

支持多速率传输的动态 Ad hoc 路由协议

王 炫 李建东 张文柱

(西安电子科技大学信息科学研究所 西安 710071)

摘 要 该文提出了一种支持动态多速率传输的无线 Ad hoc 网络路由方案,它能够增加网络的吞吐量和减少分组的传输时延。该方案把路由功能分为两个部分:广域路由功能和本地路由功能。本地路由功能是一个独立的子层,负责在广域路由功能选择的中继节点之间适当地增加新转发节点,使最终路由中的每段链路都能使用高速率进行传输,从而减小数据发送过程中总的信道占用时间。该文设计了一种 LDSR 协议来执行本地路由功能。仿真结果显示了新的路由方案能够有效地利用网络节点的多速率传输能力,获得更好的网络性能。

关键词 移动 Ad hoc 网络, 路由协议, 多速率传输

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1907-05

A Novel Routing Protocol for Multi-rate Mobile Ad hoc Networks

Wang Xuan Li Jian-dong Zhang Wen-zhu

(Research Inst. of Information Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract A dynamic multi-rate routing scheme is presented. It can increase the throughput and decrease the ETE transmission delay of the Mobile Ad hoc NETWORKS (MANETs). The scheme divides routing function into two parts, the wide routing function and the local routing function. The local routing function, as an independent sub layer, takes charge in properly adding new forwarding nodes between the source-destination pair, by which every link in the resulting route can transmit in faster rate and the total channel occupancy time be reduced. The local routing function can be realized by the new LDSR (Local Dynamic Source Routing) protocol. Simulation result shows that the new multi-rate routing scheme outperforms traditional MANET routing protocols due to its better utilization of multi-rate support.

Key words Mobile Ad hoc NETWORK, Routing protocol, Multi-rate transmission

1 引言

当前,很多无线网络标准都具有支持多速率传输的能力,例如 802.11a, 802.11b, 802.11g 和 HiperLAN2 等。在有基础设施支撑的无线网络(即 WLAN)中,所有的通信都发生在一跳以内,因此,当网络节点的物理层具备多速率通信的能力时,只需在 MAC 层增加速率切换功能就可以支持多速率通信。这样的多速率 MAC 协议有 ARF, OAR, RBAR^[1]等。

MANET 是一种自组织的多跳无线网络,网络中的所有节点都参与分组转发过程。在这种环境中,为了能够更好地发挥多速率传输的优势,还需要路由协议的支持。目前 MANET 中广泛使用的路由协议,如 DSR^[2], AODV^[3], DSDV^[4]等,都是使用最小跳数作为选择路由的尺度,它们所选择的路由主要是由速率较低的长距离链路组成,因此并不适用于采用多速率传输的 MANET。近年来有关学者提出了一些支持多速率传输的路由协议,如: RICA^[5], MR²RP^[6]以及文献[7]

等,这些方案有以下共同的缺点:(1)设置链路代价时没有考虑到实际传输过程中所要消耗的开销时间;(2)没有考虑分组长短的影响;(3)在协议执行过程中需要周期性地全网广播路由维护消息。可以看出,上述协议选择路由的尺度还不够合理,周期性的广播还会增加网络的开销,因此,我们有必要对其进行改进以提高其性能。

本文提出了一种分层的路由方案,它能够解决上述协议在支持多速率传输方面的缺陷。该方案能够有效地利用高速率链路进行通信,减小传输时延,提高网络通过量。本方案还有一个突出的优点,即,它可以根据实际发送分组的大小来选择最适合的路由,这是目前其它协议所不具备的。

2 速率网络中的路由准则

根据无线信号的传播特性,在通信速率与有效通信距离之间存在一个内在的折衷关系:高速率通信适合于在较短的链路进行;反之,在长距离链路上只能进行低速率通信。

当发送节点功率不变时,接收节点接收到的功率与两者之间的距离的 n 次方(在 $n > 2$, 典型值在 3~6 之间)成反比。 n 值越大,意味着信号功率随传输距离增加而衰减得越快,维持更远通信距离的代价也越大。以 Lucent ORiNOCO PC 无

2005-09-02 收到, 2006-05-15 改回

国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合资助项目(60372048), 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划, 国家自然科学基金重大项目(60496316), 教育部科学技术研究重点项目(104171)和国家 863 计划重大课题(2001AA123031)资助课题

线网卡为例, 它能提供 802.11b 所指定的 4 种传输速率。表 1 中给出了不同传输速率所对应的最小接收门限电平, 以及在 $n=4$ 条件下计算出的最大传输距离, 其中 R 表示使用 1Mbps 时的最大传输距离。

表 1 802.11b 无线网卡参数
Tab.1 Parameters of a 802.11b wireless PC card

速率	接收门限	传输距离
1Mbps	-94dBm	R
2Mbps	-91dBm	$0.8414R$
5.5Mbps	-87dBm	$0.6683R$
11Mbps	-82dBm	$0.5R$

在一个允许多速率传输的多跳 Ad hoc 网络中, 应该选择何种路由策略才能使网络总体性能达到最佳? 这里同样存在一个折衷问题: 由长距离链路组成的路由可以用较少的跳数到达目的节点, 但是其成员链路只能支持低速率通信; 而由短距离链路组成的路由需要更多跳才能到达目的节点, 但是其成员链路能够支持高速率进行通信。由于跳数只是上述矛盾中的一个方面, 因此它已经不适合作为选择路由的依据了。

在单信道无线网络中, 网络节点通过时分复用方式共享信道。信道占用时间可以被视为反映传输过程中所消耗的网络带宽资源的一种指标。在一次分组(从源节点到目的节点)传输过程中, 如果能够减小转发过程中占用信道的总时间, 就能够留出更多时间片段进行其他的分组传输, 这意味着, 在单位时间内全网可以进行更多次分组传输, 即提高了网络的端到端通过量。另一方面, 在网络的输入业务量一定的条件下, 减小信道占用的总时间可以使网络的繁忙程度降低, 网络节点在发送过程中接入信道的平均时延减少, 发生传输碰撞的概率降低, 这些因素有利于减小平均(端到端)分组传输时延。因此, 使用最小信道占用时间为路由选择标准, 对于提高网络性能更为有利。需要说明的是, 在单速率网络中, 最小跳数路由与最小信道占用时间路由是等价的概念, 而在多速率传输网络中这两者不同。

在进行路由计算时, 通常的做法是根据一定的规则为每条链路安排一个合适的权值, 然后根据权值总和最小的原则选择路由。因此, 链路权值如何设置决定了最终生成的路由特性。一些支持多速率传输的路由协议中, 认为信道的占用时间与信道的速率成反比, 以传输速率的倒数作为链路权值。实际上, 在无线信道上发送分组时必定会存在一些开销时间, 这些开销时间来源于物理层(例如: 传输物理层前导码和物理层帧头所需要的时间), 或来源于 MAC 层(例如: 节点之间交换握手信号的时间, 以及用于保护用途的各种帧间隙等)。以 802.11 DCF 的帧交换过程为例, 一个典型的分组发送过程要经过 4 个 MAC 帧交换(RTS,CTS,DATA,ACK), 其中只有 DATA 帧中的高层数据部分可以使用高速率进行传输, 而 RTS 和 CTS 通常使用基本速率 1Mbps 传送, 此外所有物理帧的前导码和物理层帧头部分也同样使用 1Mbps 速

率传输。由此可见, 信道占用时间与信道速率不是简单的反比关系。

由于传输过程中存在开销时间, 在发送不同长度的分组时采用高速率发送所能取得的性能提升是不同的。因此, 合理路由方案应该对数据分组的长度具有自适应性, 即, 在发送长分组时, 应选择由传输距离短且传输速率高的链路所组成的路由, 以充分利用高速率传输带来的优势; 而在发送短分组时, 应该选择由速率低但传输距离远的链路组成的路由, 以减少数据的转发次数。为实现这个目标, 本文提出动态分配链路权值的策略, 即, 同一条链路在传送不同大小的分组时被赋予不同的链路权值。本文中, 以在某链路上发送分组时的信道占用时间期望值(简称为 MTM)作为该链路的权值, 以路由中所有成员链路的权值之和作为该路由总代价。在此条件下所选择出最小代价路由简称为最小 MTM 路由, 它能够保证数据传输过程中总的信道占用时间最小化, 从而达到提高网络的吞吐量和减少分组端到端传输时延的目的。从原理上来讲, 本文提出的路由方案可以支持不同的低层协议。为了便于解释协议运行过程和编写仿真程序, 我们假设网络中的节点的 MAC 层使用 802.11DCF, 物理层使用 802.11b。计算 MTM 所需的物理层和链路层的主要参数见表 2。

表 2 计算链路权值所需的主要参数
Tab.2 Some parameters involved in link weight assignment

物理层帧头前导码及物理帧头传输时间 T_{PHY}	192 μ s
RTS帧的传输时间 T_{RTS}	352 μ s
CTS帧的传输时间 T_{CTS}	304 μ s
ACK帧的长度 L_{ACK}	112 bit
DATA帧的MAC帧头长度 L_{MAC}	272 bit
Sifs 帧间隙的长度 T_{sifs}	10 μ s
Difs帧间隙的长度 T_{difs}	50 μ s
Backoff平均时长 $T_{backoff}$	310 μ s

设链路的信道速率为 R_{link} , 当传输长度为 L_{data} 的高层数据时, 按照公式: $T_{MTM} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 3 T_{sifs} + T_{difs} + T_{backoff}$ 计算出的链路权值, 即, 一次分组发送过程中的媒体占用时间为

$$T_{MTM} = 1430 + (484 + L_{data}) / R_{link} \quad (1)$$

3 分层的多速率路由方案

如果网络节点能够获取到网络中所有链路的速率信息, 就能计算出到达任意目的节点的(全局意义上的)最佳路由, 然而这在现实中是很难实现的。为了获取全网范围内的链路信息需要进行大量的消息交换过程, 路由开销会消耗过多的网络带宽资源。在文献[8]中, 作者提出了 PARO 协议, 其中使用了分层路由方案来支持动态功率控制。本文提出的路由方案借鉴了这种思路, 提出一种支持多速率传输的分层路由方案。该方案在网络层和 MAC 层之间增加一个低附加开销的本地路由子层, 它与使用最小跳数路由协议的网络层相互

配合, 共同完成路由选择和数据转发工作。我们以图 1 所示的拓扑中源节点 SRC 向目的节点 DST 发送分组的情况为例, 说明两个层的功能。

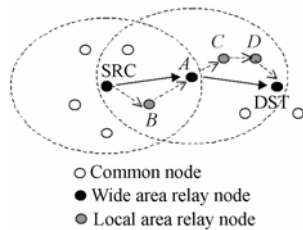


图 1 简单网络拓扑示意图

Fig.1 A simple network topology

首先, 源节点 SRC 的网络层负责计算出一条至目的节点的最小跳数路由 SRC-A-DST。为了描述方便, 我们将这条路由称为广域路由, 把其中的中继节点称为广域中继节点。本地路由子层负责对广域路由中的每一跳进行优化, 即, 在使用低速率才能够直接通信的广域中继节点对之间加入额外的中继节点(本文称之为本地中继节点), 把一条低速率的长距离链路分割成多个高速率的短链路, 使用由这些链路组成的路由(本文中称之为本地路由)代替广域中继节点之间的直接链路进行分组发送, 以减少数据传输过程中总的信道占用时间。在本例中, 我们希望用本地路由 SRC-B-A 及 A-C-D-DST 分别取代 SRC-A 链路和 A-DST 链路进行数据传输。

本方案的原理如下: (1)从表 1 中可看到, 为了增加通信距离而在通信速率方面的损失是很大的(例如, 在 1Mbps 时的有效传输距离仅比 11Mbps 时增加了 1 倍, 通信速率却下降 11 倍)。所以, 在使用低速率进行直接通信的节点对之间再适当地增加转发节点, 可以减小数据发送过程中的信道占用时间; (2)最小跳数路由中通常包含有大量低速率通信链路(参看文献[9]中相关分析)。通过对最小跳数路由进行逐跳优化, 网络性能有很大的提升空间。

4 LDSR 协议描述

本文提出一种本地路由协议来完成本地路由子层的功能。该协议采用了 DSR 协议的一些思想(源路由, On-demand 方式等)和类似的帧格式, 在此将其命名为本地动态源路由协议 LDSR。

4.1 LDSR 中的一些重要的数据结构

(1)本地链路状态表(LST) 每个节点的本地路由子层都要维护一个 LST 表, 它用于存储本节点所收集到的周围局部范围内(自己最大传输半径内)的链路速率信息, 为计算本地路由提供基本的依据。

(2)LDSR 帧头 节点发送数据分组前, 本地路由子层在原来的帧结构中增加一个 LDSR 帧头, 其中包含了本地路由的代价、各条成员链路的速率等信息。增加该帧头的目的, 是为了提供一种通过监听而获取网络拓扑的手段。

(3)本地路由更新消息(LRU) 在特定条件的触发下, 节点发送该消息向邻近节点通知自己所收集到的相关链路的

速率信息, 其用途类似于 DSR 协议中的 Gratuitous Reply 消息。

(4)本地链路错误通知消息(LLEN) 由于物理信道变化和节点移动等因素, 通信链路的质量不断变化, 当某个本地中继节点在传输数据的过程中发生失败时, 会发起 LLEN 消息通知自己的邻节点。

4.2 数据转发过程中 LDSR 的工作

在本文的分层路由方案中, 本地路由子层需要和网络层配合工作来完成数据转发过程。这里假设网络层使用的是 DSR 路由协议。我们以图 1 所示的拓扑中, 源节点 SRC 向目的节点 DST 发送分组为例, 来说明通信过程中 LDSR 所做的工作。

在源节点 SRC 准备向目的节点发送分组之前, 首先要通过 DSR 协议的路由探测过程获得一条源、目的节点间的广域路由, 如图中的 SRC-A-DST。节点的网络层负责填写 DSR 路由头并组成网络层 PDU(协议数据单元), 然后将该 PDU 以及下一个广域中继节点的地址(节点 A)等信息传递给本节点的本地路由功能子层; 本地路由子层根据发送分组的长度, 按照式(1)为 LST 表中的每条链路设置相应的链路权值, 计算出从本节点到 A 节点的一条最小代价的路由(SRC-B-A)作为本地路由, 并按照计算出的本地路由填写 LDSR 帧头和组织本地路由子层的 PDU, 随后将该 PDU 传递给 MAC 层, 但接收节点的地址改变成了下一个本地中继节点(节点 B); MAC 层和物理层经过相关处理后, 将分组发送。

本地中继节点 B 收到节点 SRC 发送的分组后, 其网络层不处理该分组, 本地路由子层也不再进行本地路由计算工作, 而只需分析接收帧中的 LDSR 帧头, 从中提取下一个本地中继节点的地址, 再由本节点的低层进行分组转发。

当广域中继节点 A 接收到分组后, 首先由本地路由子层对接收分组进行处理, 在除去接收帧的 LDSR 帧头后, 将网络层 PDU 部分传递给本节点的网络层进行处理; 网络层对该 PDU 中的 DSR 帧头进行分析, 从中提取下一个广域中继节点的地址(节点 DST, 在本例中也是最终的目的节点), 再将该地址以及网络层 PDU 等信息传递给本节点的本地路由功能子层; 本地路由子层负责计算出从节点 A 到 DST 间的本地路由(A-C-D-DST), 并填写 LDSR 帧头和组成本地路由子层 PDU, 然后, 将该 PDU 以及下一个本地中继节点的地址(节点 C)传递给 MAC 层; MAC 层和物理层经过相关处理后发送该分组。

在随后数据传输过程中, 其余的本地中继节点和广域中继节点分别进行着与节点 B 或节点 A 相同的处理过程, 直至分组被传送到目的节点。数据分组最终沿着路由 SRC-B-A-C-D-DST 到达目的节点。

4.3 LDSR 对局部拓扑的维护

本地路由子层在进行本地路由计算时需要 LST 表提供周围链路的速率信息, 这些信息主要靠两种机制来获得: (1)监听其它节点所发送的数据帧, 通过分析其中的 LDSR 帧头

来获取本地路由中各个成员链路的速率信息；(2)接收其它节点发送的 LRU 消息，获取相关链路的速率信息。

我们仍以图 1 拓扑为例，简要说明一下 LST 的维护过程。当节点 SRC 首次向节点 A 传送分组时，如果其 LST 表中还没收集到其它链路的速率信息，则无法计算出一条本地路由，只能使用 SRC-A 链路发送分组。处于 SRC 和 A 的传输范围内的邻节点 B 必然能够监听到这次帧交换过程。通过判断来自节点 SRC 和节点 A 的信号强度，节点 B 可以估计出 SRC-B 和 B-A 链路的速率，并将这两条链路的信息加入到自己的 LST 表中。随后 B 节点利用自己的 LST 表中信息，也尝试着计算一条从 SRC 至节点 A 的本地路由 SRC-B-A。如果该本地路由的代价小于当前传输正在使用的本地路由 (SRC-A) 的代价，则节点 B 将启动一个随机延时的定时器，在定时器超时之后，发送一条 LRU 消息，其中包含了 B 节点新计算出的本地路由的代价以及成员链路 SRC-B 和 B-A 的速率信息。节点 SRC 和其它能够接收到该消息的节点，可以根据这些信息更新自己的 LST 表。当节点 SRC 下一次向节点 A 发送数据时，由于 LST 表中已经获取了链路 SRC-B 和 B-A 的信息，因而计算的本地路由变为 SRC-B-A。可以看出，在整个过程中不需要周期性发送任何维护消息，因而产生的开销很少。

5 性能仿真

为了评估路由方案的性能，我们使用 NS-2 工具进行了仿真。由于本文所提出的路由方案中，本地路由由子层需要和其它各层配合工作，我们假设节点模型的网络层使用 DSR 路由协议；MAC 层使用带有 RBAR 速率预约机制的 802.11 DCF 协议；物理层采用的是 802.11b，具体的参数见表 1 中。发射机的发射功率设定为 3dBm，按照双线传播模型计算出来的各种传输速率条件下的最大传输距离分别为：400m(1Mbps)，336m(2Mbps)，267m(5.5Mbps)，200m(11Mbps)。

仿真中使用 3 种路由方案进行性能对比，第 1 种是 DSR 路由方案，第 2 种是本文提出的分层路由方案，简称为 DSR+LDSR 方案。第 3 种是文献[7]中提出的 Multi-rate Aware Routing 方案(一种以速率倒数为链路权值的路由方案)，本文简称其为 MAR 方案。仿真场景为：50 个节点被随机放置在 1500×300m 的平整地域内，其中 20 个是源节点；在仿真开始时每个源节点随机地选择一个节点作为自己的目的节点，并向其发送 CBR 业务分组；分组的长度是一个可调节的仿真参数；每次仿真执行时间为 280s。

图 2 中统计了 3 种路由方案所生成的最终路由的平均跳数随着网络中传输的业务分组长度而变化的特性。可以看出 DSR 和 MAR 路由的跳数特性与所传输分组的大小无关，而 DSR+LDSR 路由的跳数随着传送分组的长度变化。表 3 统计了 DSR+LDSR 所选择的路由中不同速率的成员链路所占比例。从表中可见，这些特性同样随着传输分组的大小而变化。

在传输大分组的时候，路由中包含较多的高速率链路；而在传输小分组的时候，路由中包含较多的低速率链路。作为对比，我们也统计了采用 DSR 和 MAR 路由方案时的对应指标，结果为：在 DSR 路由条件下，1Mbps，2Mbps，5.5Mbps，11Mbps 链路所占比例依次为(0.325153，0.374484，0.17516，0.125203)；在 MAR 路由条件下，上述比例为(0，0，0.41323，0.58677)。由于这些数据不随分组长度而变化，因此没有列入表 3 中。

表 3 DSR+LDSR 路由中各种速率的链路所占的比例

Tab.3 Portions of different rate links determined by DSR+LDSR Routing scheme

数据长度 (比特)	1Mb/s 链路比例	2Mb/s 链路比例	5.5Mb/s 链路比例	11Mb/s 链路比例
512	0.357724	0.358879	0.153851	0.129546
1024	0.358974	0.333333	0.153846	0.153846
2048	0.000000	0.235294	0.490196	0.274510
4094	0.000852	0.178807	0.390596	0.429745
8192	0	0	0.491346	0.508654
16384	0	0	0.446767	0.553234

从图 2 和表 3 中可以看出，DSR+LDSR 路由显示出了对分组长度的自适应能力，即，它选择由长距离且低速率链路组成的路由来传输短分组，以减小总的转发次数；反之，选择由短距离且高速率链路组成的路由来传输长分组，以充分利用高速率传输的优势。从前文的分析中我们知道，这样的路由方案显然更为合理。

图 3 中对比了 3 种路由方案条件下网络的端到端通过量性能。其中纵轴表示的是各个路由方案所能达到的最大端到端通过量相对于 DSR 路由所能达到的最大通过量的归一化值。从图中看出，当网络中传输较大长度的分组时，使用 MAR 路由方案比使用 DSR 路由方案更有优势，网络的端到端通过量性能可以得到提升；而当分组长度较小时，使用 MAR 路由方案会导致网络性能比使用 DSR 方案时下降很多。与之相比，使用 DSR+LDSR 路由方案传输任何长度的分组，都能使网络的端到端吞吐量性能达到最优。

图 4 和图 5 分别给出了当网络中传送长度为 1024bytes 的分组时，网络的端到端通过量和平均传输时延随着网络的输入业务量变化的特性。其中输入业务量是指单位时间内所有源节点(20 个)产生的分组数量之和。仿真结果表明：与 DSR 路由方案相比，DSR+LDSR 路由方案可以使全网饱和端到端

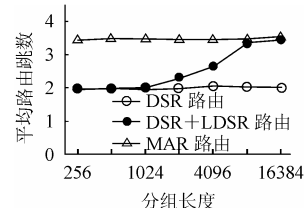


图 2 平均路由跳数
Fig.2 Average route hop counts

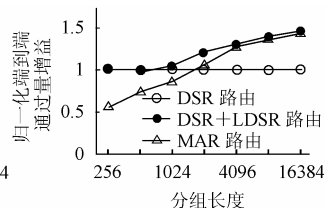


图 3 网络的端到端通过量
Fig.3 Normalized en-to-end throughput

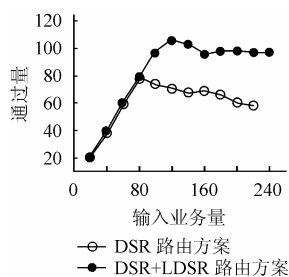


图 4 网络通过量 vs. 输入业务量

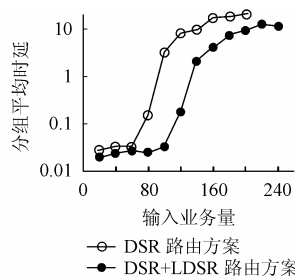


图 5 分组平均时延 vs. 输入业务量

通过量达到更高; 在相同的业务负荷情况下, 分组的端到端传输时延更小。

6 结束语

本文提出了一种支持动态多速率传输的分层路由方案。它很好地平衡了无线信道中存在传输速率与传输距离之间的折衷问题, 更有效地利用节点多速率传输的能力来提高网络吞吐量和减少分组的端到端传输时延, 并能够根据发送数据的不同长度来选择最适合的路由。仿真结果表明了该方案使网络性能得到较大提高。

参 考 文 献

- [1] Holland G, Vaidya N, Bahl P. A rate-adaptive MAC protocol for wireless networks[A]. Proceeding of ACM MOBICOM'01[C]. Rome, Italy: ACM, 2001:111-117.
- [2] Johnson D B, Maltz D A, Hu Yih-Chun, Jetcheva J G. The dynamic source routing protocol for mobile Ad hoc networks[EB/OL]. Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-07.txt, Feb. 2002.
- [3] Perkins C E, Belding-Royeret E M, Das S R. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing[EB/OL]. Internet Draft, draft-ietf-manet-aodv-12.txt, Nov. 2002.
- [4] Perkins C E, Bhagwat P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers[A]. Proc. of the SIGCOMM'94 Conference on Communications Architecture, Protocols and Applications[C], London, UK: ACM, Aug. 1994: 234-244.
- [5] Lin Xiao-Hui, Kwok Yu-Kwong, Lau V K. On channel-adaptive routing in IEEE 802.11b based Ad Hoc wireless network [A]. Proceeding of Global Telecommunications Conference[C]. San Francisco: IEEE, 2003: 3509-3513.
- [6] Sheu Shiann-Tsong, Chen Jenhui. MR/sup 2/RP: The multi-rate and multi-range routing protocol for ad hoc wireless networks[A]. Proceeding of ISCC[C], Italy: IEEE, 2002: 435-440.
- [7] Yongho S, Jaewoo P, Yanghee C. Multi-Rate aware routing protocol for mobile Ad hoc networks. Proc. of the IEEE VTC, Florida: IEEE, 2003: 1749-1753.
- [8] Gomez J, Campbell A, Naghshineh M, Bisdikian C. PARO: Supporting dynamic power controlled routing in wireless Ad hoc networks[J]. *Wireless Networks*, 2003, 9(5): 443-460.
- [9] Takagi H, Kleinrock L. Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1984, 32(3): 246-257.

王 炫: 男, 1973 年生, 博士生, 研究领域为无线 Ad hoc 网络和个人通信系统。

李建东: 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为个人通信、移动通信、分组无线网、分布式无线网络、软件无线电和移动 IP 等方面。

张文柱: 男, 1970 年生, 博士, 主要研究领域为无线 Ad hoc 网络的协议设计和移动通信网。