

自组网中关闭节点射频节省能量技术研究^{*}

李东生 向 勇 史美林

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

摘 要 随着无线自组网(Wireless Ad Hoc Network)应用需求的不断增加,电池能量限制已成为自组网应用的主要瓶颈。关闭节点射频节省能量技术逐渐成为能量敏感自组网技术中的研究热点。本文分析了关闭射频在自组网节省能量设计中的作用,探讨了它对网络的影响和进行设计的相关因素,提出了关闭节点射频的条件,并结合自组网框架给出了关闭射频节省能量的设计方案。

关键词 自组网,节省能量,休眠

Study on Power-off Radio Saving Energy Design in Wireless Ad Hoc Network

LI Dong-Sheng XIANG Yong SHI Mei-Lin

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract With the increment of the needs of Wireless Ad Hoc Network, the limit of terminal device's battery becomes the bottleneck, and research on this field becomes hot. This paper analyzes the significance of power-off node's radio during wireless Ad Hoc network saving energy designing, discusses its influence to network and other factors, points out the conditions of power-off node's radio, and bring forward a blue print of our resolution.

Keywords Wireless Ad Hoc network, Energy saving, Power-off radio

1 概述

近年来,无线通信技术高速发展,人们对无线网络通信的应用需求也在不断地增加。无线自组网(为了简化表述,本文中“无线自组网”的概念涵盖了 Mobile Ad Hoc Network (MANET)与 Sensor Network)作为一种“带有无线收发装置的移动节点组成的一个多跳的临时性的自治系统”^[1],因其具有能够廉价并快速地组网、通过多跳和转发方式传送数据和具有抗毁性等特点,被采用于军事、抗灾抢险等特殊领域中。

无线自组网终端节点基本上都采用电池作为电源,由于电池的容量有限,以及相比芯片、无线通信等技术的发展,其技术发展十分缓慢^[2]等原因,使得电源的限制成为无线自组网技术及应用发展的瓶颈。因此,从电源或能量角度出发,研究节省电源和高效利用能量等无线自组网技术正在逐渐成为该领域中研究热点。

目前的研究工作上可分为2个方面:减少能量消耗与能量负载平衡。减少能量消耗是通过减少网络节点传输或监听等状态下的能量消耗以延长节点的生存时间,进而达到延长网络生存时间或最大化递交分组的目的。能量负载平衡则是通过实现节点能量消耗的负载均衡,避免关键节点的过度使用而导致能量过早耗尽,使得网络中所有节点尽可能平均地消耗能量,以最大化网络生存时间(或最大化递交分组数)。二者有机地结合起来,才能真正实现能量的高效利用。

减少能量消耗采用的方法从根本上讲只有两个:调整节点发射功率和关闭节点射频。调整节点发射功率方法包括:以多跳小功率的路径转发数据来代替少跳大功率的路径,以节省能量;根据节点的距离采用适当的功率发送分组,以减少不必要的能量消耗等。关闭节点射频则是在适当的时机关闭

某些节点的射频,以节省能量。

关闭节点射频节省能量技术的研究源自人们对节点功耗的分析。无线自组网节点在监听信道的 idle 状态下的电源消耗是不可忽视的。M. Stemm 等人^[3]的研究认为,无线自组网节点处于 idle、receive 和 transmit 状态中消耗能量的比率为 1:1.05:1.4;B. Chen 等人^[4]研究认为这一比率应当为 1:1.2:1.7;O. Kasten 等人^[5]的研究则认为 1:2:2.5。L. M. Feeney 等人通过在实际环境中对 Lucent WaveLAN IEEE 802.11 无线网卡进行的工作功耗的测试和调查,发现无线网卡处于 idle 状态时消耗功率约为其 transmit 时的 60%左右,而关闭监听功能的 sleep 状态下这一比率仅为 5%,甚至更低^[6]。Y. Xu 等人针对目前最有影响力的 4 种路由算法:AODV、DSR、DSDV 和 TORA 中考虑 idle 因素前后对能量消耗的影响进行了研究和对比,如图 1 所示^[7],黑色为不考虑 idle 状态下能量消耗,灰色为考虑 idle 状态下能量消耗。考虑节点 idle 状态下的能量消耗后,会对节点的整体能量消耗带来巨大影响。

上述研究和调查都表明,在采取适当策略的情况下,关闭节点的监听功能,将节点从 idle 状态转为 sleep 状态,可有效地节省电源。而在一个网络中,通过拓扑结构控制、管理,使得在一个小区域内的节点在不影响数据转发的前提下,才能基于调度地轮流关闭监听功能,从而达到节省电源的目的。

已有的研究成果根据工作层面不同可分为网络层与 MAC 层两类。网络层的关闭节点射频设计主要是基于簇状拓扑结构,在一定区域内选择少数节点作为代表,负责参与多跳路由、数据转发以及缓存休眠节点的分组,其它节点则转入关闭射频的休眠状态以节省能量。Y. Xu 等人^[7]提出的基于节点真实地理位置信息的节省能量的算法(Geographical A-

^{*}基金项目:国家自然科学基金资助项目(60273010)。李东生 博士研究生;向 勇 博士、副教授;史美林 博士生导师、教授。

daptive Fidelity, GAF)与基于簇的节能算法(Cluster-based Energy Conservation, CEC), B. Chen等提出的 Span^[4]算法等都属于这一类。此外, C. Schurgers等人提出的稀疏拓扑和能量管理(Sparse Topology and Energy Management, STEM)^[8]算法,在节点密度稀疏并且网络流量负载较轻的情况下,使得节点在通常情况下关闭射频,并定期醒来,监听是否有邻居节点缓存了发往自己的数据。MAC层的关闭节点射频方法以 Suresh Singh等人^[9]提出的能量敏感的 MAC 层协议 PAMAS 为典型,该协议通过消除节点过度监听,以节省能量,其方法是通过使得节点在两种情况下:节点没有数据发送并且其邻居节点开始发送和如果节点的至少一个邻居正在传输且另一个邻居正在接收,则节点应当关闭射频(即使有数据需要发送)。

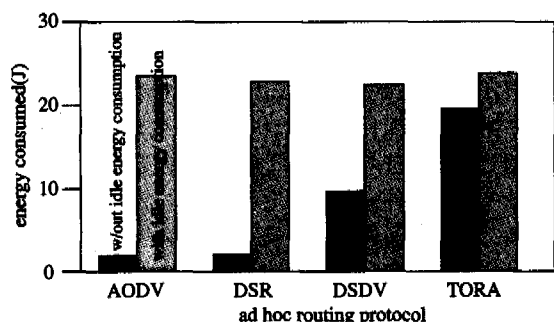


图 1 4种路由协议中不考虑与考虑 idle 状态下能量消耗的比较^[7]

上述已有的研究成果仍然存在着诸多问题。基于簇的算法虽然大多能取得较好的节省能量效果,但是要么过于复杂、难以应用于实际环境中,要么所要求的条件很多场合无法达到(如基于 GPS 的 GAF 对节点位置信息的要求)等;使用很少节点代表许多节点,减少了网络连通的冗余度,容易造成网络短时刻断开或分片。基于稀疏拓扑结构的算法带来的延迟过高,并且要求网络拓扑密度较稀疏,因而应用范围较窄。基于 MAC 层的关闭节点射频设计因忽略了网络层关闭射频的控制功能,不能达到充分节省能量的目标,并且没有考虑能量负载均衡的问题。因此,需要从可实现的角度出发,结合应用场景和需求,进一步研究关闭节点射频节省能量的技术。

着眼于关闭节点射频节省能量技术,本文讨论该技术对网络产生的影响、涉及的因素、关闭节点射频的条件和代表节点考虑等关键问题,进而提出我们的关闭节点射频以节省能量的设计方案。本文第 2 节分析了关闭节点射频对网络的影响,第 3 节讨论了进行关闭节点射频设计的相关因素,第 4 节提出了关闭节点射频的条件,第 5 节提出了我们结合对前面各方面考虑的解决方案,最后进行总结。

2 关闭节点射频对网络的影响

在自组网设计中,加入关闭部分节点的射频的设计后,对网络产生的影响主要体现在两方面:对网络连通性和网络服务质量(QoS)的影响。

对网络连通性的影响是指关闭某些节点射频后,可能造成某些路径断开,因而导致网络连通性下降,甚至导致网络的分片。虽然设计的初衷是节省能量,但是如果以部分节点不可达或网络分片为代价,显然是不可接受的。而在实际设计中,显然不会造成网络的最终分片,只会是一定时间内的连通性损失,否则就是一种错误或失败的设计。已有的研究成果

均考虑了这方面因素,因而都采取了多种措施来避免网络断开。文[4,7]方案中对代表节点(或簇首节点)的选择都要求确保代表节点能替代被代表节点参与路由,以保证网络连通性。文[8]使用休眠节点的邻居节点作为代表节点参加路由。文[9]采用的节点休眠策略使得节点只在无法监听时休眠,因而也不会造成网络断开。

一定时间内网络连通性的损失体现在应用上就是服务质量(QoS)的下降——数据传输延迟和延迟抖动增加。例如,应用的目标节点或某些中间节点处于休眠状态,都可能带来传输延迟的增加。而数据传输过程中,应用路径上的中间节点的邻居节点的休眠和醒来,可能带来物理信道的空闲和抢占,因而导致延迟抖动加大。

即使不对网络连通性产生任何影响(不考虑休眠节点自身作为目标)的情况下,仍然可能带来传输延迟的增加。例如,由于某些可能经过的中间节点处于关闭射频的休眠状态,最终选择的路由可能不是最短路由,则数据传输延迟相比最短路由情况下自然会增加。这时需要考虑节省能量与 QoS 下降的一个平衡(trade-off)——设计者必须考虑传输延迟增加的代价是否可被接受。

关闭节点射频导致网络 QoS 下降在已有实现中均有不同程度的体现。例如,在 STEM^[8]算法中,节点只要没有传输需求,就关闭射频,转入休眠状态,并定期在控制平台上醒来一小段时间,监听是否有邻居节点发给自己的唤醒信号。如果听到唤醒信号,则醒来并接收数据,再进一步对下一跳节点进行唤醒。这种方式是以增加延迟来换取能量节省的典型例子。

3 相关因素

在关闭节点射频节省能量设计中,需要考虑的重要因素包括关闭射频时间、节点间交互控制信息的方式和内容、节点密度、移动性、代表节点考虑等。

(1)在关闭节点射频的确定性条件下,节点关闭射频的时间也相应地确定下来(如文[9]);而在其它情况下,关闭节点射频的时间则需要慎重选择,以确保延迟在可接受的范围内和代表节点的有效轮转。

(2)控制信息交换同样是设计中需要考虑的因素,并且有多方面的考虑需要取舍。例如,较多的控制信息可以更有效地提供决策依据,但会带来额外的能量消耗。此外,控制信息的交互方式、采用带内信令还是带外信令,同样会带来效率和代价的均衡选择。

(3)节点密度与节点移动性均为网络拓扑相关因素,二者都与应用场景直接相关。这些拓扑结构因素带来的差别往往会对设计产生重大影响:节点密度高的应用场景中,关闭射频的算法无法适用于节点稀疏的场景中,因为可能无法保证网络连通度^[4,7];反之,同样不适用^[8]。类似地,相对静态的拓扑结构下,可以较为容易地确定代表节点和节点休眠的各种条件。而在拓扑结构变化剧烈时,必然不再适用,这时很可能无法允许节点关闭射频。因此,这两种情况下也需要采用截然不同的策略或算法。

(4)代表节点(簇首节点)是指在需要关闭射频的节点在休眠前从邻居(多数是一跳,也可能是多跳)节点中选择出来的、能够代表自己参加数据转发和缓存发往自己的分组的节点。

代表节点也是关闭射频设计中需要考虑的重要因素之

一。一些基于 MAC 层关闭节点射频设计(如 PAMAS^[9]),并不需要考虑代表节点。但在许多更普遍、有扩展性需求的应用场景中,代表节点是一个必然选择。

代表节点的选择涉及到节点位置信息、节点间邻居关系相对稳定、剩余能量等多方面因素。

代表节点的选择需要在可能的多个节点中轮转进行,即节点轮流担任代表节点和休眠节点,以确保能量消耗的平衡,从而避免某些代表节点因过度使用而耗尽能量。

GAF^[7]、CEC^[7]与 span^[4]等基于簇的关闭节点射频算法均采用了代表节点,并针对代表节点的选择、轮转等问题进行了专门的研究和设计。

4 关闭射频的条件

关闭节点射频的条件是进行设计的关键因素。我们把这些条件分成确定性条件和非确定性条件两类。确定性条件是指节点在工作中,确定可以关闭射频或不允许关闭射频的条件。当满足这些确定性条件时,节点可以肯定地关闭射频以节省能量,并且不会对网络连通性和 QoS 质量产生任何影响;或者节点明确不可以关闭射频,否则会产生不可接受的后果。非确定性条件是指当节点具备这些条件时,需要灵活和慎重选择,决定是否关闭射频以节省能量。在这种条件下,设计方案需要在节省能量与 QoS 等方面的代价间进行取舍,以达到理想的平衡。

• 确定性条件

一个确定可以关闭射频以节省能量的条件就是过度监听(Overhearing):在单一信道下确知邻居节点正在进行数据传输时,例如监听到邻居节点交互的 RTS-CTS 后可以确知后继的数据传输的时间时,本节点既不可能再接收到其它节点的信息,也不允许参与到其它数据传输中,并且可以准确地知道这个阶段将持续的时间,因此节点可以确定能够关闭节点射频以节省能量。这时节点即使打开射频,也只能监听到一些无用的信息,并且也不可以进行数据发送,否则会产生碰撞,而其它节点发送的数据也将会由于在本节点产生碰撞而无法解析。PAMAS^[9]采用了这种确定性条件进行节点休眠的决策。

节点不可关闭射频的确定性条件主要是节点正在参与数据传输的情况,如节点数据传输的源节点或目标节点。节点作为路由的中间节点并不是节点不可关闭射频的确定性条件,具体讨论将在下面非确定性条件中进行。

• 非确定性条件

非确定性条件包括:节点自身的连通度、邻居节点的连通度、邻居节点与本节点位置的相对稳定性和节点自身的剩余能量等。

节点自身的连通度是判断节点是否休眠的一个重要条件,特别是作为连通度为 1 的叶子节点就可以考虑关闭射频以节省能量。但休眠的时间需要特别考虑:过长的休眠时间可能导致有到达该节点的请求时无法及时反馈,尽管其邻居节点可以进行缓存,仍会有较大的延迟;此外,在移动场景中,该节点在休眠过程中可能已经移动到网络中非边缘的位置,这时会造成该节点无法及时参加到路由中。

邻居节点的连通度也是需要条件的条件之一。如果邻居节点只有本节点一个邻居,即本节点是邻居节点与网络其它节点通信的唯一中介,则本节点更倾向于不关闭射频,以避免造成网络分片。进一步,本节点可以作为该邻居的代表节点,

为邻居节点转入休眠时缓存分组。Span^[4]算法在选择代表节点时,定义“节点周围有 2 个(或以上)节点无法通信(直通或通过转发都不行)”,作为代表节点决定的依据即体现了对邻居节点连通度的考虑。

邻居节点与本节点位置的相对稳定性是一个本节点转入休眠的一个必要条件。休眠节点需要有邻居节点为其缓存数据,而该邻居节点与休眠节点的位置关系必然需要保持相对稳定才能够达到这一目标。

节点自身的剩余能量在关闭节点射频设计中有两方面作用:一方面是由于进行代表节点的轮转选择^[4,7],当有多个代表节点可供选择时,应当选择剩余能量多的节点,以达到能量均匀地消耗;另一方面,在某些应用(如军事应用)等场合中,当节点剩余能量减少到一定程度时,为了保证节点生存时间尽可能长,并且在关键时刻能够发出少许关键性信息时,节点可以单方面决定直接关闭射频,以保存宝贵的剩余能量。这种情况下,即使节点是某一个或几个路由的中间节点,仍可以使得这些路由断开为代价转入休眠。当然,这仍需要考虑转发的数据与节点自己寿命哪一个更重要,以做出最终决定。

无论确定性条件还是非确定性条件均与应用场景和需求直接相关。确定性条件可被直接用于决策,因此应结合应用场景尽可能多地明确,以提高设计效率。非确定性条件则需要结合其它多方面因素综合考虑,才能达到既省电又能够满足用户应用需求的设计目标。

5 关闭射频的设计方案

节点关闭射频设计与自组网的诸多方面密切相关,需要在自组网系统框架内综合考虑。基于对网络影响、关闭时间、控制信息交换、节点密度和移动性等因素的考虑,恰当地选择和使用关闭节点射频的条件和代表节点处理,并通过交叉层设计,将网络层与 MAC 层关闭节点射频的设计结合起来,共同实现确保均衡地消耗能量、可接受的 QoS 性能,以及减少或消除对影响网络拓扑的关闭节点射频节省能量的设计。

要达到上述设计目标,我们提出可以分别在网络层与 MAC 层实现协商休眠与自主休眠两种方式,如图 2 所示。通过不同休眠方式的区别对待,来优化节能效率并减少休眠所带来的负面影响。

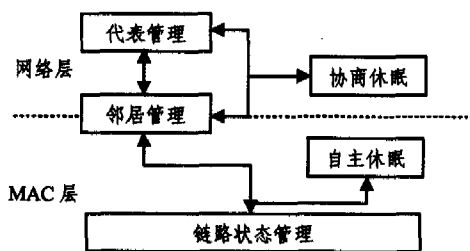


图 2 关闭节点射频节省能量设计架构

其中,协商休眠是节点在判断满足休眠的基本条件后,通过与邻居协商,找出代表节点后进行休眠的方式。协商休眠的时间相对较长,会对数据传输产生一定影响,需要采取措施以避免或减少休眠对网络带来的影响。为此,需要在自组网架构中加入邻居节点管理和代表节点管理功能模块。

自主休眠则是节点 MAC 层链路状态管理获得的状态信息,确认满足转入休眠的确定性条件后自行决策的休眠方式。自主休眠的时间通常很短,不需要与邻居协调,不会影响拓扑

(下转第 103 页)

$$\neg buffer_2 \supset \neg wait_buf \wedge writepoint_2 \wedge readpoint_2 \wedge buffer_2$$

命题得证。综上所述,1)式成立。

按照1)式的证明方法,可以证明其它各式,这里就不一一证明了。

1)式表明,若有数据等待写入缓冲区,则它总能最终进入缓冲区;2)式则表明互斥锁的发放是按序发放的,因而任一审计点都能得到互斥锁,即有3)成立;4)表明任一审计点的数据都能申请到互斥锁,并且可以执行缓冲区入口操作;5)式表明任一缓冲区中的数据都能写入到磁盘上。

根据定理1的结论,我们就可以证明该缓冲区的设计是满足活性要求的,即任一审计点的数据都能够写入缓冲区,并最终存储到磁盘上。定理2的结论就反映了这一点。

定理2 设时序 Petri 网 $auditTPN = (auditPN, f)$ 如定义2所述,对于 $\forall \alpha \in L(TPN, M)$,有

$$\langle M_0, \alpha \rangle \models \square (auditpoint_i \supset \diamond acp_disk_k)$$

其中, $i, k = 1, 2, 3$

证明:根据4)式知,

$$\langle M_0, \alpha \rangle \models \square (auditpoint_i \supset \diamond entry_buf_i)$$

由网结构,得到

$$\langle M_0, \alpha \rangle \models \square (entry_buf_i \supset \circ wait_buf)$$

再利用1)式,有

$$\langle M_0, \alpha \rangle \models \square (wait_buf \supset \diamond \neg wait_buf)$$

根据网结构,可知

$$\langle M_0, \alpha \rangle \models \square (wait_buf \supset \diamond acp_buffer_k)$$

$$\langle M_0, \alpha \rangle \models \square (acp_buffer_k \supset \circ buffer_k)$$

综合上式,得到

$$\langle M_0, \alpha \rangle \models \square (auditpoint_i \supset \diamond buffer_k)$$

最后,结合5)式,可得

$$\langle M_0, \alpha \rangle \models \square (auditpoint_i \supset \diamond acp_disk_k)$$

命题得证。

结论 本文引用时序 Petri 网,对审计缓冲区进行建模、分析和验证,取得了较好效果。一方面,利用 Petri 网描述系

统物理结构。另一方面,通过时序逻辑公式有效地反映了系统事件间的时序关系,描述了系统的规范。更为重要的是,借助于时序 Petri 网,可以通过时序逻辑的推导、演绎对系统性质进行严格的理论验证,以达到正确性证明的目的,而网的运行则可以简化这种推导过程并使之直观化。

参考文献

- 1 National Computer Security Center. A Guide to Understanding Audit in Trusted Systems [S]. Jul. 1987
- 2 US DOD. Trusted Computer System Evaluation Criteria [S]. Dec. 1985
- 3 刘海峰,卿斯汉,刘文清. 安全操作系统审计的设计与实现[J]. 计算机研究与发展,2001,38(10):1262~1268
- 4 GB 17859-1999. 计算机信息系统安全保护等级划分准则[S]
- 5 刘霞,丁红兵,主编. 网络安全、审查与控制——Windows NT Server 安全性专辑[M]. 学苑出版社
- 6 Grottola M G. The Unix Audit; Using Unix to Audit Unix [M]. McGraw-Hill Inc, 1993
- 7 Axelsson S, Lindqvist Ulf, Gustafson Ulf. An Approach to UNIX Security Logging [A][C]. In: Proceedings of the 21st National Information Systems Security Conference, 1998. 62~75
- 8 Suzuki I. Fundamental properties and application of temporal Petri nets [A][C]. In: Proc. 9th Annu Conf Information Sciences and Systems, Baltimore, MD: Johns Hopking Univ, 1985. 641~646
- 9 Peterson J L. Petri Net Theory and the Modeling of Systems [M]. Englewood Cliffs, N J. Prentice-Hall, 1981
- 10 Murata T. Petri nets; Propertier, analysis and applications [A][C]. Proc of the IEEE, 1989, 77, (4): 541~580
- 11 Suzuki I, Lu H. Temporal Petri Nets and their application to modeling and analysis of a handshake daisy chain arbiter [J]. IEEE Trans Comput, 1989, C-38(5): 696~704
- 12 Suzuki I. Formal analysis of the alternating bit protocol by temporal Petri nets [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1990, 16(11): 1273~1281
- 13 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京:电子工业出版社, 1998

(上接第48页)

结构等网络层关心的特征。

两种休眠方式有机结合,能够充分发挥采用关闭节点射频技术在节省能量中的作用,减少节点射频在不需要时工作带来的电源浪费,同时将关闭节点射频对网络连通性和 QoS 性能的影响减至最小,最大化网络生存时间。

结论 本文针对自组网设计中,通过关闭节点射频节省能量研究进行了探讨。在分析了关闭射频在节省能量中的重要作用和介绍了已有的具有代表意义的设计方案后,本文分析了关闭部分节点射频对网络可能产生的影响;进一步讨论了在关闭节点射频设计中需要考虑的关闭时间、控制信息交换、节点密度、移动性和代表节点等相关因素;在此基础上,提出了节点关闭射频的条件,最后介绍了我们的设计方案。

我们将在后续工作中把本文提出的关闭射频设计方案应用到实际的自组网系统中,指导其中的关闭节点射频算法实现,最终达到优化自组网应用系统功耗特征,拓展自组网应用范围的目的。

参考文献

- 1 英春,史美林. 自组网体系结构研究[J]. 通信学报,1999,20(9)

- 2 Powers RA. Batteries for low power electronics. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(4): 687~693
- 3 Stemm M, Katz R H. Measuring and Reducing Energy Consumption of Network Interfaces in Hand-Held Devices [J]. IEICE Transactions on Communications, 1997, E80-B(8): 1125~1131
- 4 Chen B, Kyle J K, Balakrishnan H, et al. Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks. ACM SIGMOBILE 7/01, 2002
- 5 Kasten O. Energy consumption. ETH-Zurich, Swiss Federal Institute of Technology, 2001
- 6 Feeney L M, Nilsson M. Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment, IEEE INFOCOM 2001
- 7 Xu Y, Bien S. Topology Control Protocols to Conserve Energy in Wireless Ad Hoc Networks [R]; [Technical Report # 6]. Center for Embedded Networked Sensing (CENS), 2003
- 8 Schurgers C, Tsiatsis V, Srivastava M. STEM: Topology Management for Energy Efficient Sensor Networks. IEEEAC paper, 2002
- 9 Singh S, Raghavendra C S. PAMAS-Power Aware Multi-Access protocol with Signalling for Ad Hoc Networks [A]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1998, 28(3): 5~26