

Ad Hoc 网络多路径需求路由及路径熵选择算法*

孙宝林⁺, 桂超, 张棋飞, 严冰, 叶雪军

(湖北经济学院 计算机学院,湖北 武汉 430205)

A Multipath on-Demand Routing with Path Selection Entropy for Ad Hoc Networks

SUN Bao-Lin⁺, GUI Chao, ZHANG Qi-Fei, YAN Bing, YE Xue-Jun

(School of Computing, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China)

+ Corresponding author: E-mail: blsun@163.com

Sun BL, Gui C, Zhang QF, Yan B, Ye XJ. A multipath on-demand routing with path selection entropy for ad hoc networks. *Journal of Software*, 2008,19(Suppl.):112-120. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/s112.htm>

Abstract: An ad hoc network is a collection of wireless mobile nodes dynamically forming a temporary network without the use of any existing network infrastructure or centralized administration. Due to bandwidth constraint and dynamic topology of mobile ad hoc networks, multipath supported routing is a very important research issue. In this paper, we present an entropy-based metric to support stability multipath on-demand routing (SMDR). The key idea of SMDR protocol is to construct the new metric-entropy and select the stability multipath with the help of entropy metric to reduce the number of route reconstruction so as to provide QoS guarantee in the ad hoc network whose topology changes continuously. Simulation results show that, with the proposed multipath routing protocol, packet delivery ratio, end-to-end delay, and routing overhead ratio can be improved in most of cases. It is an available approach to multipath routing decision.

Key words: ad hoc network; multipath routing; on-demand routing; entropy

摘要: 无线移动 Ad Hoc 网络是一种不依赖任何固定基础设施的移动无线多跳网络.由于其动态性和资源的限制,在 Ad Hoc 网络中提供多路径路由是一个重要的研究课题.描述了一种 Ad Hoc 网络中基于信息熵选择的稳定多路径路由算法(stability multipath on-demand routing,简称 SMDR),提出了路径熵的度量参数,并利用路径熵来选择稳定的、长寿命的多路径,减少了重构路由的次数,从而在网络拓扑频繁变化的 Ad Hoc 网络环境中较好地提供 QoS 保证和提高数据传输率.仿真结果表明,SMDR 协议改进了分组传输率、端到端时延和路由负载率.SMDR 协议为解决动态的 Ad Hoc 网络多路径传输提供了一种新的有效途径.

关键词: Ad hoc 网络;多路径路由;需求路由;路径熵

无线移动 Ad Hoc 网络(MANET)是由一组带有无线收发装置的移动节点组成的一种多跳的、临时性的自治系统.整个网络没有固定的基础设施,也没有固定的路由器,所有节点都是移动的、动态变化的,并且都可以以

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60772088 (国家自然科学基金); the Postdoctoral Science Foundation of China under Grant No.20070410955 (中国博士后科学基金); the NSF of Hubei Province of China under Grant No.2007ABA062 (湖北省自然科学基金); the Key Scientific Research Project of Hubei Education Department of China under Grant Nos.D20081904, q200717003 (湖北省教育厅重点科研项目)

Received 2008-05-01; Accepted 2008-11-25

任何方式动态地保持与其他节点的联系^[1-5]。由于 Ad Hoc 具有分布式、动态性、自治性、易构性和移动性,使得无线移动 Ad Hoc 网络可以广泛应用于军事领域、自然灾害应急处理、科学考察、探险、交互式演讲、共享信息的商业会议、紧急通信等领域。在这种环境中,每一个节点都具有终端和路由的功能,它们要完成发现和维持到其他节点路由的功能,因此,路由就成为 Ad Hoc 网络中进行数据通信的核心问题^[6,7]。然而,Ad Hoc 网络有其特殊的局限性和属性,如有限的带宽、高度动态的拓扑结构、链路干扰、链路的有限传输范围以及广播等特性,现有的固定网络路由技术已不能适用于 Ad Hoc 网络。

由于 Ad Hoc 网络连接的不可靠性和网络拓扑结构动态变化,单一路径的 Ad Hoc 网络路由性能不能获得太大的突破^[8-11]。在 Ad Hoc 网络中采用多路径路由可获得更高的稳定性,并提高网络资源利用率。首先,Ad Hoc 网络中的带宽有限,通过多路径传输可以减少在带宽方面的限制,有利于负载均衡,减少延时;其次,由于网络拓扑的动态变化,采用多路径能快速传输数据,防止路径的断链,增加稳定性;第三,多路径比原来的单路径更适合于 QoS 路由的要求^[8-17]。

本文在分析 Ad Hoc 网络的特点及 Ad Hoc 网络中多路径路由问题的基础上,利用熵的共性来分析和研究 Ad Hoc 网络的多路径路由问题,提出了一种 Ad Hoc 网络中基于信息熵选择的稳定多路径路由算法(stability multipath on-demand routing,简称 SMDR)。该算法改进了分组传输率、端到端时延和路由负载率。

本文第 1 节介绍多路径路由协议的相关工作,第 2 节描述多路径路由算法,第 3 节给出了多路径路由算法的性能评估,最后一节总结全文。

1 相关工作

1.1 AODV协议

AODV^[6]是无线 Ad Hoc 网络中的一个单路径按需路由协议。它由两个阶段组成:路由发现阶段和路由维护阶段,并且用到了 4 种不同的报文:HELLO 报文,RREQ(路由请求),RREP(路由回答)以及 RERR(路由差错)。

图 1 显示出了这些控制报文的使用过程。在路由发现阶段,源节点广播一个 RREQ 分组寻找目的节点。一旦首次收到 RREQ 分组后,目的节点返回一个 RREP 分组,表明路由已经建立。由于只有一条路由,不存在路由选择问题。在图 1 中,当节点 3 离开后,节点 2 和 3 之间的连接断开。当节点 2 检测到该事件后,就广播一个 RERR 分组。

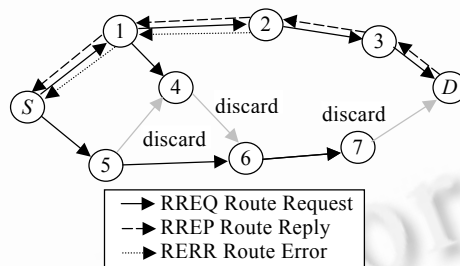


Fig.1 Overview of AODV protocol

图 1 AODV 协议报文的处理过程

1.2 AOMDV协议

AOMDV^[9]是 AODV 协议的扩展,用来进行多路径路由选择。AOMDV 对多路径路由算法的贡献主要体现在两点:一是它提出了一个广播跳数的概念,用来在每个节点上维护多个无环路径;另一个是它修改了 AODV 的路由发现机制,可以用来在源节点和目的节点间维护多个不相交路径。为了保留多条路由,在每个目的节点上维护一个链表,里面包含下一跳以及对应的跳数。所有的下一跳都有一个相同的序列号。每个节点维护一个到网络中其他各个节点的广播跳数,用来表示每条路径的最大跳数。节点收到的每个冗余的路由广播定义了一条替代路径。为了保证路径是无环的,节点仅仅接受一条拥有比广播跳数更低的路径作为备用路由。

1.3 AODVM协议

AODVM(AODV multipath)^[13]也是对 AODV 的扩展.AODVM 在一对不相交的路径当中选择其中一条拥有较低中间节点数的路径作为路由.在路由发现阶段,AODVM 利用最先到达的 RREQ 分组建立了一条反向路径.中间节点不能向源节点直接发送一个路由响应.而且,对于重复收到的 RREQ 分组,中间节点并不丢弃,而是记录在一个 RREQ 表中.目的节点针对所有收到的 RREQ 分组全都回应一个 RREP 分组,中间节点将收到的 RREP 分组转发给在 RREQ 表中距离源节点最近的邻居节点.为了保证节点没有同时包含在多条路径中,当节点收到邻居节点广播的 RREP 分组时,就将该邻居节点直接从自己的 RREQ 表中删除.由于节点无法同时参与多条路由,因此可以保证路由是不相交的.

虽然该协议解决了 AODMV 的问题.然而,AODVM 仍然会由于受到跳数的限制,而出现一些较优路径不能充分选取的问题.

1.4 其他多路径路由协议

由于 Ad Hoc 网络节点能量受限,一旦网络中某一个节点由于能量耗尽而关闭,就会对整个网络造成很坏的影响.在使用多路径之后,将原本集中在 1 条路径上的负载分配到了几条不同的路径上,减少了该路径上中间节点的能量消耗,从而降低了由于能量消耗殆尽导致的网络分割或拓扑变化发生的概率.为了做到负载均衡,MSR^[14]算法提出了一个加权循环机制来提高系统吞吐量,降低分组延迟.MSR 就是对 DSR^[7]算法的多径扩展.源节点利用它来寻找到达目的地的多条路由.为了保证路径之间的独立性,优先选取不相交的路径作为最终的路由.在 MSR 调度下,目的节点收到多个 RREQ 分组,并相应确定多条路由.然后在这些备选路由中确定一条主路由和一条替代路由.两条路由相比,主路由的性能更好.SMR(split multipath routing)^[15]算法是基于 DSR 的另一种扩展.在 SMR 中,目的节点收到带有跳数限制的 RREQ 分组,并且从中确立多个不相交的路由进行数据传输,同时还对系统的并发数据传输进行了评估.表 1 给出了 AODVM,AODMV,SMR 和 MSR 四种多路径路由协议的性能比较.

Table 1 Comparison of the multipath routing protocols

表 1 多路径路由协议的比较

	AODVM	AODMV	SMR	MSR
Routing category	Reactive	Reactive	Reactive	Reactive
Loop-Free paths	Yes	Yes	Yes	Yes
Node-disjoint paths	No	No	Yes	Yes
TTL limitation	Yes	Yes	Yes	Yes
QoS support	No	No	No	No
Multicast support	No	No	No	No
Power management	No	No	No	No
Security support	No	No	No	No

文献[16]对 Ad Hoc 网络多路径路由进行了研究,提出了一种新型的移动 Ad Hoc 网络按需多路径路由算法.该算法可以将路由信息保存在源节点中,并据此在源节点中采用替换路径或多路径并发的方式进行数据传输.文献[17]提出了移动 Ad Hoc 网络中一种基于分簇的多路径路由算法.该算法利用多路径并行传输流量实现拥塞避免、优化网络带宽的应用、提高共享信道的利用率;利用基于簇的层次结构能够减少路由维护的代价并提高应用的可扩展性.

2 多路径路由算法原理

在这一节中,我们将提出一个基于路径选择熵的按需多路径路由协议 SMDR.该协议由 3 个阶段组成:路由发现阶段,路由利用阶段以及路由维护阶段.算法采用 AODV 中的 4 种报文格式.它的开销相比 AODV 小.我们主要对路由利用阶段进行了扩展.图 2 显示了 Ad Hoc 网络多路径路由的结构.

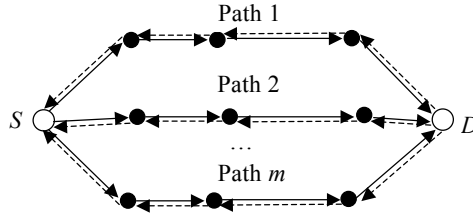


Fig.2 Multipath routing in mobile ad hoc network
图 2 Ad Hoc 网络多路径路由

2.1 路径熵的数学度量

熵的概念来自于 Shannon 于 1948 年创建的信息论^[18].熵可以看做是对信息或不确定性的数学度量,是通过一个概率分布的函数来计算的.Ad Hoc 网络的信息不确定性、自组织特性、移动性等具有熵的共性^[19,20].利用信息熵度量来选择从源节点到目的节点稳定的路径,减少了路由重构的次数,从而在网络拓扑频繁变化的 Ad Hoc 网络环境中尽可能地提高数据传输效率和网络的连通性.

在 Ad Hoc 网络中,其节点的位置和速度是节点移动的重要特征.我们假定节点 m 的特征变量为 $a_{m,n}$,节点 n 是节点 m 的邻居(即节点 n 与节点 m 在相互的传输覆盖范围内), $a_{m,n}(t)$ 表示节点在时刻 t 时的特征变量,在 $t+\Delta_t$ 时的特征变量为 $a_{m,n}(t) \rightarrow a_{m,n}(t+\Delta_t)$.假定 $v(m,t),v(n,t)$ 分别表示节点 m 和节点 n 在 t 时刻的速度变量,节点 m 和节点 n 在 t 时刻的相对速度变量定义为

$$v(m,n,t)=v(m,t)-v(n,t).$$

假定 $p(m,t),p(n,t)$ 分别表示节点 m 和节点 n 在 t 时刻的位置变量,节点 m 和节点 n 在 t 时刻的相对位置变量定义为

$$p(m,n,t)=p(m,t)-p(n,t).$$

从而,任何移动节点对 (m,n) 在它们的时间间隔内的特征变量被定义为

$$a_{m,n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|p(m,n,t_i) + v(m,n,t_i) \times \Delta_t| - |p(m,n,t_{i+1})|}{R}.$$

这里, N 是在时间间隔 Δ_t 内离散时刻 t_i 的个数(每隔一个时间间隔 Δ 相对位置变量和相对速度变量被计算和更新的次数), R 是节点的传输半径(假设节点的传输半径相同),如是我们定义熵 $H_m(t,\Delta_t)$ 为

$$H_m(t,\Delta_t) = \frac{-\sum_{k \in F_m} P_k(t,\Delta_t) \log P_k(t,\Delta_t)}{\log C(F_m)}.$$

这里, $P_k(t,\Delta_t) = \left(a_{m,k} / \sum_{i \in F_m} a_{m,i} \right)$.

F_m 表示节点 m 的邻居节点集, $C(F_m)$ 表示集合 F_m 的度, $0 \leq H_m(t,\Delta_t) \leq 1$.从定义可以看出,给定区域节点的移动变化越剧烈,其熵 $H_m(t,\Delta_t)$ 变化越小.

对于从节点 s 到节点 $d \in U$ 的稳定路径 RS,其熵定义为

$$F(s,d) = \prod_{i=1}^{N_r} H_i(t,\Delta_t).$$

这里, N_r 表示从节点 s 到节点 d 的路径 RS 上的节点数.

由此定义可知,路径 RS 越稳定,则 $F(s,d)$ 越大,我们设定

$$F'(s,d) = -\ln F(s,d).$$

即路径 RS 越稳定,则

$$F'(s,d) = -\ln F(s,d) = -\sum_{i=1}^{N_r} \ln H_i(t, \Delta_i)$$

越小,从而得到表征路径稳定的加性度量——路径熵的数学度量.

2.2 多路径路由发现过程

SMDR 的路由发现过程同 AODV 一样,而其多条路由的建立过程则同 AODVM 算法相同.当存在 k 条路由并且源节点 s 收到 RREP 分组后,第一个到达的 RREP 分组便被无条件接收,并且其对应的路径也被选定为转发路由.该路由与利用 AODV 算法选取的路由是一致的.我们从传输时间的角度来考察路由的选择过程.当重复收到的分组的发送时间与路由表中的时间相同甚至更新,就接收该分组为一个新的转发路由.然而,同 AODVM 算法不同,SMDR 的路由发现进程并不能找到一对没有重复链路的路径,导致每一个中间节点都无法选择一个具有更少普通节点数(称为关节数)的路径.

发现进程避免了频繁的路由发现,同时还提供负载均衡功能.同 AODVM 不同,SMDR 算法并没有采用 keep-alive 分组,同时能够提供更具弹性的路由选择.

同 AODV 一样,源节点广播一个 RREQ 分组.当中间节点首次收到该分组后,就在本地的路由表中记录一个反向路由,并且将该 RREQ 分组广播出去.此外,当中间节点从邻居节点处收到一个延迟的 RREQ 分组后,首先检查分组中携带的源路由列表.如果发现存在环路,则将该分组丢弃.我们在节点的 RREQ 及 RREP 分组中加入路径熵的信息,利用路径熵方法来扩展 AODV 协议,因此必须在路由表中增加以下字段,如图 3 所示.每个中间节点根据本地的需求进行操作,在每条反向路由中存储路由信息及其过期时间信息.

8 bits	8 bits	n bits
Type	Length	Type-specific data ...

Fig.3 AODV extension format

图 3 AODV 扩展格式

2.3 多路径路由维护

SMDR 的路由维护过程同 AODV 相同,都利用了 Hello 分组以及 RERR 分组.维护进程并没有引入 AODVM 算法中的 keep-alive 分组,而是采取了循环机制,利用数据分组来更新路由,防止辅助路由的失效.

3 性能评估

3.1 网络图生成

Waxman^[21]提出的随机图模型产生的随机图与真实网络比较接近,广泛应用于路由算法的模拟试验.在此随机图中,边的概率为

$$P(u,v) = \beta \exp\left(-\frac{d(u,v)}{\alpha L}\right),$$

其中 $d(u,v)$ 表示节点 u 至节点 v 的几何距离, L 表示两节点间的最大距离,参数 α 用来控制随机图中短边和长边呈现的数量,参数 β 则用来控制随机图的平均度.节点的移动模型采用随机点移动模型.

3.2 仿真环境设置

为了有效地评价 SMDR 算法的性能,我们使用 NS2^[22]对 SMDR 算法进行仿真实验.在计算机上模拟一个 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 的区域,在此区域内随机分布 100 个节点, $\alpha=0.2, \beta=0.4$,节点的连接平均度为 4,节点的传输半径是 150m,若两个节点在彼此的传输范围内就用一条链路连接它们,节点的移动速度范围为 $[0\text{m/s}, 10\text{m/s}]$,节点的移动模型为随机点移动模型,传输类型为 CBR,报文到达为 Poisson 流,服务时间为指数分布,报文长度 5 000bit.网络中各链路的初值为:链路的带宽在 $[1\text{Mbps}, 2\text{Mbps}]$ 之间随机分布,链路的代价在 $[10, 50]$ 上随机分布.在仿真实验研究中,我们选择 AODV, AODVM 和 AOMDV 三个协议进行对比研究.表 2 是仿真实验参数.

Table 2 Simulation parameters

表 2 仿真实验参数

Number of nodes	100
Terrain range	1000 m × 1000 m
Transmission range	250 m
Average node degree	4
Simulation time	300 s
Node's mobility speed	0~10 m/s
Mobility model	Random way point
Propagation model	Free space
Channel capacity	2 Mbps
Links delay	20-200ms
Traffic type	CBR
Data payload	512 bytes/packet
Node pause time	0~10 seconds

3.3 评价指标

在仿真实验中,主要从分组传输率、路由负载率以及数据分组平均端到端时延等方面对 SMDR 算法的特性进行评价.在仿真过程中,源节点和目的节点都是随机选取的.传输的数据分组数目是每个节点分别传输的数据分组数目的总和.发送数据分组数目是每个节点分别发送数据分组数目的总和.分组传输率显示了协议的传输效率.其中分组传输率、路由负载率以及数据分组平均端到端时延定义如下:

$$\text{分组传输率} = \frac{\text{成功传输数据分组的总数}}{\text{发送数据分组的总数}}$$

$$\text{路由负载率} = \frac{\text{发送控制分组的总数}}{\text{发送数据分组的总数}}$$

数据分组平均端到端时延:从源节点发送数据分组到目的节点接收数据分组的时间,包括中间节点的队列时延、MAC 层的重传时间及多个中间节点的转发时间等.

3.4 仿真结果

在下面的仿真实验中,每一个模拟点模拟运行 100 次,各曲线图中每个点的数值是模拟运行总数的平均值.

图 4 显示出了分组传输率的比较结果.从图中可以看出,SMDR 算法的传输率最高.这是由于该算法能够较好地保证多路径路由传输数据的稳定性.

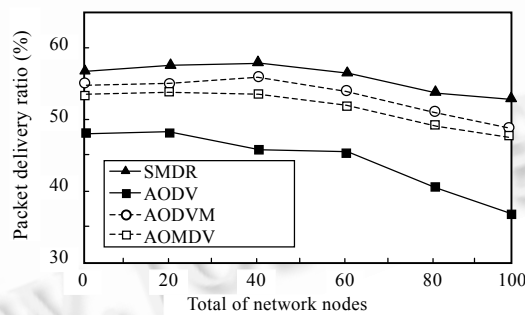


Fig.4 Comparison of packet delivery ratio

图 4 分组传输率比较

图 5 显示出了不同移动速度下的分组传输率的比较结果.从图中可以看出,移动速度越快,分组的传输率就变低,SMDR 算法的分组传输率要高于其他算法.在节点的移动变快时,多路径传输数据分组变得更重要,此外,由于冲突的发生,数据分组经常会出现丢失现象.SMDR 算法有更多的机会成功保持路径的稳定性,因此,SMDR 算法表现出更好的可靠性.

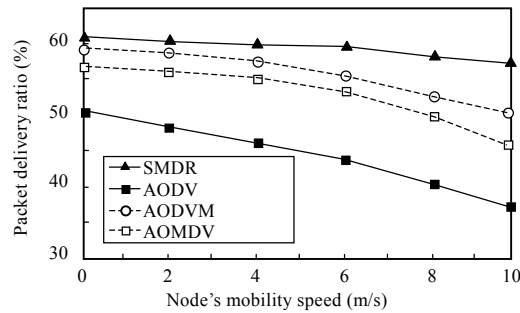


Fig.5 Comparison of packet delivery ratio vs. node's mobility speed

图 5 不同移动速度下的分组传输率比较

图 6 给出了在节点改变移动速度的情况下 SMDR 算法与其他 3 种算法的平均端到端时延比较.可以看出,节点移动越快,端到端时延越高.从图中还可以看出,当节点的移动速度增加时,SMDR 算法的端到端时延比其他算法要低.这是因为该算法只需很少的路由发现开销就能获得稳定的路由.

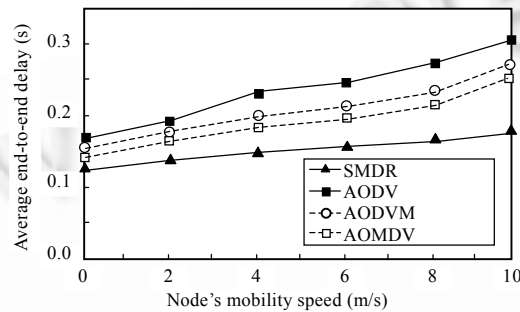


Fig.6 Comparison of end-to-end delay vs. node's mobility speed

图 6 不同移动速度下的端到端传输时延比较

图 7 显示了 4 种算法的路由负载率.其中,控制分组包含路由发现分组(RREQ 和 RREP)和路由维护分组(RERR 和 HELLO).从图中可以看到,当节点的移动速度增加时,SMDR 算法的路由开销比是最小的.

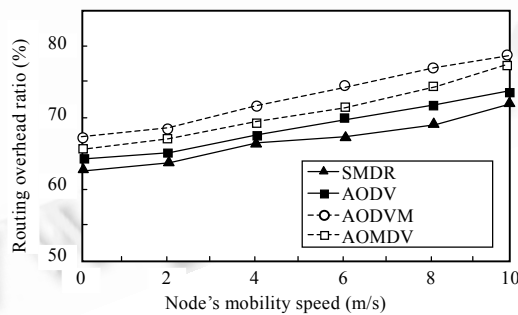


Fig.7 Comparison of routing overhead ratio vs. node's mobility speed

图 7 不同移动速度下的路由负载率比较

4 结论

该文描述了一种 Ad Hoc 网络中基于信息熵选择的稳定多路径路由算法(SMDR).提出了衡量路径稳定性

的新度量参数——路径熵的数学度量,并利用信息熵来选择稳定的路径,减少了路由重构的次数,从而在网络拓扑频繁变化的 Ad Hoc 网络环境中较好地提供 QoS 保证和数据传输率。仿真结果表明,SMDR 协议改进了分组传输率、端到端时延和路由负载率。SMDR 协议为动态的 Ad Hoc 网络多路径传输提供了一种新的有效途径。

总之,在未来的 Ad Hoc 网络多路径路由的研究中,我们将结合 Ad Hoc 网络 QoS 约束多路径路由、可信多路径路由以及节点的移动模型等问题进行深入研究,以提高 Ad Hoc 网络利用率。

References:

- [1] Sun BL, Pi SC, Gui C, Zeng Y, Yan B, Wang WX, Qin QQ. Multiple constraints QoS multicast routing optimization algorithm in MANET based on GA. *Progress in Natural Science*, 2008,18(3):331–336.
- [2] Sun BL, Li LY. A QoS based multicast routing protocol in ad Hoc networks. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(10):1402–1407 (in Chinese with English abstract).
- [3] Sun BL, Li LY. A distributed QoS multicast routing protocol in ad hoc networks. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2006,17(3):692–698.
- [4] Sun BL, Gui C, Qin QQ. A survey of QoS aware MAC protocols for Ad Hoc networks. *Journal of Computational Information Systems*, 2007,3(2):717–724.
- [5] Sun BL, Li LY. A QoS multicast routing optimization algorithms based on genetic algorithm. *Journal of Communications and Networks*, 2006,8(1):116–122.
- [6] Perkins CE, Royer EM. Ad hoc on-demand distance vector routing (AODV). IETF RFC 3561, 2003. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- [7] Johnson DJ, Maltz DA, Hu YC. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR). IETF RFC4728, 2007. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt>
- [8] Li X, Cuthbert L. Node-Disjointness based multipath routing for mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the ACM Int'l Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad-hoc, Sensor and Ubiquitous Networks (PE-WASUN 2004)*. ACM Press, 2004. 23–29.
- [9] Marina MK, Das SR. On-Demand multipath distance vector routing in ad hoc networks. In: *Proc. of the 9th Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP 2001)*. IEEE Press, 2001. 14–23.
- [10] Leung R, Liu JL, Poon E, Chan AC, Li B. MPDSR: A QoS aware multi-path dynamic source routing protocol for wireless ad hoc network. In: *Proc. of the 26th Annual IEEE Int'l Conf. on Local Computer Networks (LCN 2001)*. IEEE Press, 2001. 132–141.
- [11] Parissidis G, Lenders V, May M, Plattner B. Multi-Path routing protocols in wireless mobile ad hoc networks: A quantitative comparison. *Lecture Notes in Computer Science 4003*, 2006. 313–326.
- [12] Wang GJ, Mo QJ, Guo MY, Jia WJ. Designing piecewise QoS routing protocol in large-scale MANETs. In: *Proc. of the Japan-China Joint Workshop on Frontier of Computer Science and Technology (FCST 2007)*. IEEE Press, 2007. 1–6.
- [13] Jiang M, Jan R. An efficient multiple paths routing protocol for ad-hoc networks. In: *Proc. of the IEEE ICOIN 2001*. IEEE Press, 2001. 544–549.
- [14] Wang L, Shu Y, Dong M, Zhang L, Yang Q. Adaptive multipath source routing in ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE ICC 2001*. IEEE Press, 2001. 867–871.
- [15] Lee SJ, Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE ICC 2001*. IEEE Press, 2001. 3201–3205.
- [16] Guo XF, Chen YQ, Chen GH. An aggregated multipath routing scheme for ad hoc networks. *Journal of Software*, 2004, 15(4):594–603 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12/594.htm>
- [17] An HY, Lu XC, Peng W. A cluster-based multipath routing algorithm in mobile ad hoc networks. *Journal of Software*, 2007,18(4): 987–995 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/987.htm>
- [18] Shannon CE. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 1948,27(3):379–423.
- [19] An B, Papavassiliou S. An entropy-based model for supporting and evaluating route stability in mobile ad hoc wireless networks. *IEEE Communications Letters*, 2002,6(8):328–330.
- [20] Shen H, Shi BX, Zou L, Shi J, Zhou JX. A distributed entropy-based long-life QoS routing algorithm in Ad Hoc network. *Journal of Software*, 2005,16(3):445–452 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/445.htm>

- [21] Waxman BM. Routing of multipoint connections. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1988,6(9):1617-1622.
 [22] The Network Simulator—NS-2: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

附中文参考文献

- [2] 孙宝林,李腊元.Ad Hoc 网络 QoS 多播路由协议.计算机学报,2004,27(10):1402-1407.
 [16] 郭晓峰,陈跃泉,陈贵海.一种累计多路径的移动自组网络路由策略.软件学报,2004,15(4):594-603. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12/594.htm>
 [17] 安辉耀,卢锡城,彭伟.移动自组网中一种基于簇的多路径路由算法.软件学报,2007,18(4):987-995. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/987.htm>
 [20] 沈晖,石冰心,邹玲,石坚,周建新.Ad Hoc 网中基于熵的长寿分布式 QoS 路由算法.软件学报,2005,16(3):445-452. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/445.htm>



孙宝林(1963—),男,湖北鄂州人,博士,教授,主要研究领域为移动通信技术,通信协议分析及路由技术.



严冰(1978—),女,讲师,主要研究领域为无线 Ad Hoc 网络技术.



桂超(1965—),男,副教授,主要研究领域为无线网络技术及网络性能分析.



叶雪军(1976—),女,讲师,主要研究领域为高性能网络技术.



张棋飞(1977—),男,博士,讲师,主要研究领域为无线通信网络与网络优化技术.