流量特征.因此一般与实测所得到的性能效果也存在差别.除 SwanMesh[66]等少数项目外,现有研究中基于原型系统来指导 WMNs 组播路由优化设计的工作还不多见.

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

Table 1 Comparison of characteristics of multicast routing protocol for WMNs

表 1 WMNs 组播路由协议特点比较

Protocol	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
MNT	√					√					√			√
MDM				√			√			√	√			
WCDS			√			√			√	√	√			
MDW			√			√			√	√	√			√
RCA					√	√			√	√	√			
RCAM					√	√			√	√	√			
DRF			√			√			√	√	√			√
RF			√			√			√	√	√			
MCSP	√					√		√		√	√			√
MCM		√				√		√		√	√			
SA-Based	√					√		√		√	√	√		
PAMT			√			√		√	√	√	√			
PCDS			√			√		√	√	√	√			
MRDT			√			√		√	√	√	√			√
Prefix-Based						√				√	√		√	√
RMG		√			√	√		√		√	√		√	√

A: Minimizing bandwidth consumption; B: Maximizing throughput; C: Minimizing latency; D: Improving reliability; E: Resource-Aware; F: Tree-Based structure; G: Mesh-Based structure; H: Using channel-diversity; I: Using rate-diversity; J: Periodic message; K: Loop free; L: Cross-Layer optimization; M: Based on Mesh gateway; N: Distributed deployment

Table 2 Comparison of performance of multicast routing protocols for WMNs

表 2 WMNs 组播路由协议性能比较

Protocol	Main routing overhead	Throughput	Latency	Robustness	Scalability	Bandwidth consumption
MNT	• Limited flooding of ST_JOIN • Full flooding of RREQ	Moderate	Moderate	Rather good	Moderate	Low
MDM	Topology graph updates	Rather high	Moderate	Good	Poor	High
WCDS	Topology graph updates	Rather high	Low	Poor	Poor	Moderate
MDW	• Neighbor table updates • Limited flooding of RREQ	Moderate	Low	Rather good	Moderate	Moderate
RCA	• Topology graph updates • Conflict graph updates	High	Rather low	Moderate	Poor	Low
RCAM	• Topology graph updates • Conflict graph updates	High	Rather low	Moderate	Poor	Low
DRF	Neighbor table updates	Moderate	Low	Moderate	Moderate	Moderate
RF	Topology graph updates	Moderate	Low	Poor	Poor	Moderate
MCSP	• Neighbor table updates • Routing history inf. in packet header	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Low
MCM	Tree mesh updates	High	Rather low	Moderate	Poor	Rather low
SA-Based	Topology graph updates	Rather high	Rather low	Poor	Poor	Low
PAMT	Topology graph updates	Rather high	Low	Poor	Poor	Moderate
PCDS	Topology graph updates	Moderate	Rather low	Poor	Poor	Moderate
MRDT	• Neighbor table updates • Limited flooding of RREQ	Moderate	Low	Rather good	Moderate	Moderate
Prefix-Based	Limited flooding of GW_INFO, MCAST_RREP	Rather high	Moderate	Rather good	Good	Rather low
RMG	Limited flooding of AREA_CONSTRUCTION, *et al.*	High	Rather low	Rather good	Good	Low

从目前的发展现状看,WMNs 组播路由的研究仍处于起始阶段.在日趋复杂的网络环境和面向实际的混合业务需求驱动下,一个好的组播路由协议应该能够有机结合适当的信道分配策略和速率选择机制来优化由多射频、多信道以及多速率等带来的动态网络拓扑,快速感知底层链路通信质量,充分发掘组播路由可用带宽资源;能够自适应网络流量负载和业务 QoS 需求进行组播选路,有效协同带宽分配实现网络流量的合理调度,在满足个体分组路由需求的同时提升网络带宽资源的利用率.要达到这些要求,还存在许多基础性问题和关键技术有待进一步研究和完善:

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

(1) 在多射频、多信道网络环境下,WMNs 组播路由是一个跨层优化问题,良好的路由协议需协同适当的信道分配策略同步进行,不合理的信道分配可能导致多信道隐藏终端、拓扑割裂以及带宽分配不公等问题,反而降低网络吞吐,恶化组播性能.如何利用网络组播流量特征和物理信道质量,联合网络层组播路由和 MAC 层信道分配,在保证已承载组播流 QoS 不降级、网络控制数据包传输高可靠和实时性前提下寻求信道差异和可用网络容量二者间的平衡以充分发掘网络射频信道资源,是相当有挑战性的问题.

(2) 网络多速率特征为 WMNs 组播路由提供了灵活度,在传输功率恒定时,通过动态选择传输速率进行分组 MAC 本地广播,可以在保证网络连通的条件下减小传输冲突域,提高单次传输质量.然而速率多样性也使得网络链路具有非对称性,加剧了网络隐蔽站问题,降低了传输公平性,且较高速率的选择易增加组播传输数,增大网络冲突率.因此,如何降低速率多样性带来的不良影响,在各项性能间求得平衡,为 MAC 本地广播选取最优的传输速率,是理论与实践中的挑战.

(3) WMNs 的流量特性决定了 Mesh 网关以及一些中心节点易成为网络的流量瓶颈节点,不考虑网络已有流量负载和接入组播流 QoS 需求的组播路由极易造成各关键节点处的局部流量过热,带宽分配不公,网络资源得不到合理利用[67].如何研究链路质量、流量负载感知的组播路由度量,基于实时网络流量分布和网络节点间不同速率不同信道下的链路容量来动态估计可用带宽,联合有效的带宽分配和调度,迭代更新组播路由分发拓扑,动态适应网络组播业务流量变化是保证网络负载均衡、组播服务质量,提高带宽利用率的关键.由于流量分布的随机不确定性和无线链路质量的时变性,链路可用带宽的精确量化是其中的难点.

(4) WMNs 组播路由协议的最终设计目标是面向实用,在实际混合业务 QoS 需求和复杂网络环境下,组播路由性能优化可归纳为多约束条件下的组合全局最优化求解问题.在这些优化目标中,有些指标之间相互矛盾,例如组播数据流传输的高吞吐和公平性.此外,有些针对特定组播业务的目标需要首先得到满足,如实时多媒体业务所需要考虑的时延和抖动.因此,如何结合具体的业务背景在多目标之间进行折中,使组播路由优化达到最佳性能效果,是协议设计的关键.

(5) 建立基于实测的分析模型是协议面向实用化的一个重要手段,但实际 WMNs 所存在的链路质量时变、拓扑不稳定、流量分布随机化、组播性能优化各约束相互交叉制约等诸多不利因素使得建立这样一个模型具有相当困难性.如何设计实测场景,基于实测数据提取网络流量中的关键随机属性及底层通信环境对组播路由的影响因子,建立分析模型对协议进行综合评估是协议有效设计的基础,而如何保证模型的精确性又具有相当的挑战性.

(6) WMNs 的网络部署目标决定了其应当能够融合其他异构网络,实现网络间的互连互通,而 WMNs 与这些异构网络特别是 Internet 等有线网络之间存在的显著结构和性能差异又使得这种异构互连变得困难.对于 WMNs 组播路由而言,如何在这种异构网络环境下实现分组的无缝组播交互将是协议面向实用化的又一重要研究问题.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是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们表示感谢.

References:

[1] Akyildiz IF, 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] Moustafa H, Labiod H. Multicast routing in mobile ad hoc networks. Telecommunication Systems, 2004,25(1,2):65−88. [doi: 10.1023/B:TELS.0000011197.64522.41]

[3] Deb S, Jaiswal S, Nagaraj K. Real-Time video multicast in WiMAX networks. In: Gorinsky S, Kuzmanovic A, eds. Proc. of the 27th IEEE Communications Society Conf. on Computer Communications (INFOCOM). Piscataway: IEEE Press, 2008. 2252−2260.

[4] Chou CT, Qadir J, Lim JG, Misra A. Advances and challenges with data broadcasting in wireless mesh networks. IEEE Communications Magazine, 2007,45(11):78−85. [doi: 10.1109/MCOM.2007.4378325]

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

[5] Tu WQ, Sreenan CJ, Chou CT, Misra A, Jha S. Resource-Aware video multicasting via access gateways in wireless mesh networks. In: Sarac K, ed. Proc. of the 16th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols, ICNP 2008. Los Alamitos: IEEE Computer Socitey, 2008. 43−52. [doi: 10.1016/j.adhoc.2007.07.005]

[6] Roy S, Koutsonikolas D, Das S, Hu YC. High-Throughput multicast routing metrics in wireless mesh networks. Ad Hoc Networks, 2008,6(6):878−899.

[7] Nguyen UT. On multicast routing in wireless mesh networks. Computer Communications, 2008,31(7):1385−1399. [doi: 10.1016/j.comcom.2008.01.022]

[8] Xie F, Hua KA, Jiang N. A cross-layer framework for video-on-demand service in multi-hop WiMax mesh networks. Computer Communications, 2008,31(8):1615−1626. [doi: 10.1016/j.comcom.2008.01.042]

[9] Rong B, Qian Y, Lu KJ, Hu RQY. Enhanced QoS multicast routing in wireless mesh networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2008,7(6):2119−2130. [doi: 10.1109/TWC.2008.070089]

[10] Nguyen UT, Nguyen HL. Multicast routing algorithms: From the Internet to wireless networks. Technical Report, CSE-2008-08, Toronto: York University, 2008.

[11] Waharte S, Boutaba R, Iraqi Y, Ishibashi B. Routing protocols in wireless mesh networks: Challenges and design considerations. Multimedia Tools and Applications, 2006,29(3):285−303. [doi: 10.1007/s11042-006-0012-8]

[12] Katti S, Rahul H, Hu WJ, Katabi D, Medard M, Crowcroft J. XORs in the air: Practical wireless network coding. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2008,16(3):497−510. [doi: 10.1109/TNET.2008.923722]

[13] Yang YL, Wang J. Design guidelines for routing metrics in multihop wireless networks. In: Gorinsky S, Kuzmanovic A, eds. Proc. of the 27th IEEE Communications Society Conf. on Computer Communications (INFOCOM). Piscataway: IEEE Press, 2008. 2288−2296.

[14] Keegan B. Optimization of multicast routing in wireless mesh networks. In: Hofmann M, Murnion P, Nolan B, eds. Proc. of the 8th Int'l Conf. on Information Technology and Telecommunication. Galway: GMIT Press, 2008. 195−198.

[15] Koutsonikolas D, Hu YC. Exploring the design space of reliable multicast protocols for wireless mesh networks. Ad Hoc Networks, 2009,7(5):932−954. [doi: 10.1016/j.adhoc.2008.08.005]

[16] Chou CT, Misra A, Qadir J. Low-Latency broadcast in multirate wireless mesh networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006,24(11):2081−2091. [doi: 10.1109/JSAC.2006.881621]

[17] Qadir J, Misra A, Chou CT. Minimum latency broadcasting in multi-radio multi-channel multi-rate wireless meshes. In: Yarvis M, Zorzi M, eds. Proc. of the 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Adhoc Communications and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2007. 80−89.

[18] Qadir J, Chou CT, Misra A, Lim JG. Localized minimum-latency broadcasting in multi-radio multi-rate wireless mesh networks. In: Kim SH, Mingozzi E, eds. Proc. of the 2008 IEEE Int'l Symp. on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Piscataway: IEEE Computer Society, 2008. 201−212.

[19] Nguyen HL, Nguyen UT. Channel assignment for multicast in multi-channel multi-radio wireless mesh networks. Wireless Communications and Mobile Computing, 2009,9(4):557−571. [doi: 10.1002/wcm.701]

[20] Raniwala A, Chiueh TC. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh networks. In: Makki K, Knightly E. eds. Proc. of the IEEE Infocom 2005. Los Angeles: IEEE Computer Society, 2005. 2223−2234.

[21] Koutsonikolas D, Das SM, Hu YC. An interference-aware fair scheduling for multicast in wireless mesh networks. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2008,68(3):372−386. [doi: 10.1016/j.jpdc.2007.05.007]

[22] Dong J, Curtmola R, Nita-Rotaru C. On the pitfalls of high-throughput multicast metrics in adversarial wireless mesh networks. In: Schurgers C, ed. Proc. of the 5th Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Piscataway: IEEE Computer Society, 2008. 224−232.

[23] Kim J, Bahk S. Design of certification authority using secret redistribution and multicast routing in wireless mesh networks. Computer Networks, 2009,53(1):98−109. [doi: 10.1016/j.comnet.2008.09.017]

[24] Shin S, Hur J, Lee HJ, Yoon H. Bandwidth efficient key distribution for secure multicast in dynamic wireless mesh networks. In: Win MZ, ed. Proc. of the 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New York: IEEE Press, 2009. 1−6.

[25] Dai L, Xue Y, Chang B, Cao YC, Cui Y. Integrating traffic estimation and routing optimization for multi-radio multi-channel wireless mesh networks. In: Gorinsky S, Kuzmanovic A, eds. Proc. of the 27th IEEE Communications Society Conf. on Computer Communications (INFOCOM). Piscataway: IEEE Press, 2008. 502−510.

[26] Li L, Qin B, Zhang CY, Li HY. Efficient broadcasting in multi-radio multi-channel and multi-hop wireless networks based on self-pruning. In: Perrott R, Chapman BM, Subhlok J, eds. Proc. of the High Performance Computing and Communications – 3rd Int'l Conf. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 484−495.

[27] Kumar KSA, Hegde S. Multicasting in wireless mesh networks: Challenges and opportunities. In: Mahadevan V, Xie Y, eds. Proc. of the 2009 Conf. on Information Management and Engineering. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009. 514−518.

[28] Gupta P, Kumar PR. The capacity of wireless networks. IEEE Trans. on Information Theory, 2000,46(2):388−404. [doi: 10.1109/18.825799]

[29] Li JY, Blake C, Couto DSJD, Lee HI, Morris R. Capacity of ad hoc wireless networks. In: Basagni S, Sivalingam K, eds. Proc. of the 7th ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2001. 61−69.

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

[30] Li XY. Multicast capacity of wireless ad hoc networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2009,17(3):950−961. [doi: 10.1109/TNET.2008.927256]

[31] Yang PL, Chen GH. Research raradigm of capacity analysis and optimizing theory on wireless mesh network. Journal of Software, 2008,19(3):687−701 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/687.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.00687]

[32] Ruiz PM, Gomez-Skarmeta AF. Heuristic algorithms for minimum bandwidth consumption multicast routing in wireless mesh networks. In: Syrotiuk VR, Chavez E, eds. Proc. of the ADHOC-NOW 2005. LNCS 3738, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 258−270.

[33] Murthy S, Goswami A, Sen A. Interference-Aware multicasting in wireless mesh networks. In: Akyildiz IF, Sivakumar R, Ekici E, eds. Proc. of the Networking 2007. LNCS 4479, Berlin: Springer-Verlag, 2007. 299−310.

[34] Zhao X, Chou CT, Guo J, Jha S. Protecting multicast sessions in wireless mesh networks. In: Elmallah E, Christensen K, Frank M, eds. Proc. of the 31st IEEE Conf. on Local Computer Networks. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2006. 467−474.

[35] Koutsonikolas D, Hu YC. The case for FEC-Based reliable multicast in wireless mesh networks. In: Felici M, ed. Proc. of the 37th Annual IEEE/IFIP Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks. Piscataway: IEEE Computer Society, 2007. 491−500.

[36] Zhao X, Chou CT, Guo J, Jha S, Misra A. Probabilistically reliable on-demand multicast in wireless mesh networks. In: Kim SH, Mingozzi E, eds. Proc. of the 2008 IEEE Int'l Symp. on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Piscataway: IEEE Computer Society, 2008. 282−290.

[37] Yang L, Zheng G, Hu XH. Research on network coding: A survey. Journal of Computer Research and Development, 2008,45(3):400−407 (in Chinese with English abstract).

[38] Katti S, Katabi D, Balakrishnan H, Medard M. Symbol-Level network coding for wireless mesh networks. Computer Communication Review, 2008,38(4):401−412. [doi: 10.1145/1402946.1403004]

[39] Viet DTM, Chau NH, Lee W, Thuy HQ. Using cross-layer heuristic and network coding to improve throughput in multicast wireless mesh networks. In: Lee J, ed. Proc. of the 2008 Int'l Conf. on Information Networking. Piscataway: IEEE Computer Society, 2008. 459−463.

[40] Chou CT, Misra A. Low latency multimedia broadcast in multi-rate wireless meshes. In: Lee SJ, Mohapatra P, eds. Proc. of the 1st IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks. Piscataway: IEEE Press, 2005. 54−63.

[41] Qadir J, Chou CT, Misra A, Lim JG. Localized minimum-latency broadcasting in multi-rate wireless mesh networks. In: Foschini L, ed. Proc. of the 2007 IEEE Int'l Symp. on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Piscataway: IEEE Computer Society, 2007. 252−259.

[42] Chou CT, Liu BH, Misra A. Maximizing broadcast and multicast traffic load through link-rate diversity in wireless mesh networks. In: Foschini L, ed. Proc. of the 2007 IEEE Int'l Symp. on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Piscataway: IEEE Computer Society, 2007. 44−55.

[43] Liu BH, Chou CT, Misra A, Jha S. Rate-Diversity and resource-aware broadcast and multicast in multi-rate wireless mesh networks. Mobile Networks and Applications, 2008,13(1-2):38−53. [doi: 10.1007/s11036-008-0029-5]

[44] Wang T, Li B, Yang ZK, Cheng WQ. A minimized latency broadcast in multi-rate wireless mesh networks: Distributed formulation and rate first algorithm. In: Zeng WJ, Shi YC, eds. Proc. of the 2007 IEEE Int'l Conf. on Multimedia and Expo. Piscataway: IEEE Computer Society, 2007. 1786−1789.

[45] Wang T, Du X, Cheng WQ, Yang ZK, Liu W. A fast broadcast tree construction in multi-rate wireless mesh networks. In: Irvine J, ed. Proc. of the 2007 IEEE Int'l Conf. on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2007. 1722−1727.

[46] Han K, Li YL, Guo QY, Xiao MJ. Broadcast routing and channel selection in multi-radio wireless mesh networks. In: Xiao CS, ed. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. 2008. New York: IEEE Press, 2008. 2188−2193.

[47] Zeng GK, Wang B, Ding Y, Xiao L, Mutka M. Multicast algorithms for multi-channel wireless mesh networks. In: Xu K, ed. Proc. of the 2007 IEEE Int'l Conf. on Network Protocols. Piscataway: IEEE Press, 2007. 1−10.

[48] Yin ZY, Li ZC, Chen M. A novel channel assignment algorithm for multicast in multi-radio wireless mesh networks. In: Aguiar RL, Elmaghraby A, eds. Proc. of the 12th IEEE Symp. on Computers and Communications. New York: IEEE Press, 2007. 283−288.

[49] Yang WL, Tung CH. An interference-free multicast for mesh networks with directional antennas. In: Yoo SJ, Kim KH, eds. Proc. of the 1st Int'l Conf. on Ubiquitous and Future Network. New York: IEEE Press, 2009. 171−176.

[50] Cheng H, Yang SX. Joint multicast routing and channel assignment in multiradio multichannel wireless mesh networks using simulated annealing. In: Li X, Kirley M, eds. Proc. of the SEAL 2008. LNCS 5361, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 370−380.

[51] Chiu HS, Yeung KL, Lui KS. Maximizing broadcast load in multi-channel multi-interface wireless mesh networks. In: Bourgeois EK, ed. Proc. of the 2008 IEEE Global Telecommunications Conf. New York: IEEE Press, 2008. 533−537.

[52] Ke ZW, Li LY, Sun Q, Chen NS. A QoS Multicast routing algorithm for wireless mesh networks. In: Feng WY, Gao F, eds. Proc. of the SNPD 2007. Piscataway: IEEE Computer Society, 2007. 835−840.

[53] Pan DR, Xue Y, Zhan LJ. A multicast wireless mesh network routing algorithm with ant colony optimization. In: Lee J, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Wavelet Analysis and Pattern Recognition 2008. Piscataway: IEEE Computer Society, 2008. 744−748.

[54] Qadir J, Chou CT, Misra A. Exploiting rate diversity for multicasting in multi-radio wireless mesh networks. In: Elmallah E, Christensen K. Frank M, eds. Proc. of the 31st IEEE Conf. on Local Computer Networks. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2006. 287−294.

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

[55] Ruiz PM, Galera FJ, Jelger C, Noel T. Efficient multicast routing in wireless mesh networks connected to Internet. In: Chlamtac I, ed. Proc. of the 1st Int'l Conf. on Integrated Internet Ad hoc and Sensor Networks. New York: ACM Press, 2006. 26−35.
[56] Zhao L, Al-Dubai A, Liu XD. A new multicast routing algorithm for the wireless mesh networks. In: Abuelmaatti O, ed. Proc. of the 9th Annual PostGraduate Symp. on the Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting. Liverpool: LJMU Press, 2008. 151−156.
[57] Azad MS, Anwar F, Rahman MA, Abdalla AH, Priantoro AU, Mahmoud O. Performance comparison of proactive and reactive multicast routing protocols over wireless mesh networks. Journal of Computer Science and Network Security, 2009,9(6):55−62.
[58] Xin Q, Zhang Y. Optimal fault-tolerant broadcasting in wireless mesh networks. In: Abdallah M, ed. Proc. of the 2008 Int'l Conf. on High Performance Switching and Routing. Piscataway: IEEE Computer Society, 2008. 151−157.
[59] Shittu WA, Hashim AHA, Anwar F, Al-Khateeb W. A proposed qos multicast routing framework for next-generation wireless mesh network. Int'l Journal of Computer Science and Network Security, 2008,8(9):280−284.
[60] Kyasanur P, So J, Chereddi C, Vaidya NH. Multi-Channel mesh networks: challenges and protocols. IEEE Wireless Communications, 2006,13(2):30−36. [doi: 10.1109/MWC.2006.1632478]
[61] Lin XJ, Rasool S. A distributed joint channel-assignment, scheduling and routing algorithm for multi-channel ad hoc wireless networks. In: Ramasubramanian S, ed. Proc. of the 26th IEEE Communications Society Conf. on Computer Communications (INFOCOM). Piscataway: IEEE Press, 2007. 1118−1126.
[62] Yuan J, Li ZP, Yu W, Li BC. A cross-layer optimization framework for multihop multicast in wireless mesh networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006,24(11):2092−2103. [doi: 10.1109/JSAC.2006.881617]
[63] Zhu CT, Yang ZK, Cheng WQ, Wu D, Yan H. Overlay multicast strategy based on utility optimization for wireless mesh networks. Journal on Communications, 2008,29(6):106−112 (in Chinese with English abstract).
[64] Koutsonikolas D, Hu YC, Wang CC. Pacifier: High-Throughput, reliable multicast without "crying babies" in wireless mesh networks. In: Ziviani A, Li Q, eds. Proc. of the 28th IEEE Communications Society Conf. on Computer Communications (INFOCOM). Piscataway: IEEE Press, 2009. 2473−2481.
[65] Yang ZY, Li M, Lou WJ. A network coding approach to reliable broadcast in wireless mesh networks. In: Liu B, Bestavros A, Du DZ, eds. Proc. of the WASA 2009. LNCS 5682, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 234−243.
[66] Iqbal M, Wang XH, Wertheim D, Zhou X. SwanMesh: A multicast enabled dual-radio wireless mesh network for emergency and disaster recovery services. Journal of Communications, 2009,4(5):298−306.
[67] Luo L, Raychaudhuri D, Liu H, Wu MQ, Li DK. Joint association, routing and bandwidth allocation for wireless mesh networks. In: Bourgeois EK, Grosz FB, eds. Proc. of the 2008 IEEE Global Telecommunications Conf. New York: IEEE Press, 2008. 600−605.

附中文参考文献:

[31] 杨盘隆,陈贵海.无线网状网容量分析与优化理论研究.软件学报,2008,19(3):687−701. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/687.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001. 2008.00687]
[37] 杨林,郑刚,胡晓惠.网络编码的研究进展.计算机研究与发展,2008,45(3):400−407.
[63] 朱翠涛,杨宗凯,程文青,吴砥,严鹤.无线 mesh 网络中基于效用最优的覆盖多播策略.通信学报,2008,29(6):106−112.

方艺霖(1983－),男,湖北罗田人,博士生,主要研究领域为无线 Mesh 网络,网络组播.

刘新华(1974－),男,副教授,主要研究领域为无线自组织网络.

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自组织网络,新型网络体系结构,嵌入式系统.

马小林(1984－),男,硕士生,主要研究领域为无线自组织网络.

吴鹏(1983－),男,博士生,主要研究领域为无线自组织网络.

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn