ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.21, No.10, October 2010, pp.2542−2553
doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03740
© 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

无线多跳网络中的机会路由*

田 克[1,2], 张宝贤[2,3], 马 建[4], 姚 郑[2+]

[1](北京邮电大学 网络与交换国家重点实验室,北京 100876)
[2](中国科学院 研究生院 泛在与传感网研究中心,北京 100049)
[3](中国科学院 微电子研究所 物联网研究中心,北京 100029)
[4](诺基亚中国研究中心,北京 100176)

Opportunistic Routing Protocols for Wireless Multihop Networks

TIAN Ke[1,2], ZHANG Bao-Xian[2,3], MA Jian[4], YAO Zheng[2+]

[1](State Key Laboratory of Networking & Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)
[2](Research Center of Ubiquitous Sensor Networks, Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
[3](Research Center of Internet of Things, Institute of Microelectronice, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)
[4](Nokia Research Center, Beijing 100176, China)
+ Corresponding author: E-mail: yaozheng@gucas.ac.cn, http://ccce.gucas.ac.cn

Tian K, Zhang BX, Ma J, Yao Z. Opportunistic routing protocols for wireless multihop networks. *Journal of Software*, 2010,21(10):2542−2553. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3740.htm

Abstract: Opportunistic routing can largely improve the performance of wireless multihop networks by taking advantage of the broadcasting nature of wireless medium. In this paper, the basic idea behind opportunistic routing is introduced, and then the paper looks to classify existing work in this area based on different criteria. A comprehensive survey on typical opportunistic routing protocols is given. This paper introduces, in details, how each of these protocols work, and then the paper discusses about their merits and drawbacks. Finally, this paper concludes with some issues that still need to be resolved in this area in hopes of stimulating future research on this topic.
Key words: opportunistic routing; reliability transmission; network coding; wireless multihop networks

摘 要: 机会路由通过充分利用无线信道的广播特性,可以大大提高无线多跳网络的性能.从阐述机会路由的基本思想开始,介绍了机会路由协议的主要特点、适用环境和影响机会路由性能的重要因素.在此基础上,对重要机会路由协议进行了综述,讨论不同协议的工作机制及其优缺点.最后,探讨了机会路由的一些未来发展方向,以期为这一领域的发展提供一些有意义的借鉴.
关键词: 机会路由;可靠传输;网络编码;无线多跳网络

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60970137 (国家自然科学基金); the National Key Special Program of China under Grant Nos.2009ZX03006-001-02, 2009ZX03006-006 (国家重大专项); the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences under Grant No.KGCX2-YW-120 (中国科学院知识创新工程项目)

Received 2009-05-12; Accepted 2009-09-03

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

1 引 言

在无线自组织网络、无线 mesh 网络和无线传感器网络(统称“无线多跳网络”)中,各节点既可以作为数据的终端节点,也可以是网络的路由节点.无线链路动态、时变和丢失特性,导致无线链路质量较差且稳定性较低,这对提高无线多跳网络的吞吐量和传输可靠性提出了挑战.另外,节点移动性带来的链路不稳定、节点能量的有限性也给路由协议的设计及优化带来困难.然而,无线信道的广播特性是其先天的优势,机会路由(opportunistic routing)正是利用了无线信道的这一特性来提高无线网络的传输可靠性和端到端的吞吐率.

需要说明的是,间歇性连接(intermittently connected)移动 Ad Hoc 网络和容迟网络(delay tolerant network,简称 DTN)中的路由选择(有些工作中,也将这类网络中的路由协议称作机会路由协议)[1]也是当前的热点问题之一.这类网络中,节点之间的连通性是间歇性的,因而传统路由机制不再适用.这类网络常常利用节点的移动来携带信息、创造新的通信机会,最终期望以较高的成功概率实现端到端通信.通常,这类网络中分组投递延迟很大(如几分钟乃至几小时).本文研究面向任意时刻总是连通的无线多跳网络,所针对的应用延迟要求较小(如几百毫秒到 1~2 秒),所研究的机会路由协议主要考虑如何利用无线链路的广播特性和终端的空间多样性来提高无线网络吞吐量和传输可靠性.除非特殊声明,下面的讨论中将不再涉及这类间歇性连通的无线网络.

1.1 机会路由基本思想及其优势

传统无线自组织网络和传感器网络的路由协议都采用确定性路由方式(如 AODV(ad hoc on-demand distance vector routing)[2],directed diffusion[3]),即:在端到端的数据传输过程中,首先建立一条端到端的节点序列,然后在每次分组转发时,首先确定一个下一跳节点,再执行链路层转发.如果传输过程中发生分组丢失或差错,则启动链路层重传.在链路质量和稳定性较差的环境下,频繁的链路层数据重传将消耗大量的带宽资源.因此,尽管确定性路由方式逻辑简单,但未能充分考虑无线信道的广播特性、时变特性和干扰不规则性.无线信道的广播特性使得一次分组转发可能被多个节点收到,且接收概率各不相同;无线链路的时变特性导致网络中链路的状态随时间而改变.路由协议设计过程中如果缺乏对信道广播和丢失特性的充分考虑,必将导致大量网络资源无谓浪费,这将严重影响无线多跳网络的吞吐量和提供服务质量的能力.

针对无线信道的广播、时变、丢失特性和确定性路由策略的不足,麻省理工学院(MIT)的 Biswas 等人于 2004 年率先提出了机会路由(也称作机会转发)的概念[4,5].机会路由通过多个潜在中继节点竞争、自主智能判断进行下一跳节点选择,充分利用信道广播特性,提高吞吐量和传输可靠性.研究机会路由算法来提升无线多跳网络的性能,已成为当前无线自组织网络与传感器网络组网协议研究中的一个重要方向.

1.2 两个例子

利用无线媒介的广播特性,机会路由主要从两个方面来提高无线多跳网络的吞吐量:一是增加单跳传输的可靠性;二是减少端到端传输跳数.下面分别从这两个方面解释说明机会路由的原理.

机会转发可以选择多个中间节点作为转发中继节点.每次数据发送后,都有更多的被接收和再次转发的机会.如图 1 所示(链路上的值代表该链路分组成功投递率),假设从源节点 *Src* 到每个中间节点的转发成功率为 30%,从每个中间节点到目的节点 *Dst* 的转发成功率是 100%.使用传统确定性路由方法,源节点将从 4 个中间节点中选择一个节点作为下一跳节点.此时,从源节点到目的节点的转发成功率只有 30%,即源节点平均发送 3.3 次,目的节点才能成功收到 1 次.如果使用机会路由的方式,建立一个转发节点集(forwarder candidate set),把 4 个中继节点同时作为备选转发节点,只要其中一个收到源节点发来的数据包就可以继续向目的节点转发,转发率可以提高到$(1-(1-0.3)^4)\times 100\%\approx 76\%$,转发率从 30%上升到了 76%,从而显著提高了端到端的吞吐量.

机会路由协议也可以减少端到端转发跳数、降低延迟、提高吞吐量.如图 2 所示,5 个中间节点在源节点和目的节点之间沿直线分布,图中长度相同的链路具有相同的分组投递率.传统路由协议事先确定源到目的节点

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

所要经过的中间节点,例如 *Src-B-D-Dst*.当源节点向下一跳节点 *B* 发送数据时,*B* 收到了数据包,但同时 *C* 也收到了同样的数据包.机会路由策略允许 *C* 向下游转发,而不是由 *B* 来承担此任务,这样就可能形成 *Src-C-Dst* 路径,相比 *Src-B-D-Dst* 路径减少了跳数.另一种情况是,源在给 *B* 发送数据时,*B* 没有收到,但 *A* 收到了,传统路由协议中,源节点必须重发这个数据包,而机会路由允许 *A* 来发送这个数据包.这种策略会使得数据更快地向目的端方向传输,从而增加了端到端的数据吞吐量,同时也提供了可靠传输.

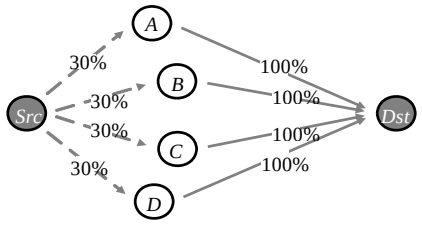

Fig.1 Each intermediate node has independent probability to relay packets from source *Src* to destination *Dst*

图 1 每个中间转发节点有独立的机会为源节点转发数据

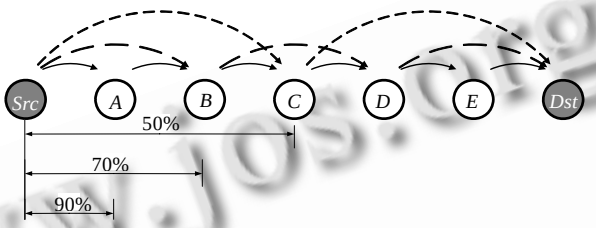

Fig.2 Opportunistic routing enables source *Src* to transmit data to destination *Dst* via paths with different hops

图 2 机会路由使分组可能经过不同跳数的路径到达目的节点

2 影响机会路由性能的主要因素

机会路由的主要问题包括如何选择备选转发节点、如何为各备选节点分配转发优先级以及如何避免或抑制数据重复发送.下面将对这些问题分别加以阐述.

2.1 备选转发节点选择

如何选择备选转发节点集是影响路由协议性能的关键因素,选择合适的转发节点集很大程度上决定着是否可以获得较高的协议性能提升.在现有机会路由协议中,存在多种路由测度(metrics)可以用来选择备选转发节点集,其中主要包括跳数(例如 SOAR[6],OPRAH[7])、ETX(expected transmission count)[8](例如 ExOR[4,5],MORE[9]等)、地理距离(例如 GeRaF[10,11],HARBINGER[12])等.基于不同测度的代价计算方法包括端到端最短路方式、迭代方式.端到端最短路方式是在数据包发送之前计算出每个备选转发节点到目的端最短路径的 ETX 值、跳数或地理距离,以此来确定不同备选转发节点的优先级,这种方式实现比较简单.同时,结合节点出行链路质量、各备选转发节点自身状态(如缓存队列占用情况)等其他因素,对端到端方法作进一步优化,也是一种常见方法.但由于数据的转发是机会的而不是按照固定最短路转发的,所以端到端最短路方式难以保证所选的备选转发节点集是最优的.端到端迭代法首先通过对每个转发节点到目的节点使用同样的机会转发策略执行端到端的逐跳迭代运算,然后得出每个邻居节点到目的节点的平均代价,这一代价与实际的转发过程较为接近.但是,这一方法常常涉及较多的网络知识和运算量.

无论采用何种测度,都需要一种机制来得到邻居节点的状态.这些状态可以是邻接链路状态,也可以是邻居节点到目的节点的距离.比如,ExOR 协议是基于 ETX 工作的,它需要以 ETX 的全网链路状态信息为基础,这将给网络带来一些额外开销.GeRaF 协议以地理距离为测度,数据包发送节点只需知道邻居节点和目的节点的位置,就可以用每个邻居到目的节点的距离作为测度来选择转发节点集,并确定每个备选转发节点的优先级.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

此外,备选转发集中节点的数量也是影响转发效率的一个重要因素.较多的备选转发节点可以提高机会转发的成功率,减少重传的概率.但另一方面,较多的备选转发节点也会给转发节点之间的协调带来困难,增加了控制开销.另外,剔除质量较差的备选节点也能够有效地提高机会转发的性能.

2.2 备选转发节点协调机制

在选择了备选转发节点并为各节点确定优先级之后,需要一种机制使得各转发节点之间能够相互协调,以有效避免或抑制不必要的重复发送.现有的机会路由协议所使用的协调机制可以分为控制包应答模式、数据包应答模式和无协调模式.

控制包应答方式存在两种具体实现方式,包括基于 RTS-CTS(request to send-clear to send)控制分组或 ACK 分组,备选转发节点按照当前发送节点事先设定好的优先级按次序应答.在使用 RTS-CTS 的机会协议中,在数据包发送之前首先发送 RTS,该 RTS 中包含各备选转发节点地址;备选转发节点按优先级依次回送 CTS;一旦数据包发送节点收到第 1 个 CTS 后,它就会选择这个发送 CTS 的节点作为转发节点,同时为数据包的转发预约了无线信道;其他备选转发节点听到数据发送后停止发送 CTS.此种方案很大程度上避免了各备选转发节点由于相互听不到而可能发生的重传现象,但需要在 MAC(media access control)层作一定改动,对协议实现复杂度有所增加.另外,在信道预约以后,并不能确保数据包成功传输,这可能为数据包转发率带来了一些负面的影响.另一种控制包应答方式是 ACK 应答,数据包发送节点发出数据后,每个备选转发节点按照预先设定的优先级顺序回送 ACK,当较低优先级的备选转发节点听到较高优先级的节点发出的 ACK 时,就获知该高优先级节点已经收到此数据包,随即将已收到的数据包丢弃.发送节点在一段时间内收不到 ACK,则重发数据包.此应答模式用少量的 ACK 开销换来的转发的可靠性,很大程度上提高了端到端的转发率.为了抑制重复发送,基于 ACK 的应答模式需要各备选转发节点之间具有相互的直接相邻性.

数据包应答方案省去了数据发出后的各种 MAC 层控制分组应答过程,备选转发节点收到数据包后按优先级顺序转发数据,优先级较高的备选转发节点先于优先级较低的转发节点发送数据包,低优先级备选转发节点听到后丢弃存于本地的相应数据包.此方案由于没有控制包的应答过程,降低了控制开销,但同时也增加了数据包重传和碰撞的机率,因此,对于链路状态较好的网络环境中更适用.

在无应答模式中,转发节点之间没有任何直接的协调动作.各备选转发节点收到数据后,可以根据自身转发所带来的增益、编码机会、从本节点到目的节点的剩余路径长度等因素,以一定概率或一定条件下的分组转发,目的节点收到数据包后,可以选择向信源发送 ACK,也可以不作任何确认.这种模式中,分组通常以广播方式发送,无控制开销.但是,如果备选转发节点集选择不当或中间节点转发概率确定不当,那么这种方案常常会导致目的节点收到较多的重复分组.

3 主要机会路由协议

下面将分别介绍采用不同策略进行机会路由的主要协议.其中着重介绍各协议的主要工作机制,并讨论它们的优缺点.

3.1 基于端到端最短路径

这类机会路由协议需要无线网络在后台运行一个全网范围的路由协议,提供节点间基于不同度量的最短路径,在此基础上实现高效机会路由.下面将对典型协议一一加以介绍.

ExOR(extremely opportunistic routing):ExOR 是最早的机会路由方案,这是一个以端到端的最短路的 ETX 值为基准的机会路由算法.网络中每个节点周期性地发送探测包,从而得到相邻链路的 ETX 值,通过全网广播,网络中的每个节点都能够获得全网链路状态.在节点欲发送数据时,采用逆向 Dijkstra 最短路径算法计算各邻居节点到目的节点的最小期望转发总次数.ExOR 的基本思想是,源节点欲向目的节点发送数据,它首先选择到目的节点的最短 ETX 路径小于自身的节点作为备选转发节点,这些节点组成备选转发节点集,并依据其到目的节点的距离设置优先级,距离目的节点越近,优先级越高.在数据包中携带了各备选转发节点 ID,并以优先级顺

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

序排列.源节点成批地广播数据包,收到包的邻居节点按优先级的次序转发数据,优先级高的节点转发过的数据,若被优先级低的备选转发节点听到后,该低优先级节点将不再转发这些数据包,而是发送本地存储且较高优先级节点尚未成功发送的数据包.每个备选转发节点按此方式转发,直到目的节点接到大部分(如 90%)数据包为止,其余数据包按照传统的最短路由方式转发.

ExOR 所采用的简单方法能够在很大程度上提高数据包转发率,但也存在着一些不足:首先,由于 ExOR 以全网链路状态为基础,因此网络中每个节点需要定期地全网广播自己邻接链路的 ETX 值.这给网络带来了较大的负担,因此可扩展性不强;其次,由于缺乏各备选转发节点之间的有效相互确认和协调机制,因此,目的节点收到重复分组的概率较高.

SOAR(simple opportunistic adaptive routing):在 Rozner 等人提出的 SOAR 协议中,首先建立一条端到端的最短路径,数据发送节点在选择备选转发节点时,以偏离这条路经的跳数来选择邻居作为转发节点,并确定其优先级;为了抑制重复分组,各备选转发节点相互之间的链路 ETX 值必须高于一个给定门限,以使得任何一个节点发出的数据包或 ACK 包都能以高概率被其他备选转发节点收到.这样做的好处是:可以把备选转发节点集中在端到端最短路径的附近,有效避免了数据的分叉传输,减少了数据重传,且有利于执行机会转发节点之间的协调过程.由于 SOAR 限制了备选转发节点的选择,要求各备选转发节点位于相互间的通信范围内,因此高概率保证高优先级转发节点发送的数据包不会被低优先级转发节点再次转发.SOAR 在追求重传最小化的同时,也在一定程度上限制了转发的效率.

CBF(cluster-based forwarding)[13]:CBF 是一种基于分簇的机会转发方法.CBF 引入了两种帮助节点:intermediate helper 和 distance helper.一个数据发送节点(记当前节点)以最短路径路由的方式选择其下一跳转发节点的邻居节点作为本次转发的帮助节点.其中,距离目的节点比下一跳节点远且又比当前节点距离目的节点近的邻居为 intermediate helper,而距离目的节点比下一跳节点近的邻居节点为 distance helper.数据包从当前节点发出后,如果 distance helper 收到,则无论其他节点收到与否,它都将转发此数据包;如果 intermediate helper 收到数据包且没有听到下一跳节点的确认消息,则 intermediate helper 转发此数据包给此下一跳节点,当前节点则不再转发此数据包.在数据包转发过程中,distance helper 的转发可以增加向下游转发的成功率,intermediate helper 代替当前节点执行重传可以提高重传成功率.因此,在链路质量较差的情况下,CBF 充分利用了数据包成功传输的机会来减少数据包重传次数,提高了传输成功率,从而提高了单跳链路的转发率.从端到端数据转发的角度来看,减少了端到端的转发次数,也减少了链路不稳定带来的重传消耗.

ROMER(resilient opportunistic mesh routing)[14]:为了提高严重丢失情况下的无线网络的分组转发健壮性和可靠性,ROMER 以每分组为单位在线构建连接源端到目的端的转发网状结构.ROMER 要求每个分组都必须携带一个表征该分组已经偏离最短路的距离.如果偏离距离小于一个给定门限,收到分组的中间节点将继续转发该分组.上述转发方式将自动生成一个围绕连接源端到目的端最短路径的椭圆型转发结构,这一结构可以提供足够数量的交织路径以支持机会路由,克服无线链路瞬时波动.同时,为了降低重复分组的数量,对于一个节点来说,如果它不是连接源端到目的端最短路径上的节点,那么它可以根据出行链路的瞬时吞吐量来调整其分组转发概率.

DTRP(directed transmission routing protocol)[15]:DTRP 的工作机理与 ROMER 类似.所不同的是,DTRP 以不同的方式来调节中间节点的分组转发概率.具体地,连接源端到目的端最短路径上的节点以概率 1 转发数据分组;不在最短路径上的节点的转发概率与偏离最短路的路径长度有关:偏离越大,概率越低.ROMER 和 DTRP 的优势在于其简单性和高可靠性,能够有效对抗无线信道质量波动.缺点是代价大、重复分组数量大.

3.2 基于端到端迭代策略

以最短距离来确定各备选节点优先级,这一方法实现起来较为简单,在很多机会路由协议中得到了运用.但是,这种最短距离法并没有考虑到每个转发节点自身将继续执行机会转发这一事实——而不是沿最短路下行发送.因此,如果备选转发节点选择欠佳,有可能导致分组被转发到质量较差的路径上去.基于上述考虑,迭代法把端到端的转发分成两个阶段:第 1 阶段是从当前节点(包括源节点)发出数据包到至少一个备选下一跳节点收

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

到此数据包;第2阶段是从该备选节点发出数据包到目的节点收到数据包(如图3所示).在迭代计算过程中,需要结合每一个备选转发节点的分组接收率、每个备选转发节点的下一跳备选转发节点集及其出行链路质量等因素,通过迭代方式计算端到端多路径加权平均代价.与纯粹的基于最短路径的方法相比,迭代法更能客观地反映出一个机会路由协议的分组转发状况,从而更合理地优化转发节点集及各被备选转发节点的优先级.

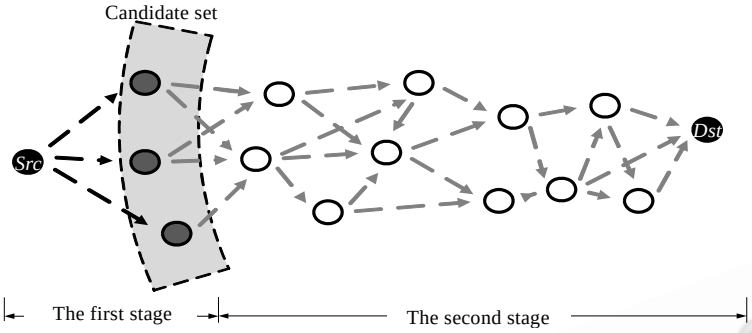

Fig.3 Illustration of iterative selection of candidate forwarder set

图3 迭代方式选择备选转发节点集示意图

LCOR(least-cost opportunistic routing)[16]:这是最早的基于迭代法的机会路由协议.迭代法的引入主要是因为在机会转发执行过程中,任何一个备选转发节点,当它作为实际的转发节点时,都会同样以机会转发的方式继续向目的端方向转发数据.因此,仅使用最短路径的相关测度作为衡量备选转发节点优先级不能正确地反映备选转发节点的优劣.在LCOR中,对于一个转发节点i来说,它将穷举所有的邻居组合形式,从中选择最好的一个.对于每一种组合,可以用迭代的方式计算出从节点 i 通过该子集中的节点到目的节点的端到端代价,以此来确定各备选转发节点的优先级.以迭代法来确定转发节点集的方式,相对于早期机会路由单纯地以最短路径 ETX 为测度的方式具有明显的优势.但当节点平均度数较高时,LCOR 会出现过量迭代、计算量过大的问题,协议可扩展性较差.

OAPF(opportunistic any-path forwarding)[17,18]:OAPF 也是通过计算端到端代价来选择备选转发节点集的,OAPF 的提出者给出了一种新的测度——EAX(expected any-path transmissions).EAX 是从数据发送端到目的端所有可能经过路径的 ETX 期望值的加权平均.与早期迭代方案不同,OAPF 没有事先确定备选转发节点的个数,而是在迭代计算的过程中逐渐增加备选节点的个数,直到加入新的备选节点后计算所得 EAX 值的提升小于一个门限值为止.这种机制有效地限制了备选转发节点集的规模,也控制了转发协调过程中带来的额外开销.但这种迭代方法同样不可避免地引入了较高的计算量和大量网络状态信息的采集和传播.

BitSOR(bit-rate selection for opportunistic routing)[19]:早期机会路由只考虑丢失率而没有考虑链路带宽,这将产生带宽利用不充分的问题.针对这一问题,BitSOR 采用了新的测度 ExACT(expected anypath communication time).ExACT 表示数据包从当前节点传输到目的节点所需的时间.ExACT 使用反向迭代方式,先从目的节点开始计算,直到计算出数据发送节点到目的节点的端到端 ExACT 值,并根据 ExACT 值来安排备选转发节点的转发优先级.BitSOR 以端到端时延作为优化目标,明显提高了数据在网络中的移动速率,充分利用了网络带宽,有效地避开了网络瓶颈.

3.3 基于地理位置策略

基于拓扑的机会路由协议在动态网络中会导致较高的协议开销,从而带来可扩展性问题.地理位置、地理距离可以为备选转发节点集的选择和优先级设定带来便利,这方面的研究已经引起了关注.

GeRaF(geographic random forwarding):按照 GeRaF,各节点可以自主休眠与苏醒,并且节点有能力获知自身和 sink 节点(无线传感器网络中的数据汇集节点)的地理位置信息.GeRaF 根据地理位置确定转发节点及其优先级.数据包发送之前,发送节点首先发送 RTS,其中携带发送节点和 sink 节点的位置信息.发送完 RTS 之后,发送节点等待潜在的 CTS.收到 RTS 的节点,如果自身距离目的节点比发送节点到目的节点要近,那么它是一个 CTS

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

的潜在发送者,并且根据自己到目的节点的距离确定自己发送 CTS 的优先级.距离目的节点越近,优先级越高.如果发送节点没有收到 CTS 或发生 CTS 碰撞,将重新执行 MAC 层握手.

以地理距离来确定备选转发节点及其优先级的方法省去了维护全网拓扑和路由表所带来的协议开销,但是,节点之间的地理距离并不能完全体现其间的路径质量,更不能正确反映转发率的高低.节点密度等其他因素也会对链路质量产生影响.另外,提供节点定位机制也给系统带来了额外的开销或成本.

HARBINGER(hybrid ARQ-based intercluster geographic relaying):HARBINGER 是 HARQ(hybrid-ARQ)和 GeRaF 的结合.在 GeRaF 中,如果数据发送节点前方没有处于活动状态的节点,发送节点将会周期性地发出 RTS,以试图找到发送的机会,由此带来的开销和延迟都比较大.HAEBINGER 没有采用 GeRaF 中的 RTS-CTS 机制,相反地引入了 HARQ 技术,使得在链路状态不好的情况下减少了单跳重传带来的开销,加大了单跳传输距离,适合在低密度网络中运行,可以提高网络的能量有效性,延长网络生存期.

MGOR(multi-rate geographic opportunistic routing)[20,21]:MGOR 是一种面向多速率无线网络、基于地理位置的机会路由方案.MGOR 的方案设计和分析基于这样一种考虑:每个节点可以工作在不同速率上,不同工作速率将导致不同的传输范围,从而导致备选转发节点集、优先级及相互间协调关系的变化.针对这一问题, MGOR 设计了一种新的测度 EOT(expected one-hop throughput),通过对 EOT 的选择来达到备选转发集和传输速率的平衡优化.MGOR 将多速率的思想应用到基于地理位置的机会路由方案中,可控地选择节点传输速率以达到提高端到端吞吐量的目的.

3.4 基于网络编码策略

网络编码可以在一次传输内携带多个报文来有效地提升网络吞吐量,将这些技术与机会路由技术结合可以有效地提高性能.但如何设计基于编码的机会路由协议需要考虑网络的拓扑、网络动态性和重传开销等多种因素,使两项技术相互协调,都能体现出各自的优势.MORE,CORE,PACE 等协议中都巧妙地将上述两种技术进行了有机结合,下面将一一加以介绍.

MORE(MAC-independent opportunistic routing and encoding protocol):MORE 是 ExOR 的增强版.具体来说,MORE 把流内随机网络编码(intra-flow random network coding)引入了机会路由,并利用网络编码来降低重复分组发生的概率.如图 4 所示,源节点发出 a,b 两个数据包,备选转发节点 A 收到了全部的两个数据包,另一个备选转发节点 B 只接收了其中的一个数据包 b.由于 B 距离目的节点更近,具有比 A 更高的优先级,所以节点 B 先转发分组 b 到目的节点.但此次发送并没有被节点 A 听到,因此,节点 A 将发送两个数据包.在这个过程中,数据包 b 被两个备选节点重复发送.为避免重复发送,MORE 引入网络编码的方法.在上面的例子中,节点 A 在收到两个数据包 a,b 后,对其做线形编码为 $a\oplus b$,并发送编码后的分组.目的节点收到数据包 $a\oplus b$ 后,做线性运算 $a\oplus b\oplus b=a$,目的节点可以得到全部两个数据包.

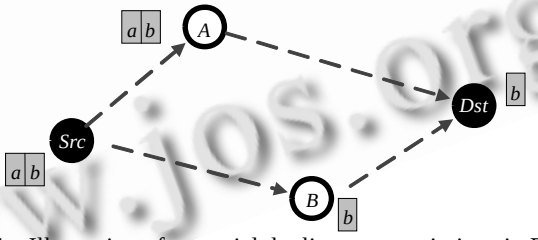

Fig.4 Illustration of potential duplicate transmissions in ExOR

图 4 ExOR 中存在的潜在重复分组发送现象示意图

MORE 具体的工作流程如下:当源节点欲发送数据时,将所要发送的原始数据分成批(batch),例如,把每 K 个包作为一批.源节点将每一批数据包做随机线性编码后,不停地广播出去,每个分组携带其编码向量.中间转发节点只接受 Innovative 包,即:收到一个包后,首先判断它与本地已经收到的属于该批的数据包是否线性独立,如果线性独立,则将新数据包存入缓存,否则,丢弃该包.每个中间节点采用基于 Credit 的方式转发数据,即:每收到一个 Innovative 包,本节点 credit 加一个 x 值,$0<x<1$.如果 credit 为正,则将缓存中同批的数据包做线性编码后转

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

发,转发完一个数据包后 Credit 减 1.当收到属于同一批次的 K 个 innovative 数据包后,目的节点就可以恢复出原始 K 个数据包,并向源节点回送 ACK 包.源节点收到 ACK 后,进行下一批数据包的发送.实验结果显示,与 ExOR 相比, MORE 可以极大地提高分组成功投递率.

CORE(coding-aware opportunistic routing mechanism)[22]:针对已有的基于局部信息网络编码(localized network coding)方案只是被动地利用各节点现有的编码机会的不足,我们提出了 CORE 协议,以在无线网络中创造更多的编码机会,提高网络吞吐量.针对这一目标,CORE 将局部流间网络编码(localized inter-flow network coding)和机会路由相结合.具体来说,在确定备选转发节点优先级时,编码机会越大的节点优先级越高,从而使得分组总是尽量转发到编码机会多的节点上去.通过创造更多的编码机会,CORE 大大提高了多流无线网络的吞吐率.在 CORE 协议执行过程中,需要节点保持两跳邻居缓存队列内的分组信息.

PACE(probabilistic area-centric network coding mechanism)[23]:在 CORE 中,每个节点仅考虑单个分组转发带来的增益.然而在一定地域区域内,各节点采用不同的转发次序,可能导致不同的联合编码增益.这是因为,编码增益依赖于各节点当前存有哪些分组.针对这一问题,我们提出的基于区域的网络编码机制 PACE,也是一种网络编码和机会路由的有效结合.在 PACE 中,节点每次传输都着眼于提升节点附近区域中多个节点的联合编码增益,同时使用编码感知的 MAC 层传输调度来保证编码机会的实现.PACE 要求网络中每个节点保持两跳邻居信息.PACE 的不足之处在于,单个分组编码增益的计算量较大.

3.5 其他协议

MCExOR(multi-channel extremely opportunistic routing)[24]:考虑多信道问题,MCExOR 给每个节点都分配一个主信道,一个备选节点集中的所有节点都将使用相同的主信道.转发节点在数据包传送过程中尽量减少同一个信道的重复使用,每次转发数据时尽量切换到与上一跳不同的信道上去.在选择备选转发节点集时,MCExOR 考虑了多跳路径状况,使用迭代的方式计算路径代价来决定备选节点的优先级.MCExOR 有效地利用了无线多信道的优势,在数据传输过程中减少了碰撞.

OPRAH(opportunistic routing in dynamic ad hoc networks):OPRAH 是一种按需多路径构造协议.OPRAH 采用了类似经典路由协议 AODV 的 Route Request 和 Route Reply 机制,但在寻径过程中,允许中间节点通过收到的多个路由请求报文和从目的节点可能收到的多个路由应答报文建立缠绕式多路径.数据包将按照建立的多路径进行发送:每个转发节点收到一个数据包后,通过广播方式继续下行转发.OPRAH 可能导致目的节点收到较多的重复分组.表 1 总结和比较了典型无线网络机会路由协议的主要特性.

Table 1 Classification and comparison of typical opportunistic routing protocols

表 1 典型机会路由协议分类与对比表

Protocols	Characteristics				
	Metrics	Coordination mechanisms	Coding or not	Location information	Global information
ExOR	ETX	ACK	×	×	✓
SOAR	Hop counts	ACK	×	×	✓
ROMER	Hop counts	No	×	×	✓
DTRP	Hop counts	No	×	×	✓
CBF	Multi-Metrics	ACK	×	×	×
LCOR	EAX	ACK	×	×	✓
OAPF	EAX	ACK	×	×	✓
BitSOR	ExACT	Short pulse	×	×	✓
GeRaF	Distance	RTS-CTS	×	✓	×
HARBINGER	Distance	ACK	✓	×	×
MGOR	EOT	ACK	×	✓	×
MORE	ETX	No	✓	×	✓
CORE	Coding opportunities	DATA	✓	×	×
PACE	Coding opportunities	DATA	✓	×	×
MCExOR	ETX	ACK	×	×	✓
OPRAH	Hop counts	No	×	×	×

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4 总结与展望

本文综述了已有机会路由的基本思想、主要问题和主要协议.已有工作显示,机会路由能够显著提高无线多跳网络的性能.但作为一个无线网络领域的新技术,无线网络机会路由领域还有很多问题需要进一步研究,下面列举几个这方面的问题.

- 新型路由测度

路由测度对机会转发节点集的选择、优先级设定及路由协议的性能会有重大的影响.已有机会路由协议主要以跳数、ETX、地理距离、编码机会等作为主要测度来设计路由协议.引入新的路由度量有可能孕育着突破.Wu 等人[25]提出了基于效益(utility)的机会路由协议.该协议以每个分组的效益作为路由度量,即:一个分组的成功端到端发送所带来的效益等于该分组的价值减去端到端传输代价.

- 跨层设计

很多已有机会路由协议主要着重 MAC 层和路由层的联合设计.除此之外,MAC 层的前向纠错机制、分组大小、发送功率、信道选择及调度也是影响机会路由性能的重要因素.综合考虑上述因素及其应用的特点进行机会路由研究,对跨层机会路由将起到较好的促进作用.

在机会路由协议中,MAC 协议的设计对于数据包发送节点与备选转发节点、备选转发节点与备选转发节点之间的协调起着重要的作用.一个好的 MAC 协议可以有效地提高机会路由的转发效率,降低碰撞,减少重传.除了前面介绍的结合 RTS-CTS 或 ACK 机制的机会转发,还有一些研究人员设计了面向机会路由的 MAC 层改进机制.

在 Zubow 等人提出的 MCExOR[24]协议中,对 802.11 的 MAC 层作了修改,相应地提出了一种紧凑式 ACK 机制,减少了机会转发的分时槽 ACK 机制所引起的数据碰撞问题.基本思想是,优先级高的节点如果没有发送 ACK,低优先级的节点就无需空等发送一个完整 ACK 所用的时间,而是在一个很短的时间间隔后立即向数据发送节点发送 ACK.

Baccelli 等人[26]也针对这一问题提出了适用于移动 Ad Hoc 网络的解决方案.此方案中,数据转发节点对数据发送节点的确认信息以短信号脉冲(short signaling burst)的形式来实现.它由长度相同的二进制序列组成,高电平 1 表示节点发送脉冲信号,低电平 0 表示节点处于监听状态.短脉冲序列根据优先级设定,优先级高的节点相应的脉冲序列号较大,反之则小.如果备选节点在监听阶段听到其他节点发送的脉冲信号就放弃转发数据包.此方案能够有效地缩短机会路由的应答过程所耗时间,但对网络中节点的时间同步性要求较高.

另外,Cui 等人[27]采用了规划的方法研究了综合机会路由选择和媒质接入传输调度的节能传输问题,文中同时利用网络编码技术来提高能量效率,但该文所采用的集中式优化方法导致所设计的算法可扩展性较差.

- 节能机会路由

节能是无线网络的重要指标之一,如何在机会路由协议设计过程中考虑转发效率、节能性能和投递延迟建立的折衷关系具有重要意义.一方面,机会路由通过降低分组重传次数,可以降低分组发送所带来的能耗;另一方面,备选转发节点集的规模在很大程度上影响了机会路由的性能,这需要更多的节点处于苏醒状态.但与之相矛盾的是,在能量有限的无线网络中,应鼓励尽量多的节点处于休眠状态,以降低信道侦听能耗.因此,如何在节能与转发效率以及分组端到端投递延迟之间建立折衷关系具有重要价值.HARBINGER 是适合节点比较稀疏情况下的位置机会路由算法,它允许节点休眠,并通过 HARQ 延伸节点传输距离.

Zhang 等人[28]分析了分簇机会路由协议的能量-延迟折衷关系的下限.但文献[28]仅面向满足如下特性的分簇网络结构:对于相邻簇间通信,簇内不同节点可以相互替换的分簇网络.因此,其分析结果难以推广到其他机会路由协议.Cui 等人[27]研究了综合网络编码、机会路由和传输调度的节能传输问题,以有效延长网络寿命.FSA(fast slotted acknowledgment)协议[29]研究了在硬件可靠性有一定限制的条件下,如何在能量最小化和端到端延时最小化之间建立平衡. FSA 首先把能量模型集成到不可靠的链路模型中,从而为能量有效性建立一个优化测度,并对各类信道模型作相应的优化.分析了在逐跳选择和多跳迭代选择备选转发节点集的策略下,如何使得能量与延时联合最小化.分析结果显示,机会转发策略可以利用空间分配的优势,有效地提高了延时约束下的

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

瑞利衰落信道条件下的转发性能.如何综合考虑能量因素(如剩余能量、发射功率)、转发效率和拓扑信息来设计高效机会路由协议值得进一步加以研究.

- 基于编码的机会路由

在无线网络领域广泛应用了多种编码技术,FEC(forwarding error correction)可以改善链路丢失率;HARQ可以增加节点的传输范围和成功率;网络编码可以在一次传输内携带多个报文以有效地提升网络吞吐量.将这些技术与机会路由技术结合可以有效地提高性能,但如何设计基于编码的机会路由协议要考虑网络的拓扑、网络动态性和重传开销等多种因素,使两项技术相互协调,都能体现出各自的优势.前文提到的 MORE,CORE,PACE 和 HARBINGER 等协议中,都巧妙地结合了不同编码技术.另外,在文献[30]中,我们提出了如何通过“机会转发+网络编码”,以协作的方式有效重传 MAC 层丢失掉的分组的方案.仿真结果显示,该方案在高丢失无线网络中可以有效地提高传输可靠性.Zhang 和 Li[31]采用规划的方法,优化了 MORE 协议中单个 batch 传输过程中各个转发节点的转发次数,进一步降低了重复分组投递的概率,提高了网络吞吐量.如何有机地将编码方法和机会路由进行综合设计,仍是当前的一个热点问题.

- 机会组播/广播路由

利用机会路由的特性来支持高效的组播/广播通信,称作机会组播/广播.学术界对这一领域的研究尚少.例如,在基于网格的组播路由协议中加入机会广播机制,充分利用转发组节点的“非转发组”邻居的监听和帮助能力以降低转发冗余度,提高转发效率.根据丢失率等知识,建立转发组内节点的转发效率表及转发先后关系,抑制不必要的转发,降低组播开销.Guo 等人提出的机会洪泛[32]以基于树的广播为基础,同时考虑到树中节点的双亲节点有可能和它的其他邻居节点同时收到需要洪泛的数据包,从而可以利用洪泛生成树以外的链路来辅助转发数据.另外,Li 等人提出的 OppCast(opportunistic broadcast)协议[33]是针对在链路不可靠的移动无线自组织网络中报警数据包的传输而提出来的一种高可靠性快速广播协议,该协议使用了机会路由的基本思想来最小化报警数据包转发的每一跳的延时.

借鉴机会转发的思想,我们将目的端驱动的方法应用于基于网状转发组结构的无线多跳组播路由协议 ODMRP(on-demand multicast routing protocol)[34]之上,相应地设计了 D-ODMRP P(destination-driven on-demand multicast routing protocol)协议[35].D-ODMRP 在选择转发节点来建立组播转发组结构的过程中,尽量机会地选择组播组成员,而少使用非组播组成员节点来转发数据,从而减少了转发次数.在不影响分组转发率的前提下,提高了全网转发效率.

- 机会拓扑控制

Ma 等人[36]提出了结合机会转发特性的拓扑控制方案,目的是减少网络的连通支撑集(S)节点,并满足给定的上行通信端到端转发成功率.该方法主要考虑无线链路的广播特性和概率特性,一个节点可以通过多条低转发率链路,以机会的方式接入连通支撑集 S 形成的骨干网络,并达到较高的接入成功率,从而实现与网关节点的可靠信息传输.在无线传感器网络中,通过减少连通支撑集节点的数量,可以让更多的节点处于休眠状态,因此可以有效提高网络能量有效性.但是,这一方案仅适用于上行通信为主的无线传感网应用.

综上所述,机会路由可以有效地提高无线 Ad Hoc 网络、无线 Mesh 网络和无线传感器网络的性能.但作为一项无线网络新技术,机会路由在很多方面仍需深入研究.

References:

[1] Zhang Z. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: Overview and challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2006,8(1):24−37. [doi: 10.1109/COMST.2006.323440]

[2] Perkins C, Royer E. Ad-Hoc on-demand distance vector routing. In: Proc. of the IEEE WMCSA’99. Washington: IEEE Computer Society Press, 1999. 90−100. [doi: 10.1109/MCSA.1999.749281]

[3] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: Proc. of the ACM MobiCom 2000. New York: ACM Press, 2000. 56−67. [doi: 10.1145/345910.345920]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[4] Biswas S, Morris R. Opportunistic routing in multihop wireless networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004,34(1):69−74. [doi: 10.1145/972374.972387]

[5] Biswas S, Morris R. ExOR: Opportunistic routing in multi-hop wireless networks. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2005. New York: ACM Press, 2005. 133−143. http://www.sigcomm.org/sigcomm2005/paper-BisMor.pdf

[6] Rozner E, Seshadri J, Mehta Y, Qiu L. Simple opportunistic routing protocol for wireless mesh networks. In: Proc. of the IEEE WiMesh 2006. Washington: IEEE Computer Society Press, 2006. 48−54. [doi: 10.1109/WIMESH.2006.288602]

[7] Westphal C. Opportunistic routing in dynamic ad hoc networks: The OPRAH protocol. In: Proc. of the IEEE MASS 2006. Washington: IEEE Computer Society Press, 2006. 570−573. [doi: 10.1109/MOBHOC.2006.278612]

[8] Couto DD, Aguayo D, Bicket J, Morris R. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In: Proc. of the ACM/IEEE MobiCom 2003. Washington: IEEE Computer Society Press, 2003. 134−146. [doi: 10.1145/938985.939000]

[9] Chachulski S, Jennings M, Katti S, Katabi D. Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2007. New York: ACM Press, 2007. 169−180. [doi: 10.1145/1282427.1282400]

[10] Zorzi M, Rao RR. Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Multihop performance. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2003,2(4):337−348. [doi: 10.1109/TMC.2003.1255648]

[11] Zorzi M, Rao RR. Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Energy and latency performance. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2003,2(4):349−365. [doi: 10.1109/TMC.2003.1255650]

[12] Zhao B, Seshadri RI, Valenti MC. Geographic random forwarding with hybrid—ARQ for ad hoc networks with rapid sleep cycles. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM 2004. Washington: IEEE Computer Society Press, 2004. 3047−3052. [doi: 10.1109/GLOCOM.2004.1378912]

[13] Cao Q, Abdelzaher T, He T, Kravets R. Cluster-Based forwarding for reliable end-to-end delivery in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2007. Washington: IEEE Computer Society Press, 2007. 1928−1936. [doi: 10.1109/INFCOM.2007.224]

[14] Yuan Y, Yang H, Wong S, Lu S, Arbaugh W. Romer: Resilient opportunistic mesh routing for wireless mesh networks. In: Proc. of the IEEE WiMesh 2005. Washington: IEEE Computer Society Press, 2005. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.80.7105

[15] Nassr MS, Jangeun J, Eidenbenz SJ, Hansson AA, Mielke AM. Scalable and reliable sensor network routing: performance study from field deployment. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2007. Washington: IEEE Computer Society Press, 2007. 670−678. [doi: 10.1109/INFCOM.2007.84]

[16] Dubois FH, Grossglauser M, Vetterli M. Least-Cost opportunistic routing. Technical Report, LCAV-REPORT-2007-001, School of Computer and Communication Sciences, EPFL, 2007.

[17] Zhong Z, Wang J, Nelakuditi S. Opportunistic anypath forwarding in multi-hop wireless mesh networks. Technical Report, TR-2006-015, USC-CSE, 2006.

[18] Zhong Z, Nelakuditi S. On the efficacy of opportunistic routing. In: Proc. of the IEEE SECON 2007. Washington: IEEE Computer Society Press, 2007. 441−450. [doi: 10.1109/SAHCN.2007.4292856]

[19] Gray C, Santhapuri N, Nelakuditi S. On bit-rate selection for opportunistic routing. In: Proc. of the IEEE SECON 2008. Washington: IEEE Computer Society Press, 2008. 1−6. [doi: 10.1109/SAHCNW.2008.17]

[20] Zeng K, Lou W, Zhai H. On end-to-end throughput of opportunistic routing in multirate and multihop wireless networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2008. Washington: IEEE Computer Society Press, 2008. 816−824. [doi: 10.1109/INFOCOM.2008.133]

[21] Zeng K, Lou W, Yang J. Multi-Rate geographic opportunistic routing in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Milcom 2007. Washington: IEEE Computer Society Press, 2007. 1−7. [doi: 10.1109/MILCOM.2007.4454897]

[22] Yan Y, Zhang BX, Zheng J, Ma J. CORE: A coding-aware opportunistic routing mechanism for wireless mesh networks. IEEE Wireless Communications, 2010,17(3):96−103. [doi: 10.1109/MWC.2010.5490984]

[23] Yan Y, Zhang BX, Hussein M, Ma J. Mechanism for maximizing area-centric coding gains for wireless multihop networks. In: Proc. of the IEEE ICC 2009. Washington: IEEE Computer Society Press, 2009. [doi: 10.1109/ICC.2009.5199177]

[24] Zubow A, Kurth M, Redlich JP. Multi-Channel opportunistic routing in multi-hop wireless networks. In: Proc. of the IEEE EW 2007. Washington: IEEE Computer Society Press, 2007. http://www.ew2007.org/papers/1569013580.pdf

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[25] Wu J, Lu M, Li F. Utility-Based opportunistic routing in multi-hop wireless networks. In: Proc. of the IEEE ICDCS 2008. Washington: IEEE Computer Society Press, 2008. 470–477. [doi: 10.1109/ICDCS.2008.90]

[26] Baccelli F, Blaszczyszyn B, Ermel E, Muhlethaler P. An optimized relay self selection technique for opportunistic routing in mobile ad hoc networks. In: Proc. of the EW 2008. 2008. 1–7. [doi: 10.1109/EW.2008.4623843]

[27] Cui T, Chen L, Ho T. Energy efficient opportunistic network coding for wireless networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2008. Washington: IEEE Computer Society Press, 2008. 361–365. [doi: 10.1109/INFOCOM.2008.81]

[28] Zhang R, Gorce JM, Jaffrès-Runser K. Low bound of energy-latency trade-off of opportunistic routing in multi-hop networks. In: Proc. of the IEEE ICC 2009. Washington: IEEE Computer Society Press, 2009. [doi: 10.1109/ICC.2009.5199148]

[29] Yang Z, Zeng K, Lou W. FSA: A fast coordination scheme for opportunistic routing. In: Proc. of the IEEE ICC 2009. Washington: IEEE Computer Society Press, 2009. 2871–2876. [doi: 10.1109/ICC.2009.5199042]

[30] Yan Y, Zhang BX, Hussein M, Ma J. Mechanism for coding-aware opportunistic retransmission in wireless networks. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM 2009. Washington: IEEE Computer Society Press, 2009. 4548–4553. [doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425249]

[31] Zhang X, Li B. Optimized multipath network coding in lossy wireless networks. In: Proc. of the IEEE ICDCS 2008. Washington: IEEE Computer Society Press, 2008. 243–250. [doi: 10.1109/ICDCS.2008.45]

[32] Guo S, Gu Y, Jiang B, He T. Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links. In: Proc. of the ACM MobiCom 2009. New York: ACM Press, 2009. 133–144. [doi: 10.1145/1614320.1614336]

[33] Li M, Lou W, Zeng K. OppCast: Opportunistic broadcast of warning messages in VANETs with unreliable links. In: Proc. of the IEEE MASS 2009. Washington: IEEE Computer Society Press, 2009. 534–543. [doi: 10.1109/MOBHOC.2009.5336959]

[34] Lee S, Su W, Gerla M. On-Demand multicast routing protocol in multihop wireless mobile networks. Mobile Networks and Applications, 2002,7(6):441–453. [doi: 10.1023/A:1020756600187]

[35] Tian K, Zhang BX, Zhang Z, Hussein M, Ma J. Destination-Driven on-demand multicast routing protocol for wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE ICC 2009. Washington: IEEE Computer Society Press, 2009. [doi: 10.1109/ICC.2009.5198907]

[36] Ma J, Zhang Q, Qian C, Ni LM. Energy-Efficient opportunistic topology control in wireless sensor networks. In: Proc. of the ACM MobiOpp 2007. New York: ACM Press, 2007. 33–38. [doi: 10.1145/1247694.1247701]

田克(1976－),男,河南新乡人,博士,主要研究领域为无线传感器网络,无线自组织网络,无线 Mesh 网络协议算法,原型系统.

张宝贤(1972－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络,无线自组织网络,无线 Mesh 网络算法,关键技术,原型系统.

马建(1959－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为未来互联网人性化移动系统(包括移动无线传感网,多媒体传感网,自组织网络,P2P 网,泛在网及社会网)协议与关键技术.

姚郑(1969－),男,博士,教授,主要研究领域为软件工程,开放源码软件,无线传感器网络.

www.jos.org.cn

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn