

Ad Hoc 无线网络功率控制综述^{*}

王青山 张信明 马涛 唐何

(中国科技大学计算机科学技术系 合肥 230027) (国家高性能计算中心(合肥) 合肥 230027)
(国家高性能计算中心宁波分中心 宁波 315040)

摘要 随着无线通信的日益发展,不需要任何基础设施或集中管理的移动 Ad hoc 网络正逐渐从军用扩大到民用等诸多领域,如无线办公 LAN,家庭设备网络,传感器网络等。灵活方便的无线通信一般由电池供电,但是电池技术的缓慢进步使得电池功率成为移动 Ad hoc 网络中一种受约束的资源,功率控制问题是一个重要的研究课题。移动 Ad hoc 网络中功率控制大致可分为三类:传输功率控制、功率路由和低功率模式,本文对此作了总结、阐述。重点是从分层的角度对传输功率控制进行阐述,同时分析了功率控制问题中尚未解决的问题,为进一步的研究提出了新的课题和思路。

关键词 移动 Ad hoc 无线网络,功率控制,功率路由,低功率模式

A Survey of Power Control in Ad Hoc Wireless Networks

WANG Qing-Shan ZHANG Xin-Ming MA Tao TANG He

(Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)
(National High Performance Computing Center at Hefei, Hefei 230027)
(National High Performance Computing Center at Ningbo, Ningbo 315040)

Abstract With the development of wireless communications, mobile ad hoc networks without any established infrastructure or centralized administration are spreading from military areas to lots of civilian areas, for example wireless office local area networks, home device networks, sensor networks and so on. With the nature of flexibility and convenience, wireless communications are supported by batteries, but battery technology is not likely to progress as fast as computing. Hence, battery power becomes a constrained resource. It is easy to know power control is an important issue. Power control can be categorized as follows: transmission power control, power aware routing, and low power mode. First, with emphasis, this paper compares the similarities and differences of some typical algorithms of different layers about transmission power control. Moreover, it analyzes some unsolved problems that are believed to be of great interest.

Keywords Mobile ad hoc networks, Transmission power control, Power aware routing, Low power mode

1 引言

移动 Ad hoc 网络(MANETs, Mobile Ad hoc Networks)是一种不需要任何基础设施或集中管理的无线网络。由于它的易安装性、灵活性、自主性,目前正由军用扩展到民用,主要应用在一些不宜或无法建立有基础设施网络的地方,如:移动会议、自然灾害的营救过程、海洋舰队、行进中的军队等。

各种类型的手提设备大部分由电池供电,但电池的功率是一个有限的资源,而电池技术不可能像计算和通信技术那样迅速发展,所以如何延长电池的使用寿命就变得非常重要。因此功率控制是 MANETs 的一个关键问题。

在无线蜂窝网上功率控制问题得到了广泛的研究,功率控制由基站集中控制^[1~3]。而 MANETs 是一个没有集中管理机构的多跳无线网络,其功率控制具有新的特点。在 MANETs 中的功率控制可以实现:(1)通过选择合适的传输功率使得不会相互干扰的节点对能够同时传输,增加网络的吞吐量;这对于带宽非常珍贵的 MANETs 是极其重要的;(2)节省能量消耗,延长网络的寿命;(3)影响位出错率(BER,

Bit Error Ratio),传输速率等 QoS(Quality of Service)参数,这对支持 QoS 敏感的服务(如多媒体)很重要。

一方面,功率控制决定了节点信号的传输半径,直接影响到邻居发现,显然这是网络层的问题;另一方面,功率控制决定了节点传输所需的最小传输区域,这是 MAC(Medium Access Control)层的问题。因此需要从两个层的内在联系的角度来考虑功率控制问题。功率控制问题主要有三类:传输功率控制问题、功率路由、低功率模式。本文试图重点从传输功率控制这个角度出发,阐述功率控制对 MAC 层和网络层的影响,接着对另外两类进行简要的总结、阐述,并指出了新的研究课题和思路。

2 功率控制的要求

在无线蜂窝网中,功率控制可以根据全局的信息得出一个最优化的结果,但 MANETs 是一个无任何基础设施,没有集中管理机构的无线多跳网络,各个节点的功率控制问题必须依据局部的信息作出决定。一个理想的功率控制要满足以下几点要求:

^{*}本课题的研究得到宁波市重点博士科学基金(2003A61003)和国家重点基础发展规划 973(G1998030403, G1999032700)的资助。

(1)在 MANETs 中每个节点只能使用局部的信息来决定自己的传输半径和传输功率,由此而形成的网络连通性同各节点都以最大功率发送而形成的网络连通性相同;

(2)通过发现最小化功率路径来节约能量,延长网络的寿命;

(3)网络拓扑结构中节点的度尽量小,这样相互干扰小,增加网络的吞吐量;

(4)必须简单、高效;

(5)灵活、具有扩展性,适应节点的移动和各种规模的网络。

3 网络模型

MANETs 是一种多跳无线分组网络。它由一些可以自由移动的节点组成,不像无线蜂窝网有一个基站用来发送和接收数据,节点共享一个无线的信道,互相不干扰的节点对可以同时传输。信道的影响主要有三种类型:传播损耗(path loss),与源节点-目的节点之间的距离直接相关;阴影(shadowing),源节点-目的节点之间的物体对信号的减弱;多径传播(multipath),在接收节点处多条路径的混合。上述三种因素在具体的功率控制中可能会被简化。源节点-目的节点之间的信道增益被认为是没有方向的,即两个方向上是相等的,在控制分组及随后的数据分组的传输过程中被认为是不变的,由控制分组和数据分组得出的信道增益是相等的。

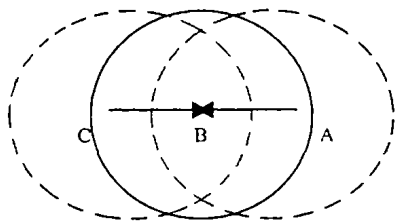
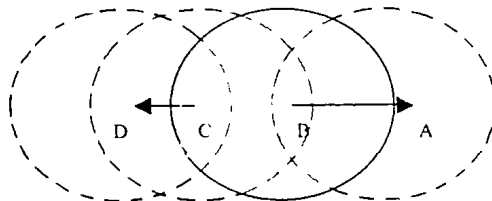


图 1 (a)隐终端问题



(b)裸终端问题

当两个节点进行数据传输时,先要获得一个最小传输区域,即以发送节点为圆心,以传输功率为半径画个圆,接收节点在这个圆中。见图 2 所示,虚线圆为节点 A 和 B 传输时节点 A 的最小传输区域,根据 RTS-CTS 握手机制,C 不能向 D 发送数据,因为它们均在 AB 的传输区域内。由文[8]知功率控制的重点是维持共享信道的节点的 SINR(Signal-to-Interference-plus-Noise power Ratio)在一定的阈值之上,当然对不同的节点,阈值可能不同。在图 2 中若 A 降低传输功率,新的传输区域如实线圆所示,则此时 C 可以向 D 发送数据了,显然这样增加了信道的空间复用,增加了网络的吞吐量。

(2)典型的功率控制 MAC 层协议 在考虑功率控制问题后,MAC 协议将会更加有效性和分布性。

文[9]发现,虽然 RTS-CTS 握手机制解决了隐终端问题和裸终端问题,但是在发送和传输延迟较长时,CTS 分组很容易遭到破坏,直接导致了后续数据分组被破坏。见图 3 所示,A 向 B 发送 RTS,B 应答 CTS,同时 C 由于不能听到 A 的 RTS,所以向 D 发送 RTS。在 D 处来自 B 的 CTS 和 C 的 RTS 碰撞,这样就 D 不会知道 B 在接收数据,以后就有可能发送数据给其它节点,这些分组将在 B 处和来自 A 的数据分组造成冲突,在负载很重时这种冲突将达到 60%。文[9~10]提出了 DBTMA(Dual Busy Tone Multiple Access),采用双信道,控制信道进行 RTS-CTS 握手,数据信道进行数据传输,另外增加两个带外忙音:BT_t(transmit busy tone)和 BT_r(receive busy tone),发送节点在发送分组时将 BT_t 打开,接收节点在同意接收分组时将 BT_r 打开。当一个节点听到 BT_t 时将延迟发送分组,同样在一个节点听到 BT_r 时将拒绝接收分组。

4 传输功率控制

4.1 从 MAC 层出发

(1)网络吞吐量 MAC 层要实现的功能很多,下面重点考虑功率控制与网络吞吐量的关系。文[4]表明一个理想的使用功率控制的 MAC 协议可以将网络吞吐量提高到 $O(\sqrt{\rho})$ 倍,其中 ρ 为节点的密度。多路访问协议(CSMA,Carrier Sense Multiple Access)MAC 层协议是基于任一节点的发送都能被其它节点听到这样的事实,但由于 MANETs 中通信距离的限制,不是所有节点都能听到,它带来了两个问题:隐终端问题和裸终端问题。所有的节点共享同一个信道,节点发送数据以最大功率(假设均为 P_{max})发送。如图 1(a)所示,A 向 B 发送数据,但 C 听不到,故也向 B 发送数据,于是就在 B 处产生冲突,导致 A 重发,这就是隐终端问题。在图 1(b)中,B 向 A 发送数据 C 听见了 B 的发送故不能接收/发送数据,造成了不必要的延迟,因为 C 和 D 之间的通信不影响 B 和 A 之间的通信,这就是裸终端问题。它们都严重地影响了协议性能,解决的办法是采用冲突避免机制,形成冲突避免的载波侦听多路访问(CSMA/CD)MAC 层协议^[5~7]。它是通过 RTS-CTS(request to send/clear to send)握手机制和其它一些办法,当节点收到控制分组或侦听到信道正忙时,就推迟自己的发送。如图 1(a)节点 A 先向 B 发送 RTS 分组,B 回应 CTS 分组,C 听到 B 的 CTS 后,延迟发送。

(receive busy tone),发送节点在发送分组时将 BT_t 打开,接收节点在同意接收分组时将 BT_r 打开。当一个节点听到 BT_t 时将延迟发送分组,同样在一个节点听到 BT_r 时将拒绝接收分组。

文[11]将 DBTMA 和功率控制结合起来。基本思想是,使用小的传输功率增加了信道的空间复用。具体做法:(1)是发送节点侦听周围有无带外忙音 BT_t 来决定传输功率 P ,若没有则 $P = P_{max}$,否则, $P = P_{max} \cdot P_{noise} / P_r$,其中 P_{max} 是最大传输功率, P_{noise} 是一个功率标准,低于它将被天线视为噪音, P_r 是发送节点听到的所有 BT_t 中的最大值。(2)接收节点在收到 RTS 后,侦听有无带外忙音 BT_r,若没有则以 P_{max} 发送 CTS,同时打开 BT_r,否则抛弃 RTS。(3)发送节点收到 CTS 后,打开 BT_t,以功率 P 发送数据分组,其中 $P = P_{max} \cdot P_{min} / P_r$, P_{min} 是一个节点区分信号和噪音的最低功率标准, P_r 是发送节点收到的 CTS 信号功率。假定信道的来回增益是相等的。可以从概率的角度对 DBTMA 和加入功率控制的 DBTMA 两者进行性能分析,见图 2 所示,当 $\overline{BC} < R_{max}$ 时,两者比为 $0 : 0.397$,当 $R_{max} < \overline{BC} \leq 3R_{max}$ 时,两者的比为 $0.910 : 0.71$ 。可见后者均比前者性能好。

文[12]提出的功率控制多路访问协议(PCMA,Power Controlled Multiple Access),重点是提高信道的利用率,模拟结果显示,同没有功率控制的 IEEE802.11 相比,网络吞吐量提高 2 倍。PCMA 坚持两条原则:(1)功率节约原则。发送节

点以最小的功率 p 发送分组到达接收节点并能被正确接收, p 是通过发送节点和接收节点之间的 RTS/CTS 分组信息而得到;(2)合作原则,让尽量多的节点共享信道,但新加入的节点不要破坏正在传输的链路。

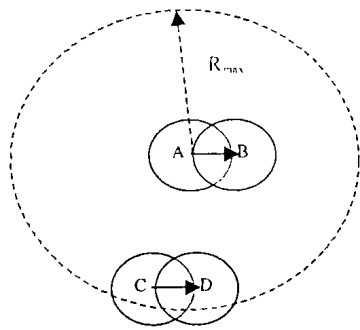


图2 有无功率控制的信道接入协议

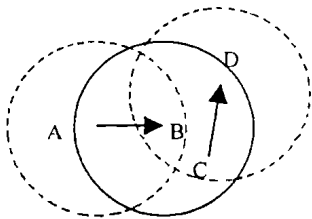


图3 简单的 RTS-CTS 握手机制由于时延长造成的意外

4.2 从网络层出发

功率控制影响网络层的拓扑结构和连通性。邻居发现是初始化由零散节点组成网络的第一步,从单个节点来看,实际上是根据自己的传输功率所能覆盖的范围去发现哪些节点可以和自己直接通信,它受节点的移动性、外界干扰、天气、噪音、天线的方向和节点的发送功率等影响。本文重点讨论功率控制,显然传输功率越大,它的邻居就越多。它的目标是通过局部的连通性保证整个网络的连通性。在 MANETs 中如果没有合适的拓扑控制算法将会直接影响到路由算法。路由是网络层最主要的功能,它是建立在一定的网络拓扑结构上的,这就形成了功率路由。也是一个正在研究的方向。

文[13]对于某一二维区域上随机放置的任意数目个对等的静态通信实体,提出了一种位置依赖的分布式的网络协议,它保证网络的强连通性和最小化能量消耗,由于它的局部特性,该协议证明对于移动网络是能自适应和近似能量最优,缺点是协议假设的电台发射模型简单,两节点间的路径损失正比于 d^n , d 为两节点之间的距离, $2 \leq n \leq 4$ 。每个节点需要借助 GPS(Global Positioning System) 知道自己的位置,协议分为两个阶段:第一阶段每个节点寻找、计算得出自己的邻居并形成网络的闭包图,第二步将功率消耗作为代价,在闭包图上使用分布式 Bellman-Ford 最短路径算法发现最优化的链路。

文[14]针对静态网络提出了集中式的拓扑控制算法,并证明了它们的最优化,然后对移动网络提出了两个分布式启发式算法能根据网络拓扑变化自动调整节点的传输功率维护网络的连通性。在静态网络中作者将问题简化为一个最优化问题。两个约束条件:连通和双连通,一个最优化目标:最大化功率使用率。在对应保证连通和双连通的两个算法(CONNECT/BICONNECT)中作者都使用了贪心策略。如算法 CONNECT 是一个类似最小代价生成树贪心算法,代价 $\gamma(l, l')$ 为源节点 i 的位置发射的信号到目的节点 j 的位置过程中的信号衰减量。算法 BICONNECT 是在算法 CONNECT 的

基础上寻找一些最小代价边形成双连通图,加强拓扑结构的鲁棒性满足一些特殊场合的需要,并证明的算法的最优化。但在 MANETs 中,由于节点的移动性,网络的拓扑结构会经常发生变化的,上面的静态网络中的集中式算法显然不能满足需要。作者提出了两个分布式启发式算法:LINT LINLT。它们不使用任何控制信息,LINT 通过路由协议收集局部的邻居信息,来调整自己的度在期望的度附近,与 LINT 不同的是,LINLT 基于链路状态路由协议,如文[15],可以知道当前网络的连通情况,来调整自己的传输功率。由于它们是基于简单的启发式思想不能保证网络在最坏情况下的连通。

文[16]同文[13]有些相似,它们都是基于位置依赖的分布式拓扑控制算法。算法分两个阶段:首先,节点 u 以一个小的功率广播邻居发现信息,统计收到的确认信息,看在每个 α 度的锥面上是否至少有一个邻居,节点 u 不停地增加传输功率直到满足条件或已达到最大功率 P_{max} ,可以证明,当 $\alpha \leq 2\pi/3$,若每个节点以最大功率传输时网络是连通的,则本算法得到的拓扑结构也是连通的。其次,算法将多余的边去掉,减少干扰和增加网络的吞吐量。同文[14]相比,本算法具有:保证最大连通集总会被发现,不需要指定节点的分布区域,适合节点的随机移动,不和任何的电台发射模型绑定,因为电台的发射模型受环境的影响太大。

文[17]提出了功率控制协议 COMPOW(Common Power)继承了 IEEE 802.11 的双向链路的特点,所有的节点以相同的功率发送。IEEE 802.11 以最大功率传输,而 COMPOW 使用一个网络层的代理对硬件提供的各种离散的功率档次比较,找出一种最小的能保证网络连通的功率档次。从功率控制的最优化要求出发,每个节点分布式作出自己的传输功率决策,链路不一定是双向的,但是 COMPOW 从实际应用和证明网络吞吐量渐近最优的角度出发,要求链路是双向的,并被应用在 Linux 中。该协议的有三个假设:(1)硬件的传输功率档次很少,否则将浪费大量的时间和空间来维护路由表;(2)网络层的路由协议是被动式;(3)传输功率切换时间很短,显然目前的硬件不能令人满意,寻找鲁棒性硬件是一个研究方向。若假设不满足时,协议的性能就会下降。

4.3 从 MAC 层和网络层的内在联系出发

一方面,功率控制决定了谁可以听见节点的发送,直接影响到邻居发现,进而影响路由,显然这是网络层的问题;另一方面,功率控制决定了为节点的传输保留多大的传输区域,这是 MAC 层的问题。因此需要从两个层的内在联系的角度来考虑功率控制问题。

文[18]初步提出了逐层设计的思想。根据各层的内在依赖关系,将功率控制分散在各层,达到全局最优。如根据香农理论,传输一位数据的时间越长则所需要的能量越少,但这显然影响了 MAC 层和应用层。

文[19]利用 MAC 层和网络层的相互作用,提出了一种新的协议 PCDC(Power Controlled Dual Channel)。将信道分为两个子信道:数据信道和控制信道。在控制信道上以最大功率 P_{max} 发送 RTS/CTS 分组,进行 RTS-CTS 握手,被所有潜在的干扰节点接收,但与 IEEE 802.11 不同的是,潜在的干扰节点可以与当前正在传输的节点对同时传输,要求是潜在的传输将在当前传输节点处产生的干扰,小于当前传输节点在 RTS/CTS 分组中宣布的可接收的干扰。增加同时传输的结点对数也就增加了网络的吞吐量。

通过控制路由请求分组的传输功率,决定下一跳的选择,

来影响网络层的性能。节点 i 生成自己的连通集 CS, (Connectivity Set) 具体过程是: (1) 连续地从控制信道上侦听信号, 假设听到节点 j 的信号, 根据信号的信道增益 (channel gain) 和到达的角度 (AOA, angle of arrival)^[20]; (2) 若存在 $u \in CS$, $P_{iu} + P_{uj} \leq P_{ij}$, 算法停止, 维持原 CS, 不变, 其中 P_{ij} 表示节点 i, j 直接通信需要的功率; (3) $CS_i \leftarrow CS_i + \{j\}$, 如果 $P_{ij} < P_{i, \max}^{(i)}$, 对于任意 $u \in CS$, 如果 $P_{iu} + P_{ju} \leq P_{iu}$, 则 $CS_i \leftarrow CS_i - \{u\}$; (4) $P_{i, \max}^{(i)} \leftarrow \max\{P_{iu}; u \in CS_i\}$ 。作者并证明了当每个节点以最大功率传输时, 网络若是连通的, 则本算法也能保证网络的连通性。PCDC 是第一个综合性和有效性的功率控制协议, 其中包含的一些参数 (如天线增益和高度) 还值得进一步探讨。

5 功率路由

路由是网络层的主要功能, 在路由协议中考虑功率的因素, 提高功率的有效性。它的目标是选择这样的路径: (1) 最小化传输分组的功率; (2) 最大化单个节点的寿命。

文[21]根据应用的需求, 提出了两个在功率消耗和数据传输的质量之间的折中的自适应算法, 该算法工作在按需路由协议之上, 如 AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing) 等。文中提出了两个算法 (BECA, Basic Energy-Conserving Algorithm; AFECA, Adaptive Fidelity Energy-Conserving Algorithm) 都是通过适当地关闭电台来达到节约能量。BECA 将节点设置为三种状态: 睡眠、监听和活动。初始化时节点处在睡眠状态, 电台关闭不消耗能量, 经过 T_s 秒进入监听状态或当有局部数据发送时进入活动状态; 活动状态时, 在 T_r 时间内若获得一路由信息且准备参与路由时或准备发送数据时就进入活动状态, 否则进入睡眠状态; 活动状态时, 在 T_r 时间内若节点没有发送或传输数据就进入睡眠状态。若路由协议规定路由请求分组每隔 T_r 秒请求发送一次, 重复 R 次。AFECA 是针对稠密的 MANETs 网络 (如稠密传感器网络), 对 BECA 加以改进, 提出当节点发现自己的邻居数目超过某个常量时, 就延长自己的睡眠时间, 达到延长网络寿命的目的。文章的贡献是根据网络层和应用层的信息适时地关闭电台, 不足之处在于: 在不同的条件 (流量、节点的移动性和节点的密度) 下, 没有对各个参数值的设置作深入讨论。

文[22]对目前提出的三种功率路由 (MTPR, Minimum Total Transmission Power Routing; MMBCR, Min-Max Battery Cost Routing; CMMBCR, Conditional Max-Min Battery Capacity Routing) 进行了比较, MTPR 选择传输功率最小的路径, 不足之处: (1) 它意味着分组经过多跳到达目的节点, 增加了延迟; (2) 没有考虑到在这条路径上有些节点的电池容量已处于某一阈值之下, 它们有可能过早地死亡。于是 MMBCR 从延长每个节点的寿命出发, 每一条可能的路由都有一个电池容量最小的节点, 将这些节点的电池容量加以比较, 选择电池容量最大的节点所在的那条路由。很明显, 它不能保证消耗的总功率最小。CMMBCR 是前两个算法的折中, 假设源节点和目的节点分别为 n_s, n_d , 在 t 时刻, 它们之间所有可能的路由集合为 Q , 整个网络中任何两节点间满足电池容量均大于阈值 r 的路由形成集合为 A , 若 $A \cap Q \neq \emptyset$, 应用算法 MTPR, 否则应用算法 MMBCR。文章通过模拟实验对这三个算法进行了比较知道: MTPR 适合稠密网络, 而 MMBCR 适合稀疏网络; 在考虑节点的监听时, 三个算法效果近似, 由此提出了在将来的工作中研究如何适时地关闭电台。

文[23]考虑到文[22]中的 CMMBCR 算法是建立在被动式路由协议上, 节点需要周期性的路由发现, 消耗能量, 于是将 CMMBCR 算法建立在按需路由协议上, 并增加两个阈值 SVSZ (selective-victim-search-zone) 和 FVSZ (forced-victim-search-zone)。选路过程: 由源节点决定路由节点的功率阈值 γ , 在满足条件的路由中选择最小传输功率的路由。在传输过程中若节点的功率小于 SVSZ, 则通知源节点重新选路, 仍然执行路由功能, 当节点的功率降到 FVSZ 以下时就不再执行路由功能, 剩下的功率用作将来发送自己的数据。

6 低功率模式

一般认为电台的能量消耗主要是用在发送和接收数据时, 但文[24~26]发现在空闲时, 电台设备需要被供电并且侦听信道、解码数据看是否是发给自己的数据, 因此空闲时电台的能量消耗不可忽略。通过实验得出能量消耗分布情况为空闲: 接收: 发送 = 1 : 1.05 : 1.4^[24]、1 : 2 : 2.5^[25] 和 1 : 1.2 : 1.7^[26]。于是文[26~30]提出一种低功率的睡眠模式。IEEE 802.11^[27]让电台周期性地进入睡眠状态, 文[26, 28~30]分别对它加以改进。一个好的功率节约模式应满足: (1) 它允许尽可能多的节点关闭电台; (2) 与所有节点都处于活动的情况相比, 在转发分组时最低限度地增加延迟。

IEEE 802.11^[27]支持两种功率模式: 活动和功率节约模式。如图 4 所示, 在每个信号周期开始时发送同步信号, 达到时钟同步的目的。信号周期由 ATIM 窗口 (Ad hoc Traffic Indication Message window) 和功率节约窗口组成。在 ATIM 窗口内, 节点监听。为缓冲的数据发送包含目的节点标识的 ATIM 帧, 收到 ATIM 帧的节点发送 ACK, 并处于活动状态。在功率节约窗口内处于活动状态的节点可以开始数据的传输, 其它节点则关闭电台, 节约能量。

文[26]使用随机算法让节点根据局部的信息随机地进入睡眠状态或作为路由主干节点, 主干节点始终处于活动状态执行路由功能, 其它节点处于功率保护模式周期性地决定是否转化为活动模式变为主干节点。具体做法是如果一个非主干节点的两个邻居节点不能直接或通过一个、二个主干节点而到达, 该节点就随机延迟一段时间宣布自己为主干节点。延迟的目的是为了防止几个邻居节点同时宣布自己为主干节点, 浪费能量, 每个候选主干节点延迟的大小考虑到它的剩余能量、它的邻居中可通过它进行通信的节点数目等因素。主干节点的撤销情况与此类似。该算法是建立在 IEEE 802.11 MAC 层的功率节约模式之上的, 对它做了三点修改: (1) 由于主干节点不进入功率节约模式, 所以它们之间的数据发送前不需要发送 RTS 分组; (2) 算法采用的底层路由因地理位置协助路由等因素造成广播信息很多, 为每个广播信息加上标识, 这样可以在一个 ATIM 窗口中发送多个广播分组; (3) 增加一个流量请求窗口。如图 4 所示。由于通过非主干节点转发的分组很少, 所有这些分组只允许在 ATIM 窗口以外, 流量请求窗口以内传输, 这样增加了非主干节点的睡眠时间。该算法保护了网络的连通性、容量, 同时节约了网络的能量, 但是由于它是建立在 IEEE 802.11 的 MAC 层上, 节点需要周期性地打开电台收集信息, 消耗一些不必要的能量, 若是建立在一个鲁棒性、有效性的 MAC 层上, 效果将更好。

文[28]中节点根据网络层和应用层提供的信息, 在睡眠、监听和活动等三种状态中转化, 提出了 GAF (Geographical Adaptive Fidelity) 算法。将通信区域划分为若干固定的“虚拟

方格”,相邻的方格如 A、B,A 中的任何节点可以直接和 B 中的任何节点通信,反之亦然。于是 A、B 中可分别选择一个代表执行路由功能,其它节点进入睡眠模式。

文[29]考虑到 IEEE 802.11 功率节约模式是针对单跳 Ad hoc 网络提出来的,对它进行了改进使它适合多跳移动 Ad hoc 网络。具体体现在三个方面:(1)通过重新设计 ATIM 窗口达到时钟同步;(2)注重邻居的发现,以免影响依靠邻居信息的路由协议的正常工作;(3)通过(1)和(2)使得事实连通的网络而在概念上被划分的情况减少,有助于改善路由协议的性能。文章提出了三个适合不同情况的功率节约协议:清醒主导区间(Dominating-Awake-Interval)协议,耗能最大但邻居发现的时间最少,适合主机移动频繁的网络;周期性全部清醒区间(Periodically-Fully-Awake-Interval)协议,耗能和邻居发现时间的平衡,可被应用在许多典型环境中;基于群(Quorum-Based)协议,耗能最少但邻居发现时间最大。

文[30]主要考虑到以前的能量节约协议注重通过地理、拓扑信息来选择路由主干节点维护全局的连通性,但是现实中许多 Ad hoc 网络是以数据为中心的,局部的流量较多,维护全局的连通性是没有必要和要付出代价。因此根据网络中流量的特征仅仅维持源节点到目的节点以及中间参与路由的节点的连通性。

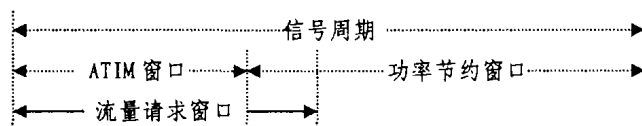


图 4 IEEE 802.11 功率节约模式

总结与展望 随着手提计算平台和小的无线设备的发展,移动 Ad hoc 网络受到越来越多的重视。功率控制问题是 MANETs 中一个重要的研究课题,MANETs 中功率控制大致可分为三类:传输功率控制、功率路由和低功率模式。目前的研究重点是传输功率控制和功率路由,随着越来越多的无线设备支持低功率的睡眠模式,功率控制的另一个新的研究课题是低功率模式。由于 MANETs 的多跳性、不可预知的移动性、没有即插电源和没有时钟同步机制,特别是最后一个特性使得这方面的研究还不深入,这是一个开放的课题。重点要解决好的两个问题是:时钟同步和邻居发现。在未来的工作中我们考虑将功率路由和最小功率模式结合起来开展研究。

本文重点是从分层的角度对传输功率控制进行阐述,同时分析了功率控制问题中尚未解决的问题,为进一步的研究提出了新的课题和思路。

参考文献

- Zander J. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio system. *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, 1992, 41(1)
- Oh J, Wasserman K. Optimality of greedy control in DS-CDMA mobile networks. In: *Proc. of Mobicom'99*, 1999
- Ayyagari D, Ephramides A. Power control for link quality protection in cellular DS-CDMA networks with integrated (packet and circuit) services. In: *Proc. of Mobicom'99*, 1999
- Gupta P, RKumar P. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, Nov. 1998
- IEEE std 802.11-1997. Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. 1997
- Karn P. Maca-a new channel access method for packet radio. In: *Proc. of ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf.* 1990. 134~140

- Fullmer C, Garcia-Luna-Aceves J. Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet-radio networks. In: *Proc. of ACM SIGCOMM'95*, 1995
- Bambos N. Toward power-sensitive network architectures in wireless communications: concepts, issues, and design aspects. *IEEE Personal Communications*, June 1998
- Deng J, Hass Z J. Dual busy tone multiple access (DBTMA): a new medium access control for packet radio networks. In: *Proc. of Intl. Conf. on Universal Personal Communications*, Oct. 1998 (ICUPC'98)
- Hass Z J, Deng J. Dual busy tone multiple access (DBTMA): performance evaluation. In: *Proc of IEEE Vehicular Technology Conf.* 1998 (VTC'98)
- Wu S L, Tseng Y C, Sheu J P. Intelligent medium access for mobile ad hoc networks with busy tone and power control. *IEEE Selected Areas in Communications*, 2000, 18(9): 1647~1657
- Monks J P, Bharghavan V, Hwu W W. A power controlled multiple access protocol for wireless packet networks. In: *Proc. of IEEE INFCOM '01*, 2001
- Rodoplu V, Meng T H. Minimum energy mobile wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(8)
- Ramanathan R, Rosales-Hain R. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment. In: *Proc of IEEE INFOCOM'00*, 2000
- Garcia-Luna-Aceves J J, Behrens J. Distributed, scalable routing based on vectors of link states. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Oct. 1995
- Wattenhofer R, Li L, Bahl P, Wang Y. Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks. In: *Proc. of IEEE INFOCOM'01*, 2001
- Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, Kumar P R. Power control in ad hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW Protocol. In: *Proc. of the European Wireless Conf.* Feb. 2002. 156~162
- Goldsmith A J, Wicker S B. Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless network. *IEEE Wireless Communications*, Aug. 2002
- Muqattash A, Krunz M. Power controlled dual channel (PCDC) medium access protocol for wireless ad hoc networks. In: *Proc. of IEEE INFOCOM'03*, 2003
- Krizman K, Biedka T E, Rappaport T S. Wireless position location: Fundamentals, implementation strategied, and source of error. In: *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference*, 1997: 919~923
- Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Adaptive energy-conserving routing for multihop ad hoc networks: [Technical Report TR-2000-527]. USC/Information Sciences Institute, Oct. 2000
- Cano J, Kim D. Investigating performance of power-aware routing protocols for mobile ad hoc networks. In: *Proc. of Intl. Mobility and Wireless Access Workshop (MobiWAC'02)* Oct. 2002
- Kim D, Park J, C-K T, Choi Y. Power-aware route maintenance protocol for mobile ad hoc networks. In: *Proc. of IEEE Intl. Conf. on Telecommunications 2003 (ICT'03)*
- Stemm M, Katz R H. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices. *IEICE Transactions on Communications*, 1997, E80-B(8): 1125~1131
- Kasten O. Energy consumption. ETH-Zurich, Swiss Federal Institute of Technology. Available at: <http://www.inf.ethz.ch/~kasten/research/bathtub/energy-consumption.html>, 2001
- Chen B, Jamieson K, Balakrishnan H, Morris R. Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. In: *Proc. of the ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking*, July 2001
- LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE Std 802.11-1999, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. IEEE, 1999
- Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: *Proc. of the Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking*, 2001. 70~84
- Tseng Y, Hsu C, Hsieh T. Power-saving protocols for IEEE 802.11-based multi-hop ad hoc networks. In: *Proc. of IEEE INFOCOM'02*, 2002
- Zheng R, Kravets R. On-demand power management for ad hoc networks. In: *Proc. of IEEE INFOCOM'03*, 2003