

一种具有能量感知的多路径 Ad hoc 路由算法

陈晋伦 蒋挺 周正
(北京邮电大学 96 信箱 北京 100876)

摘要 该文针对无线移动 Ad hoc 网络的动态变化拓扑逻辑, 存在单向链路, 节点能量有限等特点, 提出了一种具有能量感知的多路径路由算法。该算法是一种反应式的基于路径池的多路径路由算法, 数据和应答消息的路由根据路由池中路径的性能尺度, 即跳数、可靠性和剩余能量以一定的概率分布随机选择。路径的可靠性和剩余能量在数据传输过程中动态更新。仿真结果表明该算法能有效地延长网络的生存时间。

关键词 Ad hoc 网络, 能量感知路由, 网络生存时间, 路径性能尺度

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)07-1298-05

An Energy-Aware Multipath Routing Algorithm for Ad hoc Networks

Chen Jin-lun Jiang Ting Zhou Zheng
(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract In mobile Ad hoc networks, the topology is dynamic, the energy of node is always limited, and there are always asymmetric links between nodes. This paper presents an Energy-Aware Multipath Routing Algorithm(EAMRA) which intends to prolong the TTL(Time-To-Live) of this kind of mobile Ad hoc networks. EAMRA is a connection-oriented and reactive path-pool-based routing algorithm which chooses randomly the routing for user data according to path metrics. The path metrics, reliability and residual-energy, are updated in communication process. The simulation results show that EAMRA can effectively prolong the TTL of mobile Ad hoc networks.

Key words Ad hoc network, Energy-aware routing, Time-to-live of networks, Path metrics

1 引言

无线移动 Ad hoc 网络是一组带有无线收发装置的移动节点组成的多跳的自治系统^[1]。由于可以用于战场、紧急救灾、传感器网络及其他的一些特殊的商业用途, 最近几年无线移动 Ad hoc 网络成了通信领域的一个研究热点。与传统的有线网络和蜂窝网络不同, 无线移动 Ad hoc 网络没有固定的网络基础设施, 网络中节点的地位是对等的, 通信任务依靠网络节点协同工作来完成。在两个通信对端节点的位置相距足够近, 即两个通信对端节点处于相互的无线射频覆盖范围内的情况下, 通信任务通过一跳发送来直接实现; 否则通信任务要利用中间节点的中继, 即多跳转发来实现。无线移动 Ad hoc 网络是一种多跳、自组织式的系统, 与传统网络相比它具有一些独有的特点^[2]: (1) 由于网络节点的任意移动性, 网络的拓扑逻辑是动态变化的, 这使得获取准确的实时网络拓扑状态信息变得十分困难。(2) 受节点发射功率、天线模式和干扰源等因素的影响, 在无线移动 Ad hoc 网络中节点间常常会存

在单向链路, 充分合理地利用这些单向链路不仅可以增加网络的连接性而且还有利于实现网络业务流量的均衡。(3) 为了实现节点的任意移动性和微型化, 在一些应用场景下节点依靠电池来驱动, 能效问题是 Ad hoc 网络设计必须考虑的问题。

针对无线移动 Ad hoc 网络的动态变化的拓扑逻辑和单向链路问题, 文献[3]提出了一种 PPRP(Path-Pool Routing Protocol), 该协议是一种反应式 (on-demand) 面向连接的基于路径池的路由协议。在路由发现阶段, PPRP 通过源节点和目的节点间的路由请求过程、路由应答过程及路由应答确认过程实现了对单向链路的利用; 在路由维护阶段, PPRP 利用源节点和目的节点间的数据-确认流来实现路由的维护, 即对动态变化网络拓扑逻辑的跟随。但 PPRP 没有考虑能效问题, 本文在 PPRP 基础上提出了一种具有能量感知的多路径路由算法, 目的是延长网络的生存时间, 从而提高网络的实用性。

2 网络模型及问题表述

无线移动 Ad hoc 网络可以抽象为一个有向图模型 $G(V, E)$, 其中: V 是移动节点的有限集合; E 是有向无线链路边的有限集合, 这里 $i, j \in V$ 是分配给移动节点的全网唯

2004-11-08 收到, 2005-04-28 改回
国家自然科学基金项目(60372097), 北京自然科学基金项目(4052021)
和韩国仁荷大学 IT 研究中心项目资助课题

一的地址标志符。每个节点 i 根据无线信号传输模型具有大小为 R_i 的传播半径。如果节点 j 在节点 i 的传播半径 R_i 内, 则存在一条从节点 i 到节点 j 的有向无线链路 $E(i, j)$, 节点 j 称为节点 i 的邻节点。令 N_i 为节点 i 的所有邻节点的集合, 则有 $j \in N_i$ 。

令 E_i 为节点 i 的剩余能源, e_{ij} 为节点 i 发送单位数据到其任意邻节点 j 所需消耗的能源, f_{ij} 为从节点 i 发送到节点 j 的数据流。在本文中, 我们假定: (1) Ad hoc 网络的节点不具有功率调整功能, 即指其发射功率都是固定值; (2) 各节点的发射功率可能互不相同。根据上述假定, e_{ij} 相等, $\forall j \in N_i$ 。

根据上面描述的系统模型, 从节点 i 发送的数据流的总和为

$$f_i = \sum_{j \in N_i} f_{ij} \quad (1)$$

从而可得节点 i 的生存时间为

$$T_i = E_i / (e_i f)_i = E_i / \left(e_i \sum_{j \in N_i} f_{ij} \right) \quad (2)$$

针对网络节点能源所限问题, 最小发射功率 MTE (Minimum Transmitted Energy) 算法^[4]试图在源节点与目的节点之间寻找一条耗费能源最少的路径。MTE 算法可以用任一种分布式最短路径算法来实现, 比如分布式 Bellman-Ford 算法^[5]。然而 MTE 算法有其固有的缺陷: 由于网络中各节点的初始储备能源量不一致以及在网络运行过程中节点的参与程度不同引起的能量消耗差异, 通常网络各节点的剩余能源是不同的, 虽然 MTE 算法所选路径上所有节点的耗费能源之和最少, 那些剩余能源较少的节点就会先于其它节点把能源消耗殆尽, 导致与该节点相连的链路失效, 从而影响整个网络的生存时间。要延长整个网络的生存时间的关键在于在为数据流选择路径时, 要让能源储备较多的节点承担较多的数据转发任务, 而能源储备较少的节点则承担较少的转发任务。这样, 就延长了能源储备较少的节点的生存时间, 从而也延长了整个网络的生存时间。

该思想可以形式化地表述为: 给定有向图 $G(V, E)$, 信源 s , 信宿 d , P 表示 s, d 间所有路径的集合, V_p 表示 P 所覆盖的所有节点, 为从 s 到 d 的数据流 $f_{s \rightarrow d}$ 选择路径, 并满足条件:

$$\min_{i \in (V_p)} T_i = \min_{i \in (V_p)} \frac{E_i}{e_i \sum_{j \in N_i} f_{ij}} \rightarrow \max \quad (3)$$

$$f_{ij} \geq 0, \forall i \in (V_p), \forall j \in N_i \quad (4)$$

其中式(3)描述了在数据流传输时应该尽量延长路径上剩余能量最少的节点的生存时间, 也就是尽量延长网络的生存时间; 式(4)描述了数据流的非负性。

考虑到移动 Ad hoc 网络的动态性和网络信息的不精确性(不确定性), 本文提出的多路径能量感知路由算法从概率意义上来最大化网络的生存时间。

3 EAMRA 算法描述

由于网络的不可预料的动态特性, 用户获取网络的精确状态信息是非常困难的。在网络信息收集和发送过程中常会出现网络信息失效即网络信息不收敛问题, 根据现在时刻的状态信息所确定的最佳路由在下一时刻就不一定是最佳, 甚至不存在^[2]。在 EAMRA 算法中没有最佳路径的概念, 所有在路由发现阶段获得的路径都是发送数据的可选路径, 这些可选路径组成节点的路径池, 路径池中的有效路径的地位是对等的, 数据包的路由根据路径池中路径的跳数、可信度、剩余能量为参数按一定的概率分布随机选择。路径的剩余能量在数据的传送过程中通过源节点和目的节点间的数据-确认流来反馈更新; 路径的可信度在数据的传送过程中根据路径的表现动态调整, 当路径的可信度低于某一阈值时该路径失效, 路径池中的有效路径数目低于某一阈值时触发新的路由发现过程。

3.1 路由发现

源节点 s 需要与目的节点 d 进行通信时, 节点 s 开始路由发现过程:

(1) 节点 s 构造一个路由请求消息(RREQ)包, 并将该路由请求消息广播到所有的邻节点。路由请求消息(RREQ)具有如下格式:

$$\text{RREQ} = (\text{DataType}, \text{SrcAddr}, \text{DestAddr}, \text{Seq}, \text{HopCount}, \text{EP}, \text{Path})$$

其中 DataType 表示分组的类型, SrcAddr 表示分组的源地址, DestAddr 表示分组的地址, Seq 表示分组的序列号, HopCount 表示分组的生命值(跳数), EP 表示分组所经历路径的剩余能量(初值为 $+\infty$), Path 表示分组所经历路径。

(2) 中间节点在收到路由请求消息后, 首先查看该消息的生命值是否为零, 如果为零则丢弃该消息, 不为零则进一步查看该消息是否被转发过, 如果该消息被转发过则丢弃该消息; 否则, 中间节点把自身的地址加入路由请求消息的 Path 域, 将节点自身的剩余能量 E 与 EP 作比较, 如果 $E < EP$ 则 $EP = E$; 否则 $EP = EP$, 并将该消息的 HopCount 减 1, 然后转发该路由请求消息。

(3) 目的节点 d 收到从源节点 s 发来的路由请求消息后, 触发路由应答过程:

考虑一般情况, 节点 s 和 d 之间存在多条可行路径, 那么节点 d 会在限定的时间内接收到由节点 s 发出经由不同路径到达的多包路由请求消息。首先节点 d 从所收到的路由请求消息中抽取 $s \rightarrow d$ 的路径信息, 然后构造一个路由应答消息

(RREP)并将该消息广播到所有的邻节点。路由应答消息(RREP)具有如下格式:

$$\text{RREP}=(\text{DataType}, \text{SrcAddr}, \text{DestAddr}, \text{Seq}, \text{HopCount}, \text{EP}, \text{Path}, \text{PathSet})$$

其中 DataType 表示分组的类型, SrcAddr 表示分组的源地址, DestAddr 表示分组的目的地地址, Seq 表示分组的序列号, HopCount 表示分组的生命值(跳数), EP 表示分组所经历路径的剩余能量(初值为 $+\infty$), Path 表示分组所经历路径, PathSet 表示目的节点 d 从源节点 s 发送的路请求消息中获得的 $s \rightarrow d$ 可行路径集 $\text{Path}(s, d)$ 。

(4)中间节点在收到路由应答消息后,首先查看该消息的生命值是否为零,如果为零则丢弃该消息,不为零则进一步查看该消息是否被转发过,如果已转发过则丢弃该消息;否则,中间节点把自身的地址加该消息的 Path 域,将节点自身的剩余能量 E 与 EP 作比较;如果 $E < \text{EP}$ 则 $\text{EP}=E$; 否则 $\text{EP}=\text{EP}$, 并将该消息的 HopCount 减 1, 然后转发该路由应答消息。

(5)源节点 s 收到从目的节点 d 发来的路由应答消息后,触发路由应答确认过程:

考虑一般情况,节点 d 和 s 之间存在多条可行路径,那么节点 s 会在限定的时间内接收到由节点 d 发出经由不同路径到达的多包路由应答消息。首先节点 s 从所收到的路由应答消息中抽取 $s \rightarrow d$ 的路径信息 $\text{Path}(s, d)$ 和 $d \rightarrow s$ 的路径信息 $\text{Path}(d, s)$, 并以可行路径集 $\text{Path}(s, d)$ 构建数据路径池(the Data-Path Pool)。然后节点 s 构造路由应答确认消息(RREP-ACK), 并从数据路径池(the Data-Path Pool)中以一定的概率分布(以路径的跳数 CP , 剩余能量 EP 为参数)随机选取一条或多条路径发送该路由应答确认消息。路由应答确认消息的格式(RREP-ACK)如下:

$$\text{RREP-ACK}=(\text{DataType}, \text{SrcAddr}, \text{DestAddr}, \text{Seq}, \text{EP}, \text{Path}, \text{PathSet})$$

其中 DataType 表示分组的类型, SrcAddr 表示分组的源地址, DestAddr 表示分组的目的地地址, Seq 表示分组的序列号, EP 表示分组所选路径的剩余能量, Path 表示分组所选路径, PathSet 表示源节点 s 从目的节点 d 发送的路由应答消息中获取的 $d \rightarrow s$ 可行路径集 $\text{Path}(d, s)$ 。

(6)目的节点 d 收到从源节点 s 发来的路由应答确认消息后,从所收到的路由请求消息中抽取 $d \rightarrow s$ 的路径信息 $\text{Path}(d, s)$, 并利用 $\text{Path}(d, s)$ 构建数据应答路径池(the Reply-Path Pool)。

当上述过程完成时,源节点向目的节点发送数据,路由发现过程结束。

3.2 路由维护

EAMRA 是一种面向连接的反应式路由协议,路由的维护功能主要由源节点和目的节点利用数据-确认流来实现。

(1)源节点 s 在发送数据的过程中创建一个长度为 N 的数据发送窗。对于每个被发送的数据分组节点 s 在数据窗中创建发送数据项(SDE)。发送数据项的格式如下:

$$\text{SDE}=(\text{IndexNum}, \text{DataSeq}, \text{PathId}, \text{RetryCount})$$

其中 IndexNum 表示数据项在数据窗中的序号; DataSeq 表示被发送数据包的序号; PathId 表示用来发送数据包的路径; RetryCount 表示数据包的重发次数。

源节点 s 要发送数据,必须满足条件:数据路径池中的路径数 $N(p)$ 必须大于或等于预先设定的阈值,而且数据发送窗未满。节点 s 在发送数据时,按一定的概率分布(以路径的跳数、可信度和剩余能量为参数)从数据路径池中随机选取一条路径发送数据包,同时在数据发送窗中创建该数据包的发送数据项。节点 s 收到数据确认消息时从数据发送窗中删除对应的发送数据项,并对路径池中对应的路径进行更新:

(a) 如果对应路径的可信度小于初始赋值,则增加该路径的可信度,但路径的可信度不能超过路径的最大可信度(初始赋值)。路径的最大可信度不能设得太大,设得太大算法不能快速的跟随路径状态的改变;路径的最大可信度也不能设得太小,设得太小则会降低算法对路径暂时失效的容错能力。

(b) 用数据确认消息反馈回来的路径剩余能量刷新对应路径的剩余能量域。

数据发送窗为非空时周期性地查看窗的首项是否等待超时,如果超时则重发该数据项对应的数据包,并在数据发送窗中创建新的发送数据项,同时降低超时发送数据项中对应路径的可信度。如果某条路径的可信度低于预先设定的阈值时该路径成为失效路径。当数据路径池中的有效路径数 $N(p)$ 小于预先设定的阈值时触发新的路由发现过程。

(2)目的节点 d 在接收数据的过程中创建一个长度为 N 的数据接收窗。对于每个被接收数据包节点 d 在数据接收窗中创建接收数据项(RDE)。数据接收窗中数据项(RDE)的格式如下:

$$\text{RDE}=(\text{IndexNum}, \text{DataSeq}, \text{PathId})$$

其中 IndexNum 表示数据项在数据窗中的序号; DataSeq 表示接收数据包的序号; PathId 表示用于发送数据包确认消息的路径。

目的节点 d 收到源节点 s 发送的数据包后,首先按一定的概率分布(以路径的跳数、可信度和剩余能量为参数)在应答路径池中随机选取一条路径发送数据包的确认消息;然后,在数据接收窗中创建对应的接收数据项,同时查看数据

接收窗中是否存在与新加入项具有相同的数据包序号域值

的数据项,如果存在这样的数据项则认为上次发送的数据包确认消息没有被源节点 s 正确接收,因此删除与新创建的接收数据项具有相同的数据包序号域值的数据项,并降低此数据项所对应路径的可信度,当某条路径的可信度低于预先设定的阈值时该路径成为无效路径;最后,根据数据包反馈的路径剩余能量信息更新应答路径池中对应路径的剩余能量域。

另外,我们假定在一定时间间隔内没有收到重复的数据包,则认为该数据包的确认消息已被源节点正确接收。当接收数据窗非空时以一定的时间间隔周期性地删除数据接收窗首项数据项,并且当首项数据项所对应路径的可信度小于初始赋值时,增加该路径的可信度,但路径的可信度不能超过路径的最大可信度(初始赋值)。

3.3 路径选择

给定有向图 $G(V, E)$, 对于任意两个不同节点 $s, d \in V$, p_i 表示 s, d 间的有效路径, P_{sd} 表示 s, d 间所有有效路径的集合, $p_i \in P_{sd}$, V_{p_i} 表示路径 p_i 所覆盖的所有节点。路径 p_i 的跳数、可信度、剩余能量分别用 $C_{p_i}, R_{p_i}, E_{p_i}$ 来表示,其中 $C_{p_i} = \{V_{p_i} \text{ 所包含节点的数量}\}$, $R_{p_i} = \{\text{小于网络路径可信度初始配置值 } RP_{\max} (RP_{\max} \text{ 为大于 } 0 \text{ 的整数)的非负整数,随路径的表现更新}\}$, $E_{p_i} = \min_{j \in V_{p_i}}(E_j)$ 。

假设节点 s, d 间存在 N 条有效路径,即 $p_i \in P_{sd}, i = 1, \dots, N$; $C_{p_i}, R_{p_i}, E_{p_i}$ 表示路径 p_i 性能的量度参数; CP_{\max} 为路径最大跳数, RP_{\max} 为路径最大可信度, EP_{\max} 为路径最大剩余能量数。

定义 路径 p_i 的性能综合量度 $M_i = \varphi(C_{p_i}, R_{p_i}, E_{p_i})$, $i = 1, \dots, N$; $M_0 = 0$ 。其中 $\varphi(C_{p_i}, R_{p_i}, E_{p_i})$ 为变量 $C_{p_i}^{-1}, R_{p_i}, E_{p_i}$ 的增函数,且当 $C_{p_i} > 0, R_{p_i} > 0, E_{p_i} > 0$ 时, $\varphi(C_{p_i}, R_{p_i}, E_{p_i}) > 0$ 。路径 p_i 的归一化性能综合量度

$$m_i = M_i / \sum_{j=0}^N M_j, i = 0, 1, \dots, N。$$

令 $S_i = \left(\sum_{j=0}^{i-1} m_j, \sum_{j=0}^i m_j \right), i = 1, \dots, N$, 那么 $\bigcup_{i=1}^N S_i = (0, 1]$, 且 $|S_i| = m_i, i = 1, \dots, N$ 。

选择路径 首先用函数 $\text{random}()$ 产生一个 $(0, 1)$ 的随机数 r , 根据随机数 r 在 $\bigcup_{i=1}^N S_i$ 中的位置选择路径: 如果 $r \in S_i$, 则选择路径 p_i 作为发送分组的路径, 路径 p_i 被选中的概率 $\text{Prob}\{\text{选择路径 } p_i \text{ 为发送路径}\} = m_i$, m_i 满足 $\sum_{i=0}^N m_i = 1$ 。

文中我们考虑 $\varphi(C_{p_i}, R_{p_i}, E_{p_i}) = \alpha \cdot C_{p_i}^{k_1} + \beta \cdot R_{p_i}^{k_2} + \gamma \cdot E_{p_i}^{k_3}$, ($\alpha \geq 0, \beta \geq 0, \gamma \geq 0; k_1 < 0, k_2 > 0, k_3 > 0$)。为了减小节点的计算复杂度我们取 $k_1 = -1, k_2 = k_3 = 1$, 即 $\varphi(C_{p_i}, R_{p_i}, E_{p_i}) = \alpha \cdot C_{p_i}^{-1} + \beta \cdot R_{p_i} + \gamma \cdot E_{p_i}$ 。(α, β, γ) 的不同取值对应于不同的路由算法: (α, β, γ) = (1, 0, 0) 对应于

概率意义上的最小跳数路由算法(PMHRA); (α, β, γ) = (0, 1, 0) 对应于概率意义上的最大可信度路由算法(PMRRR); (α, β, γ) = (0, 0, 1) 对应于概率意义上的最大剩余能量路由算法(PMERA); (α, β, γ) = (1, $1/RP_{\max}$, 0) 对应于 PPRP 路由算法; (α, β, γ) = (1, $1/RP_{\max}, 1/EP_{\max}$) 对应于能量感知多路径算法(EAMRA)。

4 仿真结果

本文对算法的有效性进行了验证,算法的有效性以移动 Ad hoc 网络的生存时间为量度指标。网络生存时间为从网络开始运行到网络中出现第一个能源耗尽的节点的时刻为止的时间长度^[6]。

仿真网络由 80 个节点组成,网络节点随机分布在 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 区域内,每个网络节点具有暂停和运动两种行为模式。节点在它的暂停期内静止不动,然后以一个服从均匀分布 $U[0, 20\text{m/s}]$ 的随机速度移动到一个随机选择的位置^[7]。网络节点提出数据传送请求的时间间隔以及每次请求传送的数据包的数量相互独立且分别服从均值为 30s 和 256(包)的指数分布。仿真模型中每个网络节点的无线覆盖范围是相互独立的且服从均匀分布 $U[0, 400\text{m}]$ 的随机量,这对应于具有非对称链路的无线移动 Ad hoc 网络环境。所有网络节点的初始能源数 $EP_{\max} = 2048$, 路由请求分组的生命值 (HopCount) $CP_{\max} = 16$ (跳数); 路径的初始可信度 $RP_{\max} = 8$ 。根据无线信号传输模型,任意节点 i 向邻节点传输单位(包)数据需要耗费的能源的归一化值为 $e_i = (R_i/400)^2$ 。我们对 PMHRA, PMRRA, PMERA, PPRP 和 EAMRA 算法进行了仿真,仿真结果如图 1 所示。

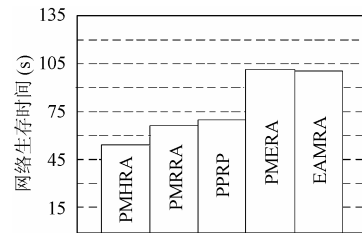


图 1 不同算法的网络生存时间

Fig.1 TTL of networks using different algorithms

从图 1 可以看出,4 种算法中 PMHRA 算法的网络生存时间最短,因为该算法没有考虑能源节省的因素,同时由于每条路径的跳数在数据传送过程中是确定不变的,数据流量相对集中在跳数较少的路径上,从而引起这些路径剩余能量的耗尽速度加快、网络生存时间缩短;PMRRA 算法和 PPRP 算法的网络生存时间有了较大的延长,原因是路径的可信度通常在数据的传送过程中动态变化,通过路径的数据流量相对 PMHRA 算法路要均衡一些;PMERA 算法和 EAMRA 算法的网络生存时间有显著的增加,这是因为这两种算法让剩余能源较多的节点分担了剩余能源较少节点的传输任务,从

而使得剩余能源较少的节点能够工作更长时间。与 PMERA 算法相比 EAMRA 算法综合考虑了跳数、可信度和剩余能量 3 个路径性能尺度, 这可以提高网络的综合性能。

5 结束语

本文针对无线移动 Ad hoc 网络的动态变化拓扑逻辑、存在单向链路、节点能量有限等特点, 提出了一种反应式的基于路径池的具有能量感知的多路径路由算法。通过在数据包选择路由时综合考虑路径的剩余能量等性能尺度, 算法实现了在节点间能源储备不均衡的情况下, 让能源较多的节点承担更多的传输任务, 从而延长了网络的生存时间。仿真结果表明该算法在存在非对称链路的移动 Ad hoc 网络环境下的有效性。

参 考 文 献

- [1] IETF Mobile Ad hoc networks charter, <http://www.ietf.org/html-Charter/manet-charter.html>, 2002. 04.
- [2] Corson S, Macker J. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. RFC2501, January 1999.
- [3] 陈晋伦, 周正等. 一种适用于非对称链路的Ad hoc网络路由协议. 电路与系统学报, 2004, 9(6): 76 – 80.
- [4] Shepard T. Decentralized channel management in scalable multihop spread spectrum packet radio networks/Tech. Rep. MIT/LCS/TR-670, Massachusetts Institute of Technology Laboratory for Computer Science, 1995 – 7.
- [5] Bertsekas D, Gallager R . Data Networks, Prentice-Hall Inc., 1989.
- [6] Chang J H , Tassiulas L. Energy conserving routing in wireless Ad hoc networks. in Proc. INFOCOM, Tel Aviv, Israel, Mar. 2000: 22 – 31.
- [7] Johnson D B, Maltz D A. Dynamic Source Routing in Ad hoc wireless networks. In Mobile Computing, T. Imielinski and H. Korth, eds., Norwell, Mass. Kluwer Academic Publishers, , 1996: 153 – 181.
- 陈晋伦: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为无线网络、传感器网络等.
- 周 正: 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为超宽带无线通信及无线网络.
- [3] 陈晋伦, 周正等. 一种适用于非对称链路的Ad hoc网络路由协