

无线自组织网传输功率控制与跨层优化

卢菲恬, 肖明波, 杨光松

(厦门大学通信工程系, 厦门 361005)

摘要: 无线自组织网节点功率有限, 如何有效利用节点电量、改善网络性能是自组网领域研究的关键问题。首先讨论了节点传输功率对各协议层的影响, 并归纳出功率控制的设计原则; 然后分类介绍和比较了几种主要的控制机制。在传统协议分层研究的基础上, 提出了对传输功率控制进行跨层优化的设计思想, 并对运用跨层优化的困难给予了阐述; 最后给出了传输功率控制领域最新的一些研究方向。

关键词: 无线自组织网; 传输功率控制; 跨层优化

Transmission power control and cross-layer optimization in wireless Ad Hoc networks

LU Fei-tian, XIAO Ming-bo, YANG Guang-song

(Dept. of Communication Engineering of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The power of wireless node is limited, so how to utilize the energy efficiently and how to improve the performance of network are the key topics in the research of wireless Ad Hoc networks. The relation between the transmission power and the protocol layer is discussed at first, and the design principles are concluded. Some primary mechanisms of the power control are then introduced and compared. On the basis of tradition layering design, cross-layer optimization is proposed, some difficulties are discussed and the novel research directions are given.

Key words: wireless Ad Hoc networks (WANETs); transmission power control; cross-layer optimization

0 引言

无线自组织网是由一组带有无线收发装置的移动节点组成的多跳临时性自治系统。无需预先架设网络基础设施、节点间组网灵活、多跳拓扑路由、鲁棒性强是无线自组织网的优势所在;但由于自组网的节点通常采用便携式的电池进行供电,电池容量受限且充电不易,因此在当前电池技术发展很难有重大突破的情况下,如何节省节点的能量开销、有效利用节点电量成为制约无线自组织网络发展的关键问题。

无线自组织对功率控制的要求是:

(1) 分布式控制:要求算法能在各节点处分布式运行。

(2) 算法简单:能满足实时计算的需求,不过多耗费节点的计算开销。

(3) 快速灵活:能迅速适应多变的网络环境(拓

扑变化或信道的改变)。

(4) 健壮稳定:能应对突发事件,对快速变化的网络有较好的差错容忍(Fault Tolerance)。

(5) 兼容扩展性:有较好的兼容性(Compatibility)与可扩展性(Scalability)。

传统的功率控制往往对无线自组织网的协议栈逐层进行研究,其好处是简化设计,具有较好的通用性;但缺点是设计缺乏足够的灵活性,无法适应无线自组织网动态变化的要求,特别是当能量或服务质量(QoS)作为系统约束条件时,网络的性能往往得不到有效保障。

收稿日期: 2005-10-17

基金项目: 清华-交通无线通信研究中心资助项目;福建省青年科技人才创新项目(2003JJ016)

作者简介: 卢菲恬(1978-),男,厦门大学通信工程系通信与信息系硕士研究生,主要从事无线自组织网络方面的研究工作。

1 功率控制设计原则

无线自组织网协议栈通常可分为5层,自上而下分别是:应用层、传输层、网络层、数据链路层(包括介质接入控制MAC子层和逻辑链路控制LLC子层)、物理层。传输功率控制是指在保证一定通信质量的前提下,通过调整节点的发射功率,实现降低网络功耗、提高网络吞吐量的一种技术。节点传输功率对各协议层的影响表现为:

(1) 对于物理层:源节点传输功率的大小决定了目标节点所能接收到的无线信号的质量,并直接影响到网络的总功耗。

(2) 对于逻辑链路控制子层:节点传输功率的差异将造成无线链路的单向性,即传输功率小的节点能侦听到传输功率大的邻居节点,反之却不成立。

(3) 对于介质接入控制子层:传输功率决定了节点的覆盖范围,进而决定了该节点所拥有的邻居节点数,而邻居节点数的多少直接决定了信道接入的竞争程度,进而决定了MAC子层的性能(包括路由上经过的跳数及端到端延时);传输功率还影响到整个网络的连通性(即网络的拓扑结构),进而影响到源节点成功发送报文到目标节点的能力(即报文发送率)。

(4) 对于网络层:传输功率决定了节点的传输范围,传输范围决定了该节点所拥有的邻居节点,邻居节点的多少直接影响到网络层的路由选择,而路由的选择对于网络的主要性能指标(如吞吐量、延时、功耗等)有直接的影响。

(5) 对于传输层:传输功率决定了由该节点所产生的对于其邻居节点的干扰强度,而节点间的相互干扰将直接导致传输层的拥塞。

可见,功率控制实际上是一个典型的跨层优化问题,它涉及到无线自组织网各个协议层,并直接影响到网络主要的性能指标:

降低传输功率可增加网络容量。对于发射范围 r ,其产生干扰的区域与 r^2 成正比,而报文转发负荷(如由于发射范围减少而导致跳数的增加)是与 r 成反比的,因此一个报文的空耗将为 r (对于三维空间将为 r^2)。这就意味着降低发射功率可增加信道空间复用度,从而带来网络容量的提高^[2];

降低传输功率可有效降低MAC子层的平均竞争率。对于网络区域中任一点而言,区域中将有平均 cr^2 个发送节点(这里 c 代表节点的空间密度)。每个节点的通信量是与 $1/r$ 成正比的,因此在该竞争区域内,网络的净无线通信量将与 r 成正比。因此,降低节点传输功率就可最小化MAC子层的平均竞争率。

功率控制对于总功耗的影响取决于硬件功耗

的模式。节点的功耗分为两大类:一类是非通信功耗——与通信无关的功耗,可以考虑通过动态关闭与通信无关的冗余节点的无线收发装置来节省这部分的功耗;另一类是与通信有关的功耗,分为五类: $P_{Rx_{elec}}$ ——接收机处理功耗, $P_{Tx_{elec}}$ ——发射机处理功耗, $P_{Tx_{Rad}}(p)$ ——功率放大器以功率 p 发送一个报文所需的功耗, P_{Idle} ——空闲状态下不接收报文时节点的功耗, P_{Sleep} ——关闭节点收发机后节点的功耗。

(a) 当传输距离较远, $P_{Tx_{Rad}}(p)$ 为功耗的主要开销时,最小化发送功率可有效降低网络总功耗,即考虑使 $\sum_i r_i$ 最小(假设无线信道是自由空间损耗, r_i 为第 i 跳的无线视距)。

(b) 当传输距离较近(通常两跳可达),节点的发射功耗大约是接收功耗的2倍左右, P_{Idle} 远大于 P_{Sleep} (空闲、接收与发送的功率消耗之比约为1:2:2.5或1:1.2:1.7^[3]),且节点空闲状态下的功耗无法忽略时,把与通信无关的或无法进行通信的节点暂时关闭其收发机以实现节能。

(c) 假设从源到目标节点的距离为 d ,每一跳的距离为 r ,则从源节点向目标节点发送一个报文所需的能耗为 $\frac{d}{r}(P_{Rx_{elec}} + P_{Tx_{elec}} + cr)$,求导并令其为零可得每一

$$\text{跳最小发送距离应为 } r_{crit} = \sqrt{\frac{P_{Rx_{elec}} + P_{Tx_{elec}}}{c(-1)}} \text{, 通常选}$$

择比 r_{crit} 稍大的值即可满足网络的连通性并实现节点发送功率最小化。

功率控制与延时及传输负载间的关系。无线自组织网的延时可分为三类:

(a) 处理延时:包括节点接收、解码及转发报文(如果需要)的处理时间。该延时将随跳数的增加而线性增大。

(b) 传输延时:指无线电波在自由空间传输的时间,取决于端到端的通信距离。

(c) 排队延时:指报文由于信道忙而在节点转发的队列中等待发送所需的时间。该延时取决于信道的接入率。

当网络负载较轻时,处理延时是主要的延时开销,此时排队延时的开销并不明显,因此增大节点传输功率可有效降低处理延时,从而降低总的端到端延时;当网络负荷较重时,主要的延时开销来自报文的排队延时,此时减小传输功率可有效降低信道干扰、增大信道接入率,从而缓解报文队列的长度,减少排队延时,进而降低总的端到端延时。

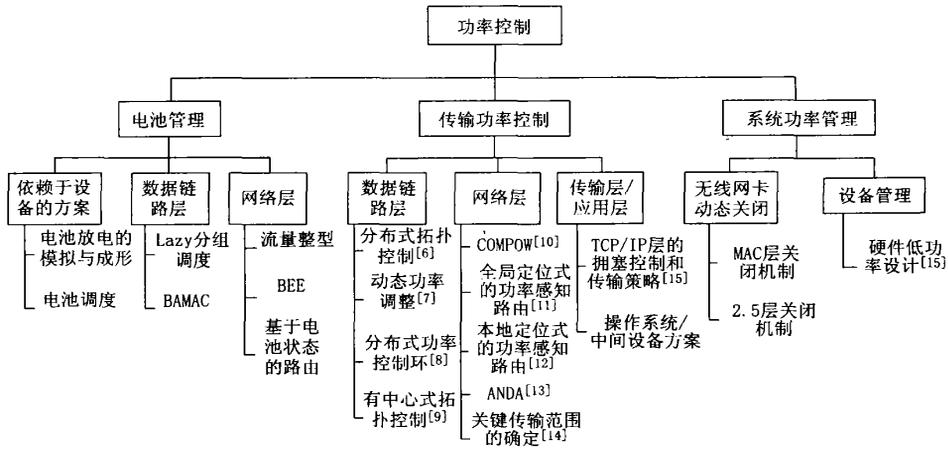


图1 功率控制方案的分类

2 功率控制研究现状与未来的研究方向

(1) 功率控制在物理层方面的研究

一个无线网络节点的生存时间取决于其便携式电池的容量及功率消耗的模式。对于电池容量的研究很早就已经开始,但以目前的技术水平,电池容量每十年也只能提高 20% 左右。研究者尝试通过对电池功率的有效利用、电池调度技术以及一些链路层的调度或在路由层上运行电池感知的路由协议等技术来延长电池的生存时间,并最大化电池能量使用的有效性。

(2) 功率控制在系统功率管理方面的研究

包括:无线网卡的动态关闭、节能模式的引入及硬件低功耗的设计。硬件低功耗的设计是指改变 CPU 的时钟速率、降低硬盘的转速及采用闪存来缓存数据等技术。无线网卡的动态关闭机制可分为 MAC 层和 2.5 层节能机制,2.5 层节能机制是工作在 MAC 层之上,并借助某些路由信息来决定采用何种功率的管理机制。PAMAS 协议动态关闭无线网卡(NIC)的原则是:当节点既不能发送又不需要接收报文时,关闭 NIC。这种报文驱动的节能方式在全互连的网络中效果最好。802.11 PSM 协议采用的则是时间驱动的关闭机制:通过让节点周期性进入睡眠状态来节省功耗。SPAN 协议和 GAF 协议则通过从节点中选取一部分节点构成网络的主干集:主干集中的节点在一定的周期内将始终处于活跃状态并负责其邻居节点的报文转发,而非主干节点在没有报文发送或接收时则可周期性地进入睡眠状态。

(3) 跨层功率控制的研究现状

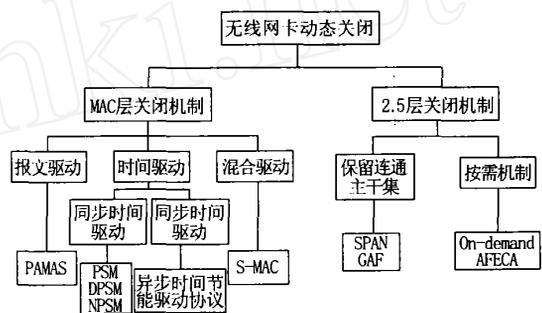


图2 无线网卡动态关闭机制分类

本文之所以重点讨论传输功率控制,是因为在无线自组织网中,传输功率控制不仅仅是典型的功率控制问题,且由于传输功率对各个协议层均有重要的影响,因此也是典型的跨层优化问题,适于采用跨层优化以优化网络性能指标。跨层优化通常有两种方式:一是利用在其它协议层所获得的信息来改进本层的协议,典型的情况是低层的信息反馈给高层,如 MAC 层的报文丢失率可反馈给传输层,以便 TCP 协议能区分网络的拥塞程度;二是将几个协议合并成一个,如可将无线自组织网的 MAC 层、路由层甚至传输层捆绑到一个协议中。方案二由于充分考虑了协议层与协议层之间的优化,因此可比方案一获得更好的网络性能。下面比较说明几种主要的传输功率控制实现方法,并探讨其跨层优化实施的可能。

从第 1 部分的讨论中可知,在保证网络连通的情况下,调整无线自组织网节点的传输功率可显著增加网络吞吐量、减小功耗。最初,该领域的研究是在 IEEE 802.11 的标准上进行的,该标准采用 CSMA/

CA(载波侦听多址接入/冲突避免)机制来预约信道以进行报文的传输。一个报文的发送流程为:RTS - CTS - DATA - ACK。SIMPLE/PARP是一个早期的基于802.11的功率控制与跨层优化的协议:其MAC层采用SIMPLE——对于控制报文RTS/CTS以最大传输功率发送,数据与确认报文DATA/ACK以所需的最小传输功率发送;网络层则采用PARP路由协议——其路由的度量与能量值有关。虽然SIMPLE/PARP可显著降低功耗,但其代价是网络吞吐量的下降和报文延时的增加。随后的PARO协议将主动式路由协议PARP改进为按需路由协议^[5],但它们在预约信道时均采用全网统一发送功率的策略。

另一类的研究关注于如何通过调整节点的传输功率来改变网络MAC层的拓扑结构。一系列使用传输功率作为控制网络拓扑的协议相继提出。在文献[17]中,作者提出了一种分布式基于位置信息的拓扑控制算法,算法包括两个阶段:第一阶段利用位置信息建立并配置链路,第二阶段节点应用以功耗作为度量指标的分布式Bellman - Ford最短路径算法找出最优链路。该协议需要节点配备有GPS(全球定位)系统。在文献[6]中,通过调整发射功率来保证网络节点在其每个 $2/3$ 的扇区内均至少有一个邻居节点,该方案需要节点增加额外的硬件以支持节点对方向信息可用性的确认。由于以上算法都采用CSMA/CA机制来接入、预约共享无线信道,因此都无法完全避免由于隐藏终端/暴露终端对于网络性能的显著恶化。

要消除隐藏终端/暴露终端问题,就必须改变其MAC层的信道预约方式,于是一类称为干扰感知的MAC层协议出现了。该类协议通过广播CAI(冲突避免信息)来界定邻近节点的传输功率。公式:

$$SINR(i, j) = \frac{P(i, j)}{P(k, j) + j}$$

表明了节点*j*接收到节点*i*发送的报文时信干比。通过设定一个 $SINR_{th}$ 门限,发送节点就可以防止邻近的节点干扰正在进行的报文传输。由于在干扰门限内,允许邻近节点同时发送数据,因此增大了网络吞吐量并减少了信道竞争所带来的排队延时。PCMA^[16]协议中每个接收节点通过发送忙音脉冲来通告其干扰的门限。仿真表明该协议的吞吐量是802.11的两倍。然而该协议没有利用跨层优化将路由协议一起捆绑进来,且存在忙音之间的信道竞争问题。PCDC^[11]协议强

调了MAC层与网络层的相互联系:通过调整RREQ报文的发射功率,MAC层间接影响了网络层对下一跳路由的选择。PCDC将可用带宽分为两个频率独立的信道分别用于传输控制报文与数据报文,其中CAI被插入CTS报文中并以最大功率发送,节点收集所得的信息用于建立一个能量有效的邻居节点子集,节点的RREQ报文以维持该子集所需的最小功率来发送。这样做的好处是减少功耗、限制子集内报文的广播以增加吞吐量、降低设计的复杂性并减少开销。仿真表明PCDC可获得可观的吞吐量改善及功耗开销的下降。然而作者没有考虑随着跳数增加而导致的处理及接收功耗的相应增大。

COMPOW协议^[10]在全网使用统一功率值,该功率值是在保证网络连通的情况下,网络的最小传输功率。虽然该方案实现了功率有效路由,但它是一种主动式的路由,且假设协议应用于若干个离散的功率值。许多新技术相继应用到无线自组织网的功率控制设计中:如文献[4]中将分群(cluster)技术引入功率控制方案中,而文献[18]则采取联合调度与功率控制的方案。

功率控制对于网络性能的提高有显著的影响,但功率控制中采用跨层优化能带来多大的性能改善尚需进一步的量化。功率控制方案的有效设计,关键在于如何说明协议栈各个层之间的互相关系。新技术的不断引入也给功率控制的研究带来了新方法与新方向。一些值得关注的研究课题有:

(1) 干扰感知的功率控制方案的实用性及设计假设尚待评估,如PCDC假设控制信道与数据信道具有同样的信道增益,但控制报文长度远小于数据报文,其在相同无线信道情况下,传输控制报文的成功率将大于传输数据报文。

(2) 现存的标准和硬件间的兼容性问题。

(3) 传输功率控制与动态关闭无线网卡机制的结合问题。

(4) 定向天线技术的引入。

(5) 基于CDMA组网的无线自组织网功率控制方面的研究。

(6) 对传输功率控制的多速率支持。

3 结束语

功率控制是一个典型的跨层优化问题,优良的功率控制设计方案能有效减少无线自组织网的功耗、增加网络吞吐量、增大报文发送率。由于跨层优

化将各层的性能信息分别标志出来,使之可被其它协议层所使用,由此可减少整个网络的开销。这种协议层之间信息的交互,使得协议栈能够以全局的方式来适应不同应用的需求和网络状况的变化,并可根据系统的约束条件和网络特征(如能量约束或节点的移动模式)进行优化,大大提高了系统的整体性能,可实现用户对于不同服务质量的要求。当然跨层优化是一把双刃剑:如果利用得法,可以大大改善网络的性能;而运用不当,将导致面条式的设计,造成负面的影响。当我们打破协议层之间严格分层结构独立性的同时,我们也失去了协议层设计的抽象性。文献[19]讨论了跨层优化的潜在风险,并提供了若干跨层优化原则:

(1) 当我们向其它协议层添加跨层交互时,必须考虑其对系统其它层的潜在影响。

(2) 用相关图表来表示协议层参数间跨层交互的影响。

(3) 从(2)中的相关图表中,寻找稳妥的跨层优化原则。

(4) 需要考虑更详细的设计问题,如代码维护等。

参考文献:

[1] Siva Ram Murthy C, Manoj B S. Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols[M]. Prentice Hall PTR, 2004.

[2] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, et al. Power control in ad hoc networks: Theory, architecture, algorithm, and implementation of the COMPOW protocol[C]. Proc. Eur. Wireless Conf., 2002:156-162.

[3] 于宏毅,等. 无线移动自组织网[M]. 人民邮电出版社.

[4] Vikas Kawadia, Kumar P R, Principles and Protocols for Power Control in Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, 2005, 23(1).

[5] Marwan Krunz, Alaa Muqattash. Transmission Power Control in Wireless Ad Hoc Networks: Challenges, Solutions, and Open Issues[J]. IEEE Network, 2004(9/10).

[6] Wattenhofer R, Li L, Bahl P, et al. Distributed Topology Control for Power-Efficient Operation in Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks[J]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2001, 2001, 3:1388-1397.

[7] Sulabg Agarwal, Ashish Ahuja, Jatinder Pal Singh, et al. Route-li-

fetime assessment based routing (RABR) protocol for mobile ad-hoc networks[J]. ICC 2000 - IEEE International Conference on Communications, 2000, 1(6):1697-1701.

[8] Agarwal S, Krishnamurthy S, RH Katz, et al. Distributed Power Control in Ad-hoc Wireless Networks[C]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 12th IEEE International Symposium, 2001:59-66.

[9] Ramanathan R, Rosales-Hain R. Topology control of multi-hop wireless networks using transmit power adjustment[J]. Proceedings of IEEE INFOCOM, Tel Aviv, Israel, 2000(3).

[10] Vikas Kawadia, Swetha Narayanaswamy, Rozovsky R, et al. Protocols for media access control and power control in wireless networks[C]. IEEE Conf. on Decision & Control, 2001.

[11] Muqattash A, Krunz M. Power-Controlled Dual Channel Medium Access Protocol for Wireless Ad Hoc Networks[J]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2003, 2003, 1(4):470-480.

[12] Toh C K. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Commun. Mag., 2001(6):138-147.

[13] Singh S, Woo M, Raghavendra C S. Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks[C]. Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, 1998:181-190.

[14] Sanchez M, Manzoni P, Haas Z J. Determination of Critical Transmission Range in Ad-Hoc Networks[M]. Multi-access Mobility and Tele-traffic for Wireless Communications Workshop (MMT'99), Venice, Italy, 1999.

[15] Lahiri K, Raghunathan A, Dey S, et al. Battery-Driven System Design: A New Frontier in Low Power Design[C]. Proc. Intel. Conf. on VLSI Design, Bangalore, India, 2002:261-267.

[16] Monks J, Bharghavan V, Hwu W M. A Power Controlled Multiple Access Protocol for Wireless Packet Networks[C]. Proc. IEEE INFOCOM Conf., 2001:219-228.

[17] Rodoplu V, Meng T. Minimum Energy Mobile Wireless Networks[J]. IEEE Selected Areas in Comm., 1998, 17(8):1333-1344.

[18] El Batt T, Ephremides A. Joint Scheduling and Power Control for Wireless Ad Hoc Networks[C]. Proc. IEEE INFOCOM Conf., 2002:976-984.

[19] Kawadia V, Kumar P R. A Cautionary Perspective on Cross Layer Design[J]. IEEE Wireless Communication Magazine, 2003(7).

[20] Mohammad Ilyas. The Handbook of Ad hoc Wireless Networks[M]. CRC Press, 2003.

责任编辑:杨敏

(上接第10页)

[3] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005:6-11.

[4] 何友,王国宏. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000:156-160.

[5] Lindsey S, Raghavendra CS. PEGASIS, Power-Efficient gathering in sensor information systems[EB/OL]. <http://www.cs.wayne.edu/~loren/csc8220-info/menu.html>.

[6] Govindan Ramesh, Shenker Scott, et al. Highly Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks[A]. Proceedings of the 2001 ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing: MobiHoc 2001[C], 2001:251-254.

[7] University of California at Berkeley. TinyOS[EB/OL]. <http://webs.cs.berkeley.edu/tos>.

[8] Tossim, tinyviz[EB/OL], <http://www.tinyos.net/tinyox-1.x/doc>.

责任编辑:张荣香