

无线 Ad hoc 网络中基于节点位置的功率控制算法

文凯 郭伟 黄广杰

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘要: 为了降低无线 Ad hoc 网络中节点的能量消耗, 该文提出了一种基于节点位置的功率控制算法(PCAP)。PCAP 算法通过分析节点间的位置关系, 建立节点的优化邻居集合, 并对路由层报文、MAC 层控制报文和其它数据类报文使用不同的功率控制策略。PCAP 算法在保证网络连接性的同时能降低网络能量消耗, 计算机仿真表明, PCAP 算法在 MAC 层的吞吐量、MAC 层丢包、端到端时延等方面取得较好的性能表现。

关键词: 无线 Ad hoc 网络; 功率控制; 节点位置; 优化邻居集合

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0201-05

A Power Control Algorithm Based on Position of Node in the Wireless Ad hoc Networks

Wen Kai Guo Wei Huang Guang-Jie

(National Anti-interference Communication Technology Lab, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In order to reduce energy consumption of nodes in the wireless ad hoc networks, a Power Control Algorithm based on Position of node (PCAP) is proposed. By analyzing the relationship between nodes, the Optimized Neighbor Set (ONS) of node is built. PCAP uses different power control policies for routing packets, control packets of MAC layer and other data packets. PCAP algorithm can reduce the energy consumption and guarantee the connectivity of network. The simulation results indicate that it can achieve well network performance, such as the throughput of MAC layer, dropped packets and end to end delay.

Key words: Wireless Ad hoc network; Power control; Position of node; Optimized neighbor set

1 引言

近年来, 无线Ad hoc网络的研究受到了广泛关注, 在很多典型的无线Ad hoc网络应用中, 由于重量和体积的限制, 网络节点配备的能量源通常都是有限的, 设计高效的功率控制策略成为无线Ad hoc网络设计中的核心问题^[1]之一。无线Ad hoc网络中的能量保护策略和各个协议层密切相关, 它可以影响物理层的链路质量, 影响MAC层的带宽和频率复用度, 同时功率控制对网络层路由选择、传输层的拥塞控制及应用层的业务质量等密切相关。目前, 基于MAC层的功率控制策略主要采用以下方法: 降低富裕的发射功率、提高信号的有效辐射、干扰消除、干扰避免等。文献[1]是该领域内较新的研究成果, 它采用的是VRTPC(Variable-Range Transmission Power Control)方法, 网络通过一种可变范围的传输功率控制, 并利用最小生成树, 降低节点能量的消耗以及提高网络的业务负载能力, 但实现较为复杂。文献[2]是通过发送忙音信号来指示当前信道的占用情况, 降低网络冲突, 提高系统的吞吐量。文献[3]采用了双信道策略, 将信

道分为控制信道和数据信道, 网络资源的预约通过控制信道来完成, 可大幅度降低数据信道上的冲突, 但其使用了独立控制信道, 这使得网络资源的使用并不充分。文献[4]采用算法CBTC(Cone Based Topology Control)提出了一个类似于Yao图的拓扑结构, 能够较好地降低节点的传输功率。基于网络层的功率控制策略主要通过功率路由来实现, 功率路由是在路由选择机制中引入与能量消耗相关的权重因子。引入权重因子后, 节点的绝对能量消耗不再是最小能量消耗功率路由的唯一标准, 最小能量消耗变为一种等效能耗的概念。目前这方面的典型研究有PAR(Power-Aware Routing)^[5]、Minimum Battery Cost Routing (MBCR)^[6]、Conditional Max-Min Battery Capacity Routing(CMMBCR)^[7]。

2 基于节点位置的功率控制算法

2.1 PCAP算法

根据无线传播相关理论, 在节点间采用保证正确接收的最小功率进行通信时, 若让数据传送方向上的更多节点参与到数据的中继传输中, 则能降低传输数据的能量消耗。基于上述思想, 本文提出一种基于节点位置的传输功率控制算法——PCAP(Power Control Algorithm based on Position of the node), 该算法以IEEE802.11协议为基础, 通过节点位置信息, 调整节点的发射功率, 以去掉部分非功率高效的邻

2007-06-22 收到, 2007-11-15 改回

国家自然科学基金(60472052, 10577007), 新世纪优秀人才支持计划和通信抗干扰技术国防科技重点实验室基金(514340201 05ZS04)资助课题

居节点,增大节能路由选择的选择几率,从而达到节能的目的。在PCAP算法中,MAC层仍然将IEEE802.11协议中RTS/CTS(Request-To-Send/Clear-To-Send)握手机制作为一种可选机制,只有当节点发送长数据报文时才启用。

本文假设所有的节点分布在二维空间中,并且节点均配备了GPS(Global Position System)接收机可以获知准确的位置信息,并且可以通过网络位置管理或其它手段获知其邻居节点的位置信息,所有节点均使用全向天线,节点的发射功率在最小发射功率和最大发射功率区间上连续可调,网络中所有节点设备性能的参数相同。

2.1.1 PCAP 算法核心思想 PCAP算法的核心思想是通过建立功率高效的优化邻居集合——ONS(Optimized Neighbor Set),从而增大路由由算法选择到功率高效路径的几率。PCAP算法是一种分布式执行的算法,网络中的每个节点独立运行,互不影响,通过运行PCAP算法,每个节点建立自己的最优化邻居节点集合,其ONS中的节点满足下列条件:

$$\forall j \in \text{ONS}(i), P_T(i, j) \leq P_T(i, u) + P_T(u, j), u \in \text{NS}(i), u \neq j \quad (1)$$

其中 $P_T(i, u)$ 表示节点 i 和 u 间保证通信的最小合适功率,NS(i)表示节点 i 以最大功率发射时的邻居集合,ONS(i)是节点 i 的功率高效邻居集合。

对于 $\forall j \in \text{ONS}(i)$,称 j 是 i 的功率高效邻居节点。根据式(1),对于任意属于ONS(i)中的 j 节点,无法从NS(i)中找出另外的一个节点 u ($u \neq j$),使其满足: $P_T(i, j) > P_T(i, u) + P_T(u, j)$,故从节能的角度上讲,ONS(i)中的节点肯定是功率高效节点。

根据网络假设条件中无线信道衰减具备双向对称的特性,虽然节点 i 可以根据某些固定功率的报文得到 $P_T(i, u)$ 的值,但节点 i 不能直接获知 $P_T(u, j)$ 的值,故节点无法根据式(1)直接进行邻居集合的优化。在PCAP算法中,根据式(1)的约束条件,通过分析节点间的位置关系,构建出节点的ONS(i)。

2.1.2 构建优化邻居集合 假设节点 i 只有两个邻居节点:节点 j 和节点 u 。如果 $P_T(i, j) \leq P_T(i, u) + P_T(u, j)$,那么节点 j 是节点 i 的功率高效邻居节点,否则就不是,对于节点 u 也是同理;如果 $P_T(i, j) \leq P_T(i, u) + P_T(u, j)$,且 $P_T(i, u) \leq P_T(i, j) + P_T(j, u)$,则节点 j 和节点 u 都是节点 i 的功率高效邻居节点。由此可以看出,节点 j 和节点 u 有两种不同的关系:相容的和不相容的。在二维欧氏空间中,则可建立邻居节点间的数学模型:

若 $d_{ij}^\beta \leq d_{iu}^\beta + d_{uj}^\beta$ 且 $d_{iu}^\beta \leq d_{ij}^\beta + d_{ju}^\beta$,则节点 u 与节点 j 在ONS(i)中是相容,否则节点 u 与节点 j 不相容。

其中 d_{ij} 为节点 i 和 j 间的距离。

根据上述约束条件,运用数学和几何分析方法,可将节点 i 的最大覆盖区域划分为3个子区域,如图1所示。图中最大的圆表示节点 i 用最大的传输功率(P_{\max})发射时的覆盖

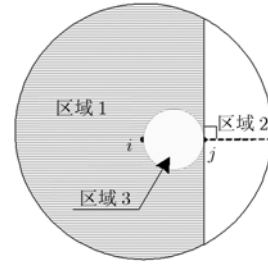


图1 节点 i 的覆盖区域($\beta=2$)

范围,区域3是以 d_{ij} 为直径的圆型区域。

通过分析图1中节点间位置的相互关系,可以得到以下结论:

区域1中的任一节点 u 有: $d_{ij}^\beta < d_{iu}^\beta + d_{uj}^\beta$ 且 $d_{iu}^\beta < d_{ij}^\beta + d_{ju}^\beta$;

区域2中的任一节点 u 有: $d_{ij}^\beta > d_{iu}^\beta + d_{uj}^\beta$;

区域3的任一节点 u 有: $d_{ij}^\beta > d_{iu}^\beta + d_{uj}^\beta$ 。

故当节点 u 位于区域1时,它与节点 j 在ONS(i)中是相容的;在区域2或区域3中的任一节点 u 与节点 j 在ONS(i)中是不相容的,也就是说节点 u 存在于区域3时,节点 j 就不能属于ONS(i),相反的情况是若节点 u 存在于区域2,则节点 u 肯定不属于ONS(i),显然节点 j 属于ONS(i)的必要条件是区域3中没有其它节点。

基于上述的分析,节点 i 在构建优化邻居时,需要将任意一个邻居节点相对应的,位于区域2中的其它邻居节点排除在ONS(i)外。在执行PCAP算法时,节点 i 将保存其邻居的相关信息,主要参数包括下列3项:绝对坐标 (x_j, y_j) 、相对极坐标参数 (ρ_j, θ_j) 和相应 $P_T(i, j)$ 。邻居节点相对极坐标的取定如下:

$$\left. \begin{aligned} \rho_j &= \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}, \quad 0 \leq \rho_j \leq R \\ \theta_j &= \begin{cases} \cos^{-1}((x_j - x_i)/\rho), & y_j \geq y_i \\ -\cos^{-1}((x_j - x_i)/\rho), & y_j < y_i \end{cases} \quad \theta_j \in [0, \pi] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中的 R 为节点的最大覆盖半径。

在PCAP算法中,将属于区域2中的所有节点定义为一个集合 I_j ,则 I_j 中的任意一元素 u 满足下列条件:

$$\forall u \in I_j, \text{有} \rho_u > \rho_j, \text{且} \theta_u \in \xi \quad (3)$$

其中 ξ 定义如下:

当 $|\theta_j \pm \cos^{-1}(\rho_j/R)| \leq \pi$ 时, $\xi = [\theta_j - \cos^{-1}(\rho_j/R), \theta_j + \cos^{-1}(\rho_j/R)]$;

当 $\theta_j - \cos^{-1}(\rho_j/R) < -\pi$ 时, $\xi = [2\pi + \theta_j - \cos^{-1}(\rho_j/R), \pi] \cup (-\pi, \theta_j + \cos^{-1}(\rho_j/R)]$;

当 $\theta_j + \cos^{-1}(\rho_j/R) > \pi$ 时, $\xi = [\theta_j - \cos^{-1}(\rho_j/R), \pi] \cup (-\pi, \theta_j + \cos^{-1}(\rho_j/R) - 2\pi]$ 。

在构建ONS(i)时,节点 i 根据邻居节点的极坐标参数,逐一排除与某个邻居相对应的位于区域2中的节点。PCAP中ONS(i)的具体构建步骤如下:首先找到最近的邻居节点

j , 然后将节点 j 添加到 $ONS(i)$ 中, 并排除掉相应的 I_j , 并在剩余的节点中重复上述步骤, 直至排除完所有的邻居。

2.1.3 节点发射功率设置 无线 Ad hoc 网络中的报文类型, 可以粗略地分为 3 类: 路由层报文, MAC 层控制报文和其它数据类报文。MAC 层的控制报文主要完成网络资源的预留以及避免冲突等功能, 路由层报文主要完成网络业务数据交换所需路由的建立, 其它数据类报文是网络承载业务所产生的数据。在 PCAP 算法中, 节点将根据报文类型采用不同的功率控制策略, 且路由层采用 AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector)路由协议。

(1)路由层报文发射功率设置 网络连通性是一切功率控制算法都必须保证的。若 ONS 中距离最远的节点为 j , 其需要最低通信功率为 $P_T(i, j)$, 则当节点以 $P_T(i, j)$ 发送所有的路由请求报文(Route REQuest, RREQ)时, 网络的连接性是可以得到保证的, 故在 PCAP 中, 将 RREQ 的功率设定如下:

$$P_{RREQ}(i) = \max(P_T(i, j), j \in ONS(i)) \quad (4)$$

由于路由层的其它报文不涉及广播问题, 并是单播, 故将这些报文(如路由回复 RREP 报文, Hello 报文等)以最小合适的功率进行发送。若用 V 来表示网络节点的集合, 用 G 来表示功率控制前拓扑图, 用 T 来表示实行功率控制算法后的网络拓扑图, 可以得到以下属性: 对 V 中的任意两个节点 u, v , 若它们在 G 中是连通的, 则在 T 中也必然连通。

(2)MAC 层控制报文发射功率设置 在 IEEE802.11 标准中, 目前已经定义的控制报文主要有: Power Save (PS)-Poll, RTS, CTS, Acknowledgment (ACK), Contention-Free (CF)-End 以及 CF-End+CF-Ack 这 6 种控制报文。在 PCAP 中, 主要考虑 RTS, CTS, ACK 这 3 种控制报文的发射功率设置。传统的 BASIC 功率控制方案可能会降低网络的吞吐量, 甚至增加网络的能量消耗^[8]。文献[9]对 IEEE802.11 标准 DCF(Distributed Coordination Function)模式下的 RTS 门限进行了研究, 研究表明 RTS 机制在网络吞吐量达到饱和后才能起到积极的作用。故在 PCAP 算法中, 将 RTS/CTS 作为一种可选机制, 只有在发送长数据报文才启用。

若网络中任意 $ONS(i)$ 中最远节点的距离为 r_0 , 则称以 i 为圆心, r_0 为半径所覆盖的区域为优化覆盖区域, 记为 S_0 。当网络中的节点为均匀分布时, 此时节点 i 的邻居在其覆盖区域内也是服从均匀分布的, 若 r 代表任意一个节点与节点 i 间的距离, 则 r 服从下列分布:

$$f(r) = 2r / R_{\max}^2, \quad 0 \leq r \leq R_{\max} \quad (5)$$

其中 R_{\max} 为节点的最大覆盖半径。通过式(5), 可以计算出 r 的均值 \bar{r} :

$$\bar{r} = E(r) = \int_0^{R_{\max}} (2r / R_{\max}^2) \times r dr = \frac{2}{3} R_{\max} \quad (6)$$

若将节点间距离为 \bar{r} 时最小通信功率记为 $P_T(\bar{r})$, 则节

点发送 MAC 层控制报文时的发射功率设置如下:

$$P_{MAC}(i, j) = \max(P_T(i, j), P_T(\bar{r})) \quad (7)$$

上述 MAC 层控制报文的发射功率设置理念是尽量保持网络资源预留机制中的所需的对称性。该方式可以在资源预留、节省能量、降低网络干扰等方面获得一定的均衡。

(3)其它数据类报文发射功率设置 在 PCAP 中, 其它数据报文不影响到路由建立和冲突避免及干扰检测等需求, 为了降低节点对网络的干扰, 这些数据报文以最小合适的功率进行发送。

2.1.4 PCAP 算法实现 根据前面的分析, PCAP 算法的实现分为 3 步: 通过邻居节点的位置信息建立节点的 ONS ; 设定路由报文发射功率 P_{route} , $P_{MAC}(i, j)$; 根据路由中的下一跳节点以功率 $P_T(i, j)$ 进行通信。PCAP 算法的核心思想可以采用以下伪代码表示:

```

(1)  $ONS$ 及 $P_{\max}$ 的建立      续前:
clear  $ONS(i)$                 goto end for
 $P_{RREQ}(i)=P_{\min}$            end for
for node in  $NS'(i)$           (2)  $P_{MAC}(i, j)$ 的建立
  if  $\rho_j = \min(\rho_u, u \in NS'(i))$   for node in  $NS(i)$ 
    add  $j$  to  $ONS(i)$           if  $\rho_j \leq \frac{2}{3} R_{\max}$ 
     $NS'(i) = NS'(i) - I_j - \{j\}$    $P_{MAC}(i, j) = P_T(\bar{r})$ 
    if  $P_T(i, j) > P_{RREQ}(i)$       else
       $P_{RREQ}(i) = P_T(i, j)$        $P_{MAC}(i, j) = P_T(i, j)$ 
    end                          end
  end                            end for
end                              end for
if  $NS'(i) = \Phi$ 

```

其中 $NS'(i)$, $ONS(i)$, P_{\min} 分别表示节点 i 的邻居列表副本, 优化邻居集合以及网络设备的最低发射功率。

2.1.5 PCAP 算法对网络的影响 通过 PCAP 算法, 节点的发射功率势必会下降, 并使节点的邻居数量下降, 下面将用随机产生的场景来分析 PCAP 算法对网络拓扑的影响, 如图 2 所示。36 个节点随机分布在 $1000m \times 1000m$ 的矩形区域中, 节点的最大覆盖半径为 300m, 电波传播距离衰减指数取定为 2。

图 2(a)是在 IEEE802.11 标准下的网络拓扑, 网络节点采用最大发射功率进行通信, 因此网络拓扑较为密集; 图 2(b)和 2(c)分别是 β 为 2 和 4 时, 网络的功率高效拓扑, 即由节点与其节省功率消耗邻居所构成的拓扑; 图 2(d)是 PCAP 算法下的网络拓扑, 相对于图 2(a), 网络拓扑要稀疏一些, 但比图 2(b)密集。上述拓扑平均节点度的情况如下: 图 2(a)中平均节点度为 6.78, 图 2(b)中平均节点度为 1.64, 图 2(c)中平均节点度为 1.31, 图 2(d)中平均节点度为 4.67, 相对于 IEEE802.11 标准, PCAP 算法下的平均节点度下降了 31%。从图 2(b)和 2(c)中还可以看出, 图中的节点 32 和 34, 在 $\beta = 2$ 互为功率高效邻居节点, 一跳可达; 但在 $\beta = 4$ 时, 它们不再互为功率高效邻居, 节点 32 和 34 间的可能路

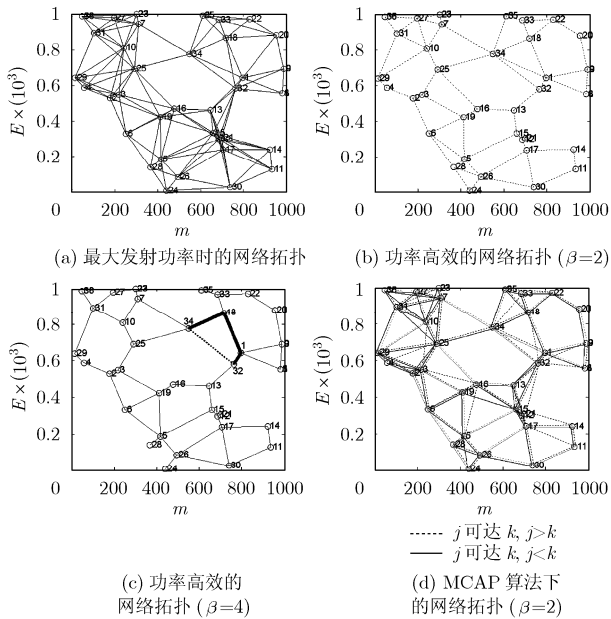


图2 IEEE802.11 和 PCAP 下的网络拓扑

由是: $32 \rightarrow 1 \rightarrow 18 \rightarrow 34$; 由此可见, PCAP 算法中按 $\beta=2$ 建立节点优化邻居集合的模型可以在网络节能和时延上进行一定的均衡。

图3中, 平均功率1表示节点使用最小合适的功率与其所有邻居通信情况下的平均发射功率, 平均功率2表示节点以最小合适功率与其优化邻居通信情况下的平均发射功率, 可见平均功率2整体上低于平均功率1。图4是网络节点有效覆盖半径的一个情况比较, IEEE802.11 下节点的平均覆盖半径为 276m, PCAP 相应的有效覆盖半径为 216m。

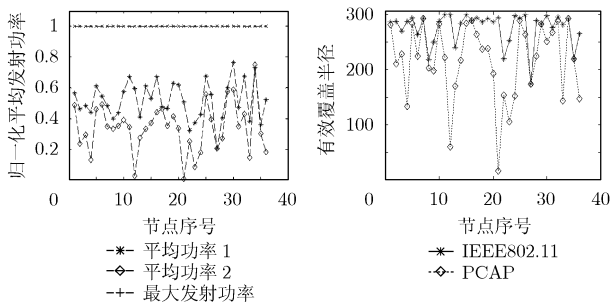


图3 节点归一化平均发射功率

图4 节点有效覆盖半径

3 PCAP 算法性能仿真

为了验证协议的性能, 利用 OPNET 仿真工具对以下参数进行比较: 网络 MAC 层负载, MAC 层丢包, 平均端到端时延, 路由发现时间, 路由跳数, 总体能量消耗。网络场景主要设置如下: 36 个节点随机分布在 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 的矩形区域中, 随机行走(Random walk), 单个直线运动的速率服从 $0\text{m/s} \sim v_{\text{max}}$ 的均匀分布, 其中 v_{max} 取定为 5m/s ; 节点的初始能量值设定为 500mJ , 路由层均选择 AODV 路由协

议, 节点最小发射功率为 0.05mW , 最低接收门限 -82.64dBm , MAC 层速率 5.5M bps ; 每个节点均产生业务数据, 并随机选择一个节点作为其目的节点, 数据长度服从指数分布, 均值为 1024bit , 数据分组产生时间间隔服从指数分布, 均值为 1s ; 仿真时间 600s , 仿真结果如图5所示。

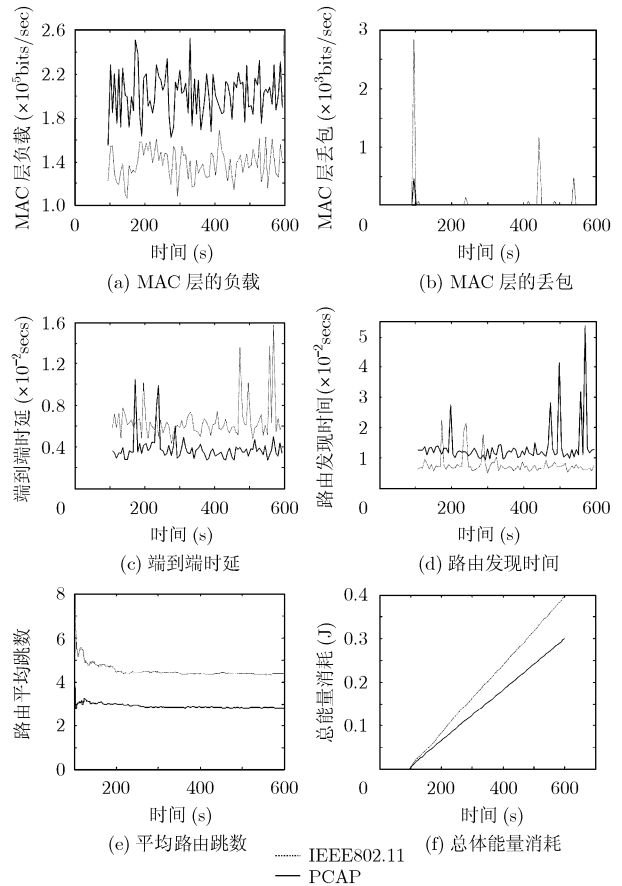


图5 PCAP 与 IEEE802.11 仿真性能比较

通过图5可以看出, PCAP 由于使用了功率控制, 使得数据传输的平均跳数增加, 路由发现时间及端到端时延相对大于 IEEE802.11。虽然 PCAP 和 IEEE802.11 均使用相同的业务模型, 但由于 PCAP 选择了相对节能的路径, 这使得数据需要多次转发才能到达目的地, 从而 PCAP 的 MAC 层负载高于 IEEE802.11; 从图5(b)可以看出, 虽然 PCAP 的 MAC 层负载相对要高, 但是由于其采用了较低的发射功率, 对其它节点干扰降低, 其 MAC 的丢包反而相对较小, 这表明 PCAP 具备比 IEEE802.11 高的吞吐量, 当每个节点只向其邻近节点产生业务数据时, PCAP 能承载比 IEEE802.11 高的网络负载。

4 结束语

PCAP 是一种基于节点位置的功率控制算法, 该算法采用数学和几何的分析方法去构建节点的优化邻居集, 并使用合适的功率去传送网络中的不同报文。该算法基于采用分布

式的思想去实现功率控制, 由于算法在网络节点本地运行, 再加上算法自身的复杂度不高, 能较好地应用于无线 Ad hoc 网络。计算机仿真证明 PCAP 在保证网络连通性的前提下, 降低端到端时延, 并具备比 IEEE802.11 标注高的网络负载承载能力。

参 考 文 献

- [1] Gomez J and Campbell A T. Variable-range transmission power control in wireless Ad hoc networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2007, 6(1): 87-99.
- [2] Wu Shih-Lin, Tseng Yu-Chee, and Sheu Jang-Ping. Intelligent medium access for mobile Ad hoc networks with busy tones and power control. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(9): 1647-1657.
- [3] Muqattash A and Krunz M M. A distributed transmission power control protocol for mobile Ad hoc networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2004, 3(2): 113-128.
- [4] Li L, Halpern J, Bahl P, Wang Y, and Wattenhofer R. A cone-based distributed topology-control algorithm for wireless multi-hop networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2005, 13(1): 147-159.
- [5] Campbell J, Naghshineh A T M, and Bisdikian C. Power-aware routing in wireless packet networks. The 6th IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications, San Diego, 1999: 380-383.
- [6] Singh S, Woo M, and Raghavendra C S. Power-aware with Routing in Mobile Ad hoc Networks. The Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Dallas, TX, 1998: 181-190.
- [7] Toh C K. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless Ad hoc networks. *IEEE Communication Magazine*, 2001, 39(6): 138-147.
- [8] Jung EunSun and Vaidya N H. A power control MAC protocol for Ad hoc networks. The Eighth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Atlanta, Georgia, 2002: 36-47.
- [9] Liu Jun, Guo Wei, Huang Fei, and Xiao Bai-Long. An adaptive RTS threshold adjustment algorithm for wireless LAN. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(4): 547-554.

文 凯: 男, 1972 年生, 博士生, 研究领域为自组网网络.

郭 伟: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为移动通信网、信号与信息处理.

黄广杰: 男, 1984 年生, 硕士生, 研究领域为自组网网络协议.