

无线 Ad hoc 网络中基于拓扑的功率感知路由协议

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: 无线 Ad hoc 网络中的节点通常是由电池提供能量, 高效的节能策略在网络性能中具有非常重要的地位。为了降低网络能量的消耗, 该文提出了一种 TPR(Topology-based Power-aware Routing)协议。TPR 协议主要利用无线传输中的多跳节能特性, 通过建立节点的功率高效邻居集合, 并用该集合去控制路由请求报文的转发过程, 从而得以建立节能路由。计算机仿真验证表明, 相比于现有的节能协议, TPR 协议在获得较好节能效果的同时, 并能在路由开销、路由发现时间、端到端时延等方面取得较好的均衡。

关键词: Ad hoc 网络; 基于拓扑; 功率感知; 路由协议

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-3013-05

Topology-Based Power-Aware Routing Protocol in the Wireless Ad hoc Networks

Wen Kai Guo Wei Huang Guang-Jie

(National Anti-interference Communication Technology Lab, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: Efficient energy conservation plays an important role in the performance of wireless Ad hoc networks because the nodes in such networks are usually equipped with battery. In order to reduce energy consumption in the network, a TPR (Topology-based Power-aware Routing) protocol is proposed. By using the character that more hops can save more energy in wireless transmission, the TPR protocol builds power-efficient-topology in the one hop of nodes, and utilizes this topology to control the process of route discovery, then sets up energy-efficient route. Simulation results indicate that the TPR protocol can conserve more energy, and balance the performance of route overhead, route discovery time, end to end delay etc.

Key words: Ad hoc network; Topology-based; Power-aware; Routing

1 引言

无线Ad hoc网络作为无线移动通讯系统的一种特殊形式已经在民用和军事领域得到了广泛应用, 网络中的节点通常是由电池提供能量。为了延长节点的工作时间, 要求网络在进行数据中继传输时尽量减少能量消耗, 功率感知路由协议则通过在路由选择过程中引入一系列的机制, 降低网络中数据交换的能量消耗, 延长网络的生存周期。

近年来, 功率感知路由协议是 Ad hoc 网络中的研究热点。文献[1]对已有功率感知的路由协议进行了研究, 并将功率感知的路由协议分为基于活动的路由协议和基于连接的路由协议两大类。Hou 等人在文献[2]中研究了无线多跳包交换网络中 3 种不同的拓扑控制策略: MFR(Most Forward with fixed Radius), NFP(Nearest with Forward Progress)和 MVR(Most forward with Variable Radius), 这 3 种策略是实现拓扑控制节能路由的基础。MECN (Minimum-Energy

Communication Network)^[3]是一种基于节点位置的拓扑控制路由协议, 以累计功率消耗作为度量标准, 运用 Bellman-Ford 最短路径算法寻找到最节省能量的路径。EAGER (Energy-Aware GEolocation-aided Routing)^[4]是基于拓扑控制的能量感知和业务自适应路由协议, 当网络负载较低时, 使用反应式路由协议, 而网络负载高时, 使用先验式路由协议。CBTC(Cone-Based Topology Control)^[5]和 PCDC (Power Controlled Dual Channel)^[6]采用类似于 MECN 的方法。文献[7]中采用了一种模糊功率控制的方式, 通过调整节点发射功率以控制节点的度, 实现网络节能。SMECN(Small Minimum-Energy Communication Network)^[8]基于 MECN 的节能协议, 单从节能的角度上来看, MECN 的效果同 MCPR(Minimum Consumed Power Routing)^[9]相当, 但在移动环境中, 其开销要高于 MCPR。本文提出一种基于网络拓扑控制的节能路由协议——TPR(Topology-based Power-aware Routing)协议, 不同于以往通过节点发射功率调整的拓扑控制方法, TPR 协议首先通过建立节点一跳功率高效拓扑, 并通过该拓扑控制路由发现过程, 最终建立功率高效的节能路由。

2007-05-31 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战术通信抗干扰技术国防科技重点实验室基金(514340201 05ZS04)资助课题

2 基于拓扑的功率感知路由协议

2.1 网络条件

在设计TPR协议时,对网络条件作如下假设:(1)所有节点无线接口的性能参数一致,拥有相同的最大发射功率、接收灵敏度以及信道速率;(2)信道增益在包接收期间是恒定不变的;(3)无线链路双向对称;(4)网络具备相对稳定的无线信号传播模型;(5)无线接口卡能够为MAC层提供信号的接收电平值;(6)无线接口卡的发射功率连续可调。

2.2 协议基础

定义 1 节点间功率高效链路:若节点 i 的邻居节点集合为 $NS(i)$, 节点 $j \in NS(i)$, 若对任意节点 $k \in NS(i)$ 且 $k \neq j$, 满足 $P_{ij} \leq P_{ik} + P_{kj}$, 则称节点 i 与 j 间的链路 $L_{i,j}$ 为功率高效链路, 同时称节点 j 为 i 的功率高效邻居节点, 其中 P_{ij} 为节点间需要的最小发射功率。

在路由层实现基于拓扑控制的节能路由, 首先要解决的问题是构建网络的一个基于功率高效的网络拓扑。若以 $G = (V, E)$ 代表网络无向拓扑图, $G' = (V, E')$ 代表网络基于功率高效无向拓扑图, 显然有 $G' \subseteq G$ 。其中 V 是网络节点的集合, E 是节点间直达链路的集合, E' 是节点间功率高效链路的集合。

2.3 TPR 协议

本文提出的TPR协议虽然也分为拓扑控制和路由建立这两个过程,但相比于传统的拓扑控制节能路由协议,这两个过程结合得更为紧密。TPR协议包括3方面的内容:其一是构建与一跳高效拓扑对应的优化邻居节点集合(Optimized Neighbor Set, ONS),其二是通过高效邻居集合控制路由请求报文(Route REQuest, RREQ)的转发过程,其三是报文的功率控制策略。本文中的TPR协议基于AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector)^[10]进行设计,但设计思想也可应用于其它的按需路由协议。

2.3.1 构建功率高效的优化邻居集合

(1)邻居集合优化准则 TPR 协议中采用以下准则构建节点的功率高效优化邻居集合:若节点 j 是 i 的邻居,对于任意的 $u \in NS_i$, 且 $u \neq j$, 若 $P_{ij} \leq P_{iu} + P_{uj}$ 成立, 则 $j \in ONS_i$ 。其中 NS_i 是节点 i 以最大功率发射时的一跳邻居集合, ONS_i 是节点 i 的优化邻居集合, P_{ij} 是保证节点 i 和 j 间通信所需要的最小发射功率。根据上述准则,显然有 $ONS_i \subseteq NS_i$, 并通过分析可以发现优化邻居节点具备对称性,即若 j 为 i 的优化邻居,则 i 也是 j 的优化邻居,即有:若 $j \in ONS_i$, 则 $i \in ONS_j$ 。

(2)TPR 协议中的功率控制策略 在 TPR 协议中,节点需要通过本地计算获得其功率高效邻居集合,并能随着网络的变化而动态调整。根据功率高效邻居集合的构建准则,节点需知道其邻居节点相应的路径损耗。为了不增加网络的开销,TPR 协议中不采用位置信息广播的方式,而是通过监听网络中的报文获得其邻居的路径损耗。为此,TPR 协议中对

不同类型的报文采用不同的功率控制策略,该策略主要分为以下3类:MAC层控制报文的功率控制,路由层报文的功率控制以及其它数据报文的功率控制。

MAC层控制报文的功率控制策略:TPR协议保留IEEE802.11中的资源预留机制,即RTS/CTS(Request-To-Send/Clear-To-Send)是MAC层的一种可选机制,当发送较长报文时,MAC层将使用RTS和CTS报文完成握手。MAC层控制报文以节点允许的最大功率进行发送。

路由层报文的功率控制策略:由于IEEE802.11资源预留机制中,节点只有在长数据报文(超过RTS发送门限)交换时才会启用RTS/CTS机制,由此可见网络中不一定会有RTS/CTS报文发送,故通过RTS/CTS机制获得邻居节点路径损耗的方法是不可靠的,只能作为获知途径中的一种。纵观路由报文的传送方式,RREQ报文在网络中以洪泛的方式进行广播,该报文在网络中被大量复制,通过RREQ报文来估计路径衰耗可在较大程度上保证邻居信息的及时性。但RREQ报文是网络中有建立路由需求时才会发送,若网络在较长时间内没有数据交换,则通过RREQ报文仍然不能保证邻居节点路径损耗信息的及时性,所以还需要另外的辅助机制。该辅助机制是:在长度为 T 的周期中,若节点既未发送过MAC层的控制报文也没有发送路由层的RREQ报文,则节点将在路由层产生一个Hello报文(也可以在MAC层设计一个Beacon报文)来宣称自身的存在,为其它节点提供相应路径损耗估计依据。TPR中的Hello报文格式同AODV中的Hello报文,但是报文发送的触发方式不同,其发送周期 T 的设计见后面的分析。TPR协议中,将路由层的RREQ,Hello报文以节点允许的最大功率进行发送,其它报文以最小合适功率发送。网络节点将主要依据RREQ,Hello这两个报文的接收信号强度去估计邻居节点相应的路径损耗。

其它数据报文的功率控制策略:由于网络中其它数据报文的发送是在网络路由建立以后,故该类报文将以保证正确接收所需的最小功率进行发送。

(3)优化邻居集合构建 根据功率高效邻居集合优化准则—— $P_{ij} \leq P_{iu} + P_{uj}$, 其中的参数 $P_{ij} = P_{ji}$, $P_{iu} = P_{ui}$ 可以直接获得,但 P_{uj} 无法直接获得。在TPR协议中, P_{uj} 的获得采用下列方式:利用AOA(Angle Of Arrival)^[11]技术,得到节点 i 到 j 和 u 的距离以及相应的夹角 $\angle uij$, 并通过余弦定理,计算出节点 j 和 u 间的距离,然后根据网络的无线传播模型,进而得到 P_{uj} 值。 P_{uj} 也可以通过其它方式获得,如节点将其邻居路径损耗信息通过Hello报文捎带发送出去,但该方式会增加一定的协议开销。

节点在获得邻居节点相关路径损耗信息后,将通过优化邻居算法建立其相应的功率高效邻居集合。在构建ONS时,节点首先将NS进行副本复制,该副本记为NSC(NS-Copy),该副本是在执行ONS算法前对NS复制一次,并在ONS算

法执行完成后 NS 再复制一次。TPR 协议的功率高效邻居集合是在 NSC 的基础上执行集合优化算法获得, 算法的伪代码如下如图 1 所示。

```

Build ONSi (for node i)
1  ONSi = ∅
2  for ∀j ∈ NSCi, find minimum Pij do
3    ONSi = ONSi + {j}
4    NSCi = NSCi - {j}
5    for ∀u ∈ NSCi do
6      if Pij + Pju < Piu
7        NSCi = NSCi - {u}
8    end for
9  end for

```

图 1 ONS 构建算法

(4)邻居集合动态更新机制 TPR 协议中, 共有 3 种邻居集合: NS, NSC 和 ONS。由于无线传播环境的复杂性以及节点的移动性, 会导致网络状态的波动。若每次网络状态的波动都触发节点执行 ONS 构建算法, 这势必会增大节点的运算量。在 TPR 协议中, NS 将根据网络中监测到的情况实时变化, 而 ONS 只有一些特定的条件下才会变化, 下列 3 种情况将触发节点执行 ONS 构建算法: NS 增加了新的邻居节点; NS 减少了邻居节点且该节点曾位于 ONS 中; 对比于 NSC, NS 中某个邻居节点的状态变化超过了某个范围。前两种情况较为简单, 第 3 种情况则相对复杂, 下面将对第 3 种情况进行分析。

在第 3 种触发 ONS 构建算法的情况中, 邻居节点路径损耗和 AOA 是两个核心的指标。为了简化问题处理, TPR 协议将无线信号传输中的波动以及节点的移动性等效为节点间的相对运动造成。基于该思路, 同时为了降低节点的计算量, TPR 协议提出了一种相对静止区的方法来衡量节点状态是否变化, 具体如下。

定义 2 节点相对静止: 当节点的最大覆盖半径为 R 时, 若节点间的相对径向距离变化小于 d_0 且相对 AOA 变化小于 α , 则认为该节点保持相对静止状态。

定义 2 的情况如图 2 所示, 其中的阴影区域表示节点的相对静止区, 当某个邻居节点的相对位置变化未超出该区域时, 节点不会执行 ONS 构建算法。 d_0 和 α 的设定同节点的分布情况关联, 当节点密度较低时, d_0 和 α 可以设定为相对较大的值。

(5)Hello 报文发送周期 T TPR 协议中, 当节点在较长时间段内没有发送 RTS 或 RREQ 报文时, 则需要发送 Hello 报文供其邻居节点更新相关信息。AODV 协议采用的是周期性发送 Hello 报文, 该机制开销较大。TPR 协议将 Hello 报文作为邻居信息更新的辅助措施, 并采用定时触发的方式发

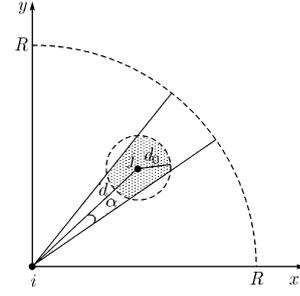


图 2 TPR 协议中节点的相对静止区

送 Hello 报文, 但其定时器的退避周期为 T 将在下列情况重置:

(a)节点发送 RTS 报文; (b)节点发送 RREQ 报文。

退避时间周期 T 的设计采用同邻居集合动态更新机制中节点静止区类似的思想, 具体方法如下:

(1)计算节点间的平均径向位移 TPR 协议中, 节点间的平均径向位移定义为 $\bar{d}_i = 1/N \left[\sum |d_{ij}(\text{NSC}) - d_{ij}(\text{NS})| \right]$, 其中 $j \in (\text{NSC} \cap \text{NS})$, N 为 $\text{NSC} \cap \text{NS}$ 集合中的节点的数量, $d_{ij}(\text{NS})$, $d_{ij}(\text{NSC})$ 分别为集合 NS, NSC 中节点 i 和 j 间的距离。该指标可以有效衡量节点与其邻居节点间的相对运动关系, \bar{d}_i 越小, 等同于节点的移动性越低, 节点发送 Hello 报文的必要性越小; \bar{d}_i 越大, 则节点的移动性高, Hello 报文的发送周期则应该越短。节点间的平均径向位移在每次 ONS 算法执行前计算一次。

(2)退避时间周期 T 设置 当节点计算出邻居节点间的平均径向位移后, 退避时间周期 T 设置为: $T = d_0 / (\bar{d} / T_1 + k)$, 其中 \bar{d} 为平均径向位移, T_1 为 \bar{d} 的计算周期, k 为预定义常数, TPR 协议中将 k 设定为 d_0 的 1%。

2.3.2 RREQ 报文洪泛过程控制 传统的按需路由协议, RREQ 报文在网络中是直接洪泛。网络中的节点在接收到一个新的 RREQ 报文后, 在下一时间都将对该报文进行转发, 这将增加信道的竞争和报文接收的冲突^[12]。基于功率高效邻居的对称特性, 提出基于功率高效邻居的 RREQ 报文洪泛机制:

(1)第一次接收到某个特定的 RREQ 报文。此时节点需要进一步判断上一跳节点是否属于其优化邻居集合, 且优化邻居集合中还存在其它的优化邻居节点, 若满足则转发该 RREQ 报文, 否则丢弃该 RREQ 报文;

(2)重复接收到某个特定的 RREQ 报文。若该报文没有被本节点转发过, 则当作第 1 次接收到该报文的情况进行处理; 若该报文已经被本节点转发过, 则丢弃该报文。

通过上述的 RREQ 报文转发机制, 邻居节点中只有功率高效的邻居才会转发 RREQ 报文, 这将抑制 RREQ 报文在网络中的洪泛过程, 有助于降低 RREQ 报文的接收冲突, 提高 RREQ 报文的正确接收率, 并降低一定的 RREQ 报文开销。在网络初始化时, 由于 ONS 尚未建立, 为了提高路

由协议的稳健性,当节点不为目的节点,且集合ONS为空集合时,节点将无条件转发该RREQ报文。

3 TPR 协议性能分析

3.1 TPR 协议对网络连接性的影响

无线 Ad hoc 网络中的拓扑控制,其中一个关键问题是要保证网络的连接性。若以 $G = (V, E)$ 表示网络的无向图,节点 i 和 j 属于 G 中的任意两个节点,若节点 i 和 j 在原有网络中可建立路由连接,则网络在运行 TPR 协议后,也同样能在 G 中为节点 i 和 j 建立路由连接。

3.2 TPR 协议对网络节能的影响

在构建优化邻居集合时,TPR 协议使用了 $P_{ij} \leq P_{iu} + P_{uj}$ 这个准则去构建节点 i 的功率高效邻居集合,并使用该优化邻居集合来限制 RREQ 报文的洪泛过程,使得一跳邻居范围的非高效节点不能在第一时间转发 RREQ 报文,这有利于建立高效节能路由,以节约网络的能量消耗。

图 3 是 TPR 协议建立高效节能路由的所示图,网络节点的分布如图 3(a)所示,其中 $ONS_s = \{i\}$, $ONS_i = \{S, m, j\}$, $ONS_j = \{i, k, m\}$, $ONS_k = \{j, D\}$, $ONS_D = \{k\}$, $ONS_m = \{i, j\}$ 。当 S 节点发出 RREQ 请求时,节点 m, i, j 均会收到来自 S 的 RREQ 报文,但接下来只有节点 i 会转发该 RREQ 报文;节点 i 转发的报文被节点 m 和 j 收到后,都会转发该报文,但节点 k 只转发来自 j 的 RREQ 报文,并将 RREQ 报文传递到目的节点 D ,最终建立 $S-i-j-k-D$ 的节能路由,由此可见采用 TPR 协议有利于建立高效节能路由。图 3(b)是网络使用 TPR 协议时 RREQ 报文转发进程的示意图,图中只画出了 RREQ 报文洪泛前进方向上的情况,虚箭头线表示 RREQ 报文可到达但不会被该节点转发,实箭头线表示 RREQ 报文可被转发的情况。

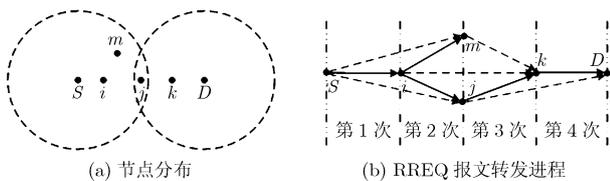


图 3 TPR 协议建立高效节能路由示意

虽然 TPR 协议在每次 RREQ 报文的转发中使用了功率高效的邻居节点,且最终建立的路由上任意两相邻节点互为功率高效邻居节点,但由于 TPR 协议是按需路由协议,没有全局拓扑以及未使用全路径累计功率消耗等信息,故并不能保证其建立的路由是网络最为节省能量的路由,但 TPR 协议的路由建立机制能大大增强网络选择高效节能路径的几率。同时在 TPR 协议的 RREQ 报文转发过程可以发现,TPR 协议实现了 RREQ 报文在其邻居节点中的异步转发,降低了 RREQ 报文在转发和接收过程中的竞争和冲突,且没有引入类似于 MCPR 协议的转发等待时延^[9],可以在路由

建立时延和网络节能间获得一定的均衡。

4 协议仿真

为了评估 TPR 协议的性能,采用 OPNET 仿真平台对协议进行了仿真分析,比较对象为 AODV 协议及 MCPR 协议。仿真场景的主要参数设置如下:36 个节点随机分布在 $750m \times 750m$ 的矩形区域中,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;选择随机行走(Random walk)模型作为节点的移动模型,单个直线运动的速率服从 $0m/s - v_{max}$ 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 $100mJ$,RTS 门限设置为 $1024bit$,节点的相对静止区参数 d_0 设置为 $6m$, α 设定为 2° ,最低接收门限为 $-82.64dBm$,节点无线传输半径为 $300m$,MAC 层速率 $11Mbps$,数据长度服从均值为 $1024bit$ 的指数分布,分组产生时间间隔服从均值为 $1s$ 的指数分布,节点最大发射功率为 $5mW$,仿真时间 $1200s$ 。在仿真中,为了公平起见,采用 AODV 路由协议时,数据报文也是使用最小合适的功率进行发送,并选取以下主要参数对协议进行比较:路由开销、端到端平均时延、路由平均跳数及数据报文能量消耗等参数,具体情况如图 4 所示。

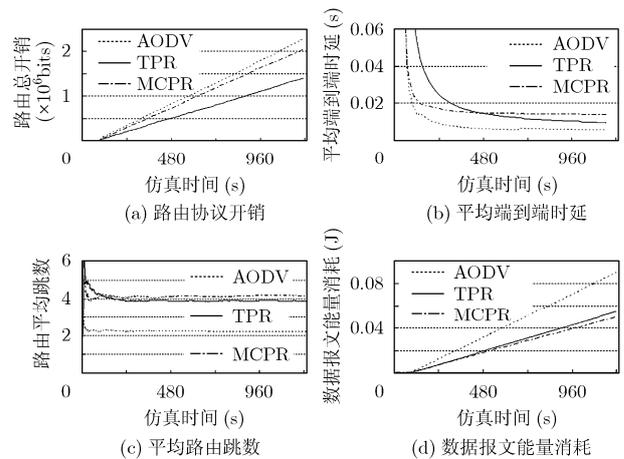


图 4

从仿真结果中发现,在协议开销上,TPR 协议的开销最低,AODV 协议的开销最高。通过跟踪仿真过程,发现 AODV 协议的 RREQ 报文和 RERR(Route Error)均比 TPR 和 MCPR 协议高,主要的原因是 AODV 协议选择最短路由,路由断链几率相对较高,而 TPR 和 MCPR 协议基本上都是选择离自己近的节点作为下一跳节点,虽然路径长一些,路由断链的几率反而要低一些,发送的 RREQ 报文相对较少,同时由于网络中有大量的报文交换,TPR 协议基本上没有发送额外的 Hello 报文,故协议的总开销上 TPR 协议取得了较好的性能。端到端平均时延上,TPR 协议在仿真初期高于 MCPR 和 AODV,但随着优化邻居的建立,其时延得到快速下降,最终介于 MCPR 和 AODV 协议之间。在节能性能

上, MCPR 和 TPR 协议性能相当,均强于 AODV,但 MCPR 略强于 TPR 协议。

从协议的仿真情况可以看出,TPR 协议在实现网络节能的同时,能对路由开销、路由建立时间、端到端时延等方面进行均衡,可获得较好的整体性能。

5 结束语

TPR 是一种按需的路由协议,它主要利用无线传输中的多跳节能特性,通过建立节点一跳范围内的功率高效拓扑,并用该拓扑控制路由发现过程,从而得以建立节能路由。TPR 协议在 RREQ 报文的转发上没有引入额外的转发等待时间,可以降低路由建立的时间;同时 TPR 协议没有在 RREQ 报文中增加用以度量路径能量消耗相关的域,虽然动态 Hello 报文辅助机制可能会增加一定的路由开销,但相比于传统的节能路由协议,TPR 协议在取得较好节能效果的同时,并能在路由协议开销、路由建立时间、端到端时延等方面取得较好的均衡。

参 考 文 献

- [1] Li Jiageng, Cordes D, and Zhang Jingyuan. Power-aware routing protocols in Ad hoc wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 2005, 12(6): 69–81.
- [2] Hou Ting-Chao and Li Victor. Transmission range control in multihop packet radio networks. *IEEE Trans. on Communications*, 1986, 34(1): 38–44.
- [3] Rodoplu V and Meng T H. Minimum energy mobile wireless networks. *IEEE JSAC*, 1999, 17(8): 1333–1344.
- [4] Zhao Qing, Tong Lang, and Council D. Energy-aware adaptive routing for large-scale Ad hoc networks: Protocol and performance analysis. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2007, 6(9): 1048–1059.
- [5] Wattenhofer R, Li L, Bahl P, and Wang Y M. Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless Ad hoc networks. *Proceeding 20th Annual Joint Conf. IEEE Comp. and Commun. Socs.*, Anchorage, 2001: 1388–1397.
- [6] 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.
- [7] Piyush G and Kumar PR. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks. *Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications*, Boston, 1998: 547–566.
- [8] Li L and Halpern J Y. Minimum energy mobile wireless networks revisited. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Helsinki, Finland, 2001: 278–283.
- [9] Lee Sun-Ho, Choi Eunjeong, and Cho Dong-Ho. Timer-based broadcasting for power-aware routing in power-controlled wireless ad hoc networks. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(3): 222–224.
- [10] Perkins C E, Royer E, and Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. IETF, RFC 3561, July 2003.
- [11] Qi Yihong, Kobayashi Hisashi, and Suda Hirohito. Analysis of wireless geolocation in a non-line-of-sight environment. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2006, 5(3): 672–681.
- [12] Tseng Y C, Ni S Y, Chen Y S, and Sheu J P. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. *Wireless Networks*, 2002, 8(2/3): 153–167.

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。