

文章编号: 1672-2892(2010)06-0726-07

无线自组网 MAC 层和网络层节能策略

唐晓宁, 双兵, 陈佳品

(上海交通大学 微纳科学技术研究院, 上海 200240)

摘要: 无线自组网固有的分布式、自组织特性使得它具有更多的特殊性, 对无线自组网的设计也提出了更多的挑战。针对无线自组网协议设计中的节能技术进行综述, 通过分析无线网络数据传输中能量消耗模型, 得出节能设计的基本准则, 然后分别对媒体访问控制层和网络层的节能策略进行介绍, 给出各自进行节能设计的思路。最后指出无线自组网的节能策略设计需要综合网络通信协议的各层的特点进行跨层设计。

关键词: 无线自组网; 节能策略; 跨层设计

中图分类号: TN915; TP393

文献标识码: A

MAC and network layer energy-efficient strategy for mobile Ad Hoc networks

TANG Xiao-ning, SHUANG Bing, CHEN Jia-pin

(Institute of Micro/Nano Science and Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Mobile Ad Hoc network features itself as self-organizing, multi-hop wireless network and this give rise to challenges for the network design, including high network energy efficiency consideration because typical applications of Mobile Ad Hoc network often assume limited power resource of network participants. At the beginning, current research status of energy-efficient technique in Mobile Ad Hoc network is summarized. Then based on the analysis of Energy-consume Model for data transmission in wireless network, principles for the energy-efficient design for wireless Ad Hoc network both in Media Access Control(MAC) layer and network layer are introduced. Finally, Further improvement on energy saving should consider cross-layer design.

Key words: mobile Ad Hoc networks; energy-efficient strategy; cross-layer design

无线自组网是一种不需要依靠固定通信基础设施的、能够迅速展开使用的网络体系, 网络中没有任何中心实体, 并具有自组织和自愈合的特点, 特别适合于战场、救灾等不能建立通信网络基础设施的特殊应用场合。无线自组网固有的分布式、自组织特性, 使得它与其他传统无线网络相比, 具有更多的特殊性。受节点无线发射功率的限制, 无线自组网中的节点必须采用多跳路由实现与无线覆盖范围之外的节点进行通信; 网络节点的随意移动使得无线自组网的网络拓扑也会发生动态变化; 移动节点大多采用电池供电, 工作能量非常有限; 在安全性方面, 由于采用无线信道、分布式的网络控制技术, 并由于其有限电源的特性, 无线自组网更容易受到攻击。无线自组网的特殊性给其设计带来了更多的挑战, 目前无线自组网研究中的主要热点和难点问题为媒体访问控制(MAC)协议、路由协议、能量消耗、节点定位以及安全性问题等。无线自组网的多跳特性意味着网络中的每个节点既要作为通信终端进行数据操作, 又要作为路由器转发节点之间的报文, 而所有这些操作都需要耗费能量。提供服务消耗能量与节点有限的能量供给之间存在矛盾, 使得能量问题已经成为无线自组网应用的瓶颈。要保证无线自组网长时间可靠的工作, 一方面采用高能量密度的电池, 另一方面就是采用节能措施。近年来, 在限制电池重量的情况下提高电池容量的技术发展得相当缓慢, 在这种情况下, 减少节点的能量消费就变得至关重要。研究表明^[1-3], 在典型的笔记本电脑中, 36%的能量由显示器消耗, 21%由 CPU 和内存消耗, 18%由无线网卡消耗, 18%由硬盘消耗。可见无线通信的能耗是通信终端(节点)能量消耗的重要组成部分, 随着通信终端之间通过无线通信进行数据交换的需求越来越迫切, 更需要从网络设计的角度来考虑降低能耗的策略, 节省由于无线通信而消耗的能量。因此无线自组网通信中的节能策略研究逐渐成为无线自组网领域研究的重点^[4]。

1 无线网络中的耗能分析

无线通信的能量消耗主要是指无线网络接口消耗的能量。通常,无线网络接口有4种能量消耗状态:发射状态、接收状态、空闲状态和休眠状态^[3]。在发射状态下,节点正在发送数据分组,此时消耗的能量最大。在接收状态下,节点正在接收数据分组,此时节点的能耗相对于发射状态较小。在空闲状态下,节点既不发送也不接收数据分组,而是对信道进行侦听,此时节点随时可以进行数据发射和接收,在此状态下节点的能耗更小。在休眠状态下,节点关闭无线接口,此时它不能进行数据收发,功耗最小。

将节点在4种工作状态下的功耗分别表示为: P_{tr} 、 P_{rcv} 、 P_{idle} 和 P_{sleep} ,则存在关系式: $P_{tr} > P_{rcv} > P_{idle} > P_{sleep}$ 。用 T_D 表示节点发射数据分组D所需要的时间,则发送和接收数据分组D所需要消耗的能量可以线性表示为^[5]:

$$E_{tr} = P_{tr} T_D \quad (1)$$

$$E_{rcv} = P_{rcv} T_D \quad (2)$$

当节点*i*向其下一跳节点单播发送数据分组D时,由于无线信道的共享特性,如果该节点的邻居节点处于空闲状态,则会接收到该数据分组;如果处于休眠状态则不接收该分组。结合式(1)和式(2)可以得到节点*i*向其邻居节点单播发送数据分组时网络中的能耗,简单表示为:

$$COST(i) = \left(P_{tr} + \sum_{j \in N(i)} \gamma_j P_{rcv} \right) T_D \quad (3)$$

式中: $COST(i)$ 表示节点*i*向邻居节点单播发送数据分组时网络中的能耗; $N(i)$ 表示节点*i*的邻居节点集合; γ_j 表示邻居节点*j*此时的工作状态, $\gamma_j=1$ 表示节点处于空闲状态, $\gamma_j=0$ 表示节点处于休眠状态。

由式(3)可以看出,当节点在发送数据分组时,网络中的能耗与节点的发射功率、邻居节点的工作状态、邻居节点的数量以及数据分组的长度有关。从以上无线自组网的简化能耗模型可以得出无线自组网中节能设计的准则:

1) 网络中发送的数据分组应该尽量少,分组的长度也应该尽量短。也就是说,网络中应该尽量避免发送不必要的分组,数据分组的内容应该尽量精简,或者通过数据压缩或编码的方法减小数据分组的长度。

2) 节点的发射功率应该适中。发射功率过大,一方面会增加节点本身的发射能耗,另一方面会使节点的发射覆盖范围增大,邻居节点数量也会相应增加,使得网络中的接收能耗增加,而且还会与覆盖范围内的其他节点的数据传输产生干扰、碰撞,引发数据重传,进一步增加能耗。但是如果发射功率过小,则会增加数据分组在网络中传输的跳数,会增大数据传输的延迟,同时传输的可靠性也会降低。

3) 根据网络状态实时调整节点的工作状态。如果某邻居节点处于空闲状态,则数据分组在发送时,该邻居节点也会接收分组而消耗能量;而如果该节点处于休眠状态,则不会接收不属于自己的数据分组,从而避免了能量的消耗。因此可根据网络的状态,设计节点状态动态切换策略,避免不必要的分组接收,达到降低能耗的目的。

4) 优化信道访问和接入策略设计,减小信道干扰、碰撞引起的重传。

5) 尽量少用广播方式发送数据。对于数据广播,所有接收到广播分组的节点都会重新广播该分组,这样会有大量冗余的分组转发和接收,造成更大量的能量浪费。

除了无线网络接口消耗的能量,节点计算单元在处理网络协议或通信过程其他任务时也要消耗能量,例如CPU、内存等硬件的使用,数据压缩、纠错算法等软件算法消耗的能量。在设计中需要针对通信和计算对能量的消耗进行折中,追求低能耗的通信技术可能导致高的计算消耗;反之,采用低能耗的计算技术可能会导致高的通信消耗。因此,能量有效的协议需要综合网络通信和计算单元的能耗,对二者进行权衡^[3]。

2 MAC 层节能设计

无线网络中MAC层相关的耗能途径主要有几方面:

1) 如果MAC协议采用竞争的方式共享无线信道,节点发送数据的过程中,会引起节点之间的数据碰撞,这就需要重传数据,从而消耗节点更多的能量。

2) 节点接收并处理不必要的分组,这种串音现象造成节点的无线接收和处理器模块消耗更多的能量。

3) 节点在不发送数据时,一直保持对无线信道的空闲侦听,以便于接收可能传输给自己的数据,这种不必要的空闲侦听会造成能量浪费。

4) 在控制节点之间的信道分配时,如果控制消息过多,也会消耗较多的网络能量。

因此, MAC层节能设计的目标是最小化能量消耗的同时最大化网络的性能^[6]。在MAC层设计中通常采用的节能措施主要有:通过减少节点间发送数据时的冲突,避免重传等措施来减少能量消耗;采用MAC层的功率管理策略,通过改变节点的发送、空闲和休眠状态来减少能耗,如无线自组网信令能量感知多路接入协议(Power Aware Multi-access protocol with Signaling for Ad hoc networks, PAMAS)^[7]、IEEE 802.11分布协调功能(Distributed Coordination Function, DCF)节能策略^[8]、动态节能机制(Dynamic Power Saving Mechanism, DPSM)^[9];此外还可以使用功率控制机制来提高能量的利用效率,如功率支配媒体访问控制(Power Control MAC, PCM)^[10]、功率支配多点接入(Power Controlled Multi-Access, PCMA)^[11]和能源节省媒体访问控制(Energy-Conserving MAC, EC-MAC)^[12]协议等。

1) PAMAS算法: PAMAS算法采用2个独立的信道协调节点之间的信道分配:信令信道(Signaling Channel)和数据信道(Data Channel)。控制帧请求发送/允许发送协议(Request To Send/Clear To Send, RTS/CTS)通过信令信道进行传输,数据帧通过另外的数据信道传输。当节点有数据帧要发送时,先在信令信道上发出RTS帧,然后等待接收目标节点回复的CTS帧。如果收到CTS帧,它就通过数据信道发送数据。目标节点在接收数据的同时会在信令信道上发送“忙音”信号,那些正在侦听信令信道的节点可以决定何时开始进入休眠状态,而休眠的时间长短则根据所传输数据的长度来估计。

2) IEEE 802.11 DCF节能策略: IEEE 802.11 DCF协议是基于多址冲突避免(Multiple Access with Collision Avoidance, MACA)^[13]协议发展而来的,采用带有冲突检测的载波检测多址访问(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, CSMA/CA)的多路接入技术。在IEEE 802.11协议中,终端节点可以切换到睡眠模式,并将自身的状态报告给接入点(Access Point, AP)。这样接入点就可以将发送给处于睡眠模式的终端节点的数据包缓存起来,并周期性地向处于睡眠状态的终端发出有数据包被缓存的beacon消息。当终端节点醒来以后,侦听到此beacon消息,则向接入点发出回应,然后接入点就可以将缓存的数据包发送给相应的节点。这种方法可以降低节点的能耗,但是会造成数据包的延迟,并可能影响网络的网路服务质量(Quality of Service, QoS)。

3) DPSM: DPSM是一种IEEE 802.11节能策略的改进方案。在IEEE 802.11 DCF模式的每个beacon期间,每个节点必须在固定的广播传输指示信息窗(Announcement Traffic Indication Message, ATIM)时间窗内处于唤醒状态,侦听是否有属于自己的数据包。而DPSM通过动态调整ATIM窗的大小,为节点获得更多的睡眠时间。在DPSM中,每个节点动态而且独立地选择ATIM窗的时间,这样发送节点和接收节点在完成数据传输以后就可以立即进入睡眠状态,而不需要等到beacon周期结束,从而使得DPSM具有比IEEE 802.11 DCF协议更好的节能效果。

4) PCM: 在PCM中, RTS和CTS数据包采用最大发射功率进行发送,而数据和应答(Acknowledgement, ACK)数据包的发射功率则采用发送者和接收者之间通信所需的最小功率。发送节点首先以最大功率发出RTS,并在RTS数据包中包含该发射功率值,接收节点收到该RTS并测量实际接收到的信号功率。根据接收到的实际信号功率和数据包的发射功率值,接收节点就可以估计出2节点间进行数据传输所需要的最小功率,并将此最小功率值包含在CTS中以最大发射功率发出。这样发送节点就可以根据计算出的最小数据传输功率进行数据传输。而在较大范围内侦听到RTS/CTS的其他节点都会延迟数据传输,从而有效避免了干扰,提高吞吐率,达到节能的目的。但是PCM需要精确地估计接收报文的信号强度,无线信号传递中的动态衰减或遮挡都可能影响其性能。

5) PCMA: PCMA通过控制发送节点的传输功率使接收节点刚好可以接收到数据包,从而达到节能的目的,可以避免与其他邻居节点之间的干扰,通过提高空间频率的复用效率来达到节能的目的。PCMA也采用2个信道:1个用于发出忙音,另1个用于数据和控制数据的传输。在数据传输前,发送者在数据信道上发出发送消耗能量请求(Request Power To Send, RPTS)数据包,接收者收到后发出发送消耗能量回应(Accept Power To Send, APTS)数据包进行响应。通过RPTS-APTS的交换,可以计算出发送者和接收者之间进行有效的数据传输所需要的最小传输功率,之后就开用此功率进行数据传输。同时在另1个信道,接收者通过设置周期性的脉冲作为忙音信号,其他节点通过监测忙音信道就可以进行类似于CSMA/CA的退让。

以下是MAC层节能设计的一些建议^[3,14]:

1) 应尽可能减少数据发送冲突,从而减小重传引起的能量消耗和通信延迟。需要注意的是由于无线信道的高误码率和节点的移动特性,数据重传是不可能完全避免的,只能采取措施尽量减少冲突,降低重传的概率。

2) 在无线广播环境中,节点时刻处于侦听状态,会导致能量损耗。对此可以通过向每个终端广播数据传输调度表,这样终端可以在不属于自己的时隙之外处于休眠状态,从而减少侦听能耗。

3) 当节点的射频单元在发送模式与接收模式之间进行切换时,也会消耗一定的时间和能量,因此应该尽可能为节点的数据收发分配连续的时隙,从而减少频繁切换引起的能量消耗。

4) 可以参考 IEEE 802.11 DCF 的节能策略: 无线终端在需要节能时可以切换到睡眠模式, 由基站缓存发送给这些节点的消息, 然后基站周期性地广播 beacon 消息通知哪些终端有消息需要接收。终端周期性地唤醒并侦听这些 beacon 消息并通知基站自己可以接收消息。该方法可以节省能耗, 但是会引起消息的延迟。

5) 如需要通过预约来申请带宽, 从节能和带宽利用率的角度来讲, 最好是通过 1 条预约消息申请多个时隙。

6) 可以通过调整节点的发射功率来控制节点通信覆盖范围, 既可以减小发射功率, 又可以减小节点之间的干扰, 避免冲突。

7) 当信道质量较差时, 应该避免数据传输^[15], 还可以通过采用自动重发请求和前向纠错机制来平衡重发和长分组纠错, 从而节省能量。

3 网络层节能策略

能量的使用效率问题涉及到无线网络的每一层, 在网络层主要考虑网络的路由协议和网络的拓扑结构控制, 其中路由协议的合理设计可以极大地降低能量的消耗^[16]。近年来提出了很多考虑节能的路由协议, 根据其作用机制可以将其分为 2 类: 主动式节能路由协议和被动式节能路由协议。主动式节能路由协议主要根据网络的状态来主动地考虑节能, 也就是根据网络中节点之间的能量状态, 通过制定智能化的、考虑能量的路由决策来指导网络中的数据传输。被动式节能路由协议则考虑如何保持整个网络的有效连通, 同时减少网络的能耗, 通过关闭一些空闲节点的发射接口, 一方面保持合适的网路连通性, 一方面达到节能目的^[17]。

3.1 主动式节能路由协议

主动式节能路由算法通过主动控制网络路由的选择达到路由能量优化的目的, 通常采用 2 种节能控制策略: 总能量消耗最小化路由和网络生存时间最大化路由。前者的目标是选择路由路径使每个数据分组的传输总能耗最小, 后者主要通过在网络中的所有节点之间平均分配能量消耗达到延长网络寿命的目的。为了实现节能目的, 主动式节能路由协议设计的重点就是在路由决策中引入网络的能量状态, 通过建立基于能量(功率)的路由度量标准, 来提高网络的能量使用效率。

1) 总能量消耗最小化路由

总能量消耗最小化是找到 1 条传送路径, 使从源节点传送 1 个数据包到达目的节点所消耗的网络总能量最小。假设数据分组从源节点 n_1 经过中间节点 n_2, n_3, \dots 到达目标节点 n_k , 则数据分组在该路径传播的过程中消耗的能量可以表示为:

$$E = \sum_{i=1}^{k-1} T(n_i, n_{i+1}) \quad (4)$$

式中: $T(n_i, n_{i+1})$ 表示从节点 n_i 向 n_{i+1} 传输该分组所消耗的能量, 包括发射耗能和接收耗能这 2 部分。总能量消耗最小化路由设计的目标就是最小化每个数据分组在传输过程的总能耗 E 。

根据自组网中数据传输的能量消耗模型, 采用总能量消耗最小化作为路由度量的准则将会使节点更趋向于选择跳数多的路由进行数据转发。PARO^[18]就是典型地利用中间节点进行数据转发从而提高路由能量效率的方法。Stojmenovic and Lin^[19]提出一种基于局部贪婪策略的方法, 用于最小化从源节点到目的节点进行数据转发所消耗的能量, 并首次从理论上分析了采用中间节点转发或进行直接传输的条件。位置启发能量感知路由(Location Aided Power Aware Routing, LAPAR)^[20]引入中继区的概念, 中继区的选择需要综合考虑源节点和目标节点的位置, 数据分组通过中继区内的节点进行转发将更有能量效率。最小总传输能量路由(Minimum Total Transmission Power Routing, MTPR)策略^[21]在考虑路由能耗最小化的同时, 还将通信的可靠性作为路由度量的另一个标准, 节点可以调整其发射功率, 来保证接收节点可以获得可靠的信噪比, 从而提高通信的可靠性。同时还引入 2 种故障重传机制: 端到端重传(End to End Retransmission, EER)和逐跳重传(Hop to Hop Retransmission, HHR), 以提高故障恢复的效率。

总能量消耗最小化路由协议没有考虑节点的剩余能量, 有可能使一些关键节点频繁地落入最小传送能量的路径上, 过量的负载使得这些节点过早地死亡, 产生网络分区。同时, 跳数过多也对网络的性能(可靠性、延迟等)造成了较大的影响, 有可能浪费更多的能量。

2) 网络生存时间最大化路由

网络生存时间最大化路由的基本思想是均匀地消耗整个网络的节点能量。为此, 应该尽量选用具有足够的剩余能量的节点来进行路由转发, 而不是简单根据能量消耗来选择路由。

最小电池耗费路由(Minimum Battery Cost Routing, MBCR)^[21]在路由选择时先计算每条路径上所有节点的电池成本总和,然后再选出电池成本总和最小的路径作为路由。MMBCR^[21]在选择路由时则考虑每条路径上电池成本最大的“关键”节点,选定“关键”节点电池成本最小的路径作为路由。这样可以避免某些节点被过度使用,也可避免选择含有较小剩余电池容量节点的路径作为路由,从而延长网络的生命周期。最小排干率策略(Minimum Drain Rate, MDR)^[22]将路径中最小的节点剩余电池容量与节点电池消耗率的比值定义为该路径的寿命,在路由选择时则选用具有最长寿命的路径。MRPC^[23]不仅仅利用剩余电池能量,还根据在给定链路上可靠转发1个报文所需的能量来确定节点的转发能力,链路传输成本还取决于节点间的物理距离和链路故障率。采用max-min公式,MRPC在“临界”节点(具有最小剩余报文传输能力的节点)中选择具有最大报文容量的路径,以达到延长网络寿命的目的。EA-AODV^[24]采用2个步骤来设计节能协议:首先,根据节点的剩余能量对节点进行分类,不同分类的节点对路由协议的动态变化做出不同的响应;其次路由度量函数考虑节点的邻居个数和节点的剩余能量,通过与邻居数成正比的系数来增加其路由成本,这样当处于较低能量水平的节点具有较多的高剩余能量邻居节点时,可以通过邻居节点来代替参与路由。

以上算法主要从延长整个网络工作寿命的角度来进行路由选择,通过考虑数据转发路径中“关键”节点的剩余能量来防止节点过早被耗尽,达到均衡节点负载,延长整个网络寿命的目的,但是并不能保证所选路径的总能耗最小。

3) 综合节能方案

通常路由总能耗最小和网络生存时间最大化这2个目标之间是相互冲突的,需要综合权衡两者之间的关系,寻找其平衡点。

文献[25]提出的max-min zP_{\min} 算法在考虑路径的总能耗最多为 P_{\min} 的约束条件下选择具有最大最小节点剩余能量的路径。算法首先找出具有最小总能耗 P_{\min} 的路径,然后从该路径中去掉最小剩余能量的节点。之后,算法搜索不包含该被去除节点的路径,直到找到一条路径其最小能耗超过 $zP_{\min}(z>1)$ 。文献[21]提出条件化最大最小电池耗费路由(Conditional Max-Min Battery Capacity Routing, CMMBCR)策略,给定一个值 λ ,当存在这样的路径,路径上瓶颈节点的剩余能量大于 λ ,就在这些满足条件的路径中找一条总能耗最小的路由,否则执行相应的MMBCR算法。文献[22]提出了相对应的条件化最小排干率路由策略(Conditional Minimum Drain Rate, CMDR),区别在于它考虑的是能量瓶颈节点的生存时间。综合考虑路径总能耗最小和避开瓶颈节点的最大化网络寿命路由策略,比单独考虑其中一项指标具有更好的性能,但是如何权衡这两者之间的影响,是一个NP-hard问题。

3.2 被动式节能路由协议

在无线自组网中,用于通信的射频单元不仅在发送和接收时消耗能量,而且在处于空闲或侦听状态时也要消耗能量,而在空闲时消耗的能量也是不容忽视的^[26-27]。被动式节能路由协议就是关闭尽可能多的射频单元,同时保持必要的网络连通性^[19],达到节能的目的。如何确定网络节点之间的开关调度是被动式节能路由协议的研究重点。有些协议采用分布式的技术,让每个节点自行决定其开关状态;还有一些协议采用集中的方式进行各独立节点的调度管理,通过指定一些骨干节点作为协调器来决定其从属节点的开关调度。

地理信息自适应保真(Geographical Adaptive Fidelity, GAF)算法^[26]根据网络中节点的地理信息将网络划分为一些“虚拟网格”,相邻网格内的任意2个节点之间都可以直接通信,每个网格内必须保持足够的节点处于活动状态以保证网络的连通性,而其他节点则可以进入休眠状态,减少能耗。

文献[27]提出了2种分布式的协调路由算法来管理节点的工作状态:基本节能算法(Basic Energy-Conserving Algorithm, BECA)和自适应保真节能算法(Adaptive Fidelity Energy-Conserving Algorithm, AFECA)。BECA的基本思想是在给定的时间间隔内,节点没有进行数据的发送、转发或接收时,就关闭其射频单元,进入休眠状态。在休眠状态时,如果节点有数据要发送则直接进入活动状态,否则节点周期性地休眠和侦听状态之间切换。AFECA则是在BECA的基础上根据邻居节点的密度来调整节点的休眠时间。

SPAN^[28]是另一种不会牺牲网络连通性的节能算法,各节点根据其可用能量和邻居节点的状态决定其休眠状态。节点周期性地检查是否可以进入休眠模式,当某个节点的2个邻居不能直接互联或者不能通过其他协调器节点通信,那么该节点进入协调器模式,否则进入休眠模式。当其他节点处于休眠模式时,由协调器节点负责网络中的路由。

在协调能量节省算法(Coordinated Power Conservation, CPC)^[29]中,采用骨干节点(CPC Server)来协调调度周围非骨干节点(CPC Client)的休眠时间。当CPC Client节点没有通信动作时,就向CPC Server发休眠请求,由CPC Server决定是否同意其休眠以及休眠的时间间隔。

设计无线自组网的能量高效路由协议是一个富有挑战性的课题,目前节能路由协议的研究中主要存在以下难点:

1) 节点传输数据时消耗的能量很难确定。目前的能量消耗模型都没有考虑通信节点之间的障碍或干扰对能量消耗的影响,而且大多数模型都要求节点之间的距离是确定的。如果出于这个目的,为节点增加定位设备,往往是得不偿失的,因为定位设备也需要消耗能量。

2) 在无线自组网的路由设计中,节能并不是唯一的目的。节能目标可能会与其他路由性能的保证相冲突,比如从节能的角度来看,应该考虑采用多跳路由而不是单跳的长距离传输,但是多跳路由会增加网络的端到端延迟,同时还会降低通信的可靠性,在通信中通常又是不允许的。

3) 安全性和其他 QoS 保证的需求都可能会增加节能路由协议的设计难度。

4 无线自组网节能策略的跨层设计

无线网络通信协议各层的设计都首先需要考虑其应用需求,结合节能、可靠的原则进行综合设计。各层功能的设计首先要满足通信网络的应用需求,保证网络节点之间的可靠数据传输,然后再从节能的角度对各功能层进行优化设计,对各功能层的能量消耗进行控制,从全局的角度对能量的使用进行优化,提高通信网络的能量效率。

对于无线网络节点而言,无线通信硬件在数据收发时消耗的能量远大于其他硬件的能耗,因此在网络通信协议设计中,需要考虑供电的约束,对能量消耗进行优化管理。在物理层和 MAC 层可以采用功率控制机制,降低节点的发射能耗;在网络层可以设计以延长网络工作寿命为目的的路由策略,通过平衡节点之间的负载分配达到均衡能量消耗目的,从而可能延长无线网络的工作时间;在应用层可以根据应用的需要对节点的工作状态进行管理,在不影响网络通信的情况下,协调节点进入低功耗状态,降低节点的能耗。

5 结论

虽然在无线自组网的节能方面已经作了大量的研究工作,但是该领域的研究仍然处于初级阶段,到目前为止没有一种通用的有效解决方案,还需要进一步的研究。无线自组网的能量问题涉及到网络协议设计的各个功能层,各个层次的独立优化不一定会带来整个系统的性能优化^[20],为了提升网络整体的能量效能,在无线自组网的节能策略设计中需要采用支持跨层交互和实时性能优化的跨层设计方法,通过使用层间交互,不同的协议层之间可以及时共享本地信息,减少处理与通信开销,优化系统的整体能量效率。

参考文献:

- [1] Stemm M, Katz R H. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices[J]. IEEE Trans. on Communications, 1997, E80-B(8):1125-1131.
- [2] Udani S, Smith J. Power management in mobile computing(a survey)[R]. (2007-06-21)[2010-05-07]. <http://www.cis.upenn.edu/udani/papers.html>.
- [3] Jones C E, Sivalingam K M, Agrawal P, et al. A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks[J]. Wireless Networks, 2001, 7(4):343-358.
- [4] Bambos N. Toward power-sensitive network architectures in wireless communications: concepts, issues and design aspects[J]. IEEE Personal Communications, 1998, 5(3):50-59.
- [5] Allard G, Minet P, Nguyen D Q, et al. Evaluation of the energy consumption in MANET[C]// Ad hoc-Now 2006. Ottawa, Canada: [s.n.], 2006:170-183.
- [6] Kumar S, Raghavan V S, Deng J. Medium Access Control protocols for ad hoc wireless networks: A survey[J]. Ad Hoc Networks, 2006, 4(3):326-358.
- [7] Singh S, Raghavendra C S. PAMAS: Power aware multi-access protocol with signaling for Ad Hoc networks[J]. ACM Computer Communication Review, 1998, 28(3):5-26.
- [8] IEEE Standard 802.11. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications[S]. 1997.
- [9] Jung E S, Vaidya N H. An energy efficient MAC protocol for wireless LANs[C]// Proceedings of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE, 2002, 3:1756-1764.
- [10] Jung E S, Vaidya N H. A Power Control MAC protocol for ad hoc networks[J]. Wireless Networks, 2005, 11(1,2):55-66.

- [11] Monks J, Bharghavan V, Hwu W. A Power Controlled Multiple Access protocol for wireless packet networks[C]// Proceedings of the IEEE INFOCOM. Anchorage, AK:[s.n.], 2001,1:219-228.
- [12] Sivalingam K M, Chen J C, Agrawal P, et al. Design and analysis of low-power access protocols for wireless and mobile ATM networks[J]. Wireless Networks, 2000,6(1):73-87.
- [13] Karn P. MACA-a new channel access method for packet radio[C]// Proceedings of ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking. London, UK:[s.n.], 1990:134-140.
- [14] Chen J C, Sivalingam K M, Agrawal P, et al. A comparison of MAC protocols for wireless local networks based on battery power consumption[C]// Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '98). San Francisco, CA:[s.n.], 1998,1:150-157.
- [15] Zorzi M, Rao R. Energy constrained error control for wireless channels[J]. IEEE Personal Communications, 1997,4(6):27-33.
- [16] Natalia V, Francisco B A. A survey of routing protocols for energy constrained ad hoc wireless networks[C]// Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Computing and Communications. Jeju, KOREA:[s.n.], 2007:522-527.
- [17] Li J G, Cordes D, Zhang J Y. Power-aware routing protocols in ad hoc wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2005,12(6):69-81.
- [18] Li J G, Cordes D, Zhang J Y. PARO:supporting dynamic power controlled routing in wireless ad hoc networks[J]. Wireless Networks, 2003,9(5):443-460.
- [19] Stojmenovic I, Lin X. Power Aware Localized Routing in Wireless Networks[J]. IEEE Trans. Parallel and Distributed System, 2001,12(11):1122-1133.
- [20] Xue Y, Li B. A Location-aided Power-aware Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks[C]// Proc. IEEE Global Telecommun. Conf.. San Antonio, TX, USA:[s.n.], 2001,5:2837-2841.
- [21] Toh C. Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2001,39(6):138-147.
- [22] Kim D, Garcia J, Obraczka K. Routing Mechanisms for Mobile Ad Hoc Networks based on the Energy Drain Rate[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003,2(2):161-173.
- [23] Misra A, Banerjee S. MRPC:Maximizing Network Lifetime for Reliable Routing in Wireless Environments[C]// Wireless Communications and Networking Conference. Orlando, FL, USA:[IEEE], 2002,2:800-806.
- [24] Nishant G, Samir R D. Energy-Aware On-Demand Routing for Mobile Ad Hoc Networks[C]// Mobile and Wireless Computing:4th International Workshop. Calcutta, India:[s.n.], 2002,2571:164-173.
- [25] Li Q, Aslam J, Rus D. Online Power Aware Routing in Wireless Ad Hoc Networks[C]// Proc. 7th Annual Int'l. Conf. Mobile Computing and Networking. Rome, Italy:[s.n.], 2001:97-107.
- [26] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography Informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing[C]// Proc. 7th Annual Int'l. Conf. Mobile Computing and Networking. Rome, Italy:[s.n.], 2001:70-84.
- [27] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Adaptive Energy Conserving Routing for Multihop Ad Hoc Networks[R]. Tech. rep. 527, USC/Info. Sci. Inst., 2000.
- [28] Chen B. SPAN:An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks[J]. Wireless Networks, 2002,8(5):85-96.
- [29] Srisathapornphat C, Shen C C. Coordinated Power Conservation for Ad Hoc Networks[C]// Proc. IEEE ICC. New York: IEEE, 2002,5:3330-3335.

作者简介:



唐晓宁(1976-), 男, 江苏省无锡市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为无线Ad Hoc网络、无线传感器网络.email:xntang@sjtu.edu.cn.

双兵(1979-), 男, 上海市人, 博士, 主要研究方向为无线Ad Hoc网络定位、路由协议.

陈佳品(1960-), 男, 上海市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能微系统及其信息处理.