

# 一种基于生存时间的 Ad hoc 网络不相交 多路径路由算法\*

黄敏, 刘琼, 奚建清  
(华南理工大学软件学院, 广州 510006)

**摘要:** 针对无线移动 Ad hoc 网络的节点具有移动性和能量限制等问题, 提出了一种根据网络动态拓扑结构和节点能量来进行多路由选择的混合式路由算法 PEMP-OLSR。该算法以改进的链路状态路由算法为基础, 通过在网络拓扑构造过程中引入链路和节点生存时间等参数来提高所选路径的稳定性, 同时通过设定影响链路和节点权重的迭代因子来提高多条路径的不相交性, 以提高此并行多路径算法的传输效率。通过大量仿真实验结果表明, 该算法能有效地提高所选择的多条路径的稳定性和不相交性。

**关键词:** 自组织网络; 多路径路由协议; 最优链路状态路由; 生存时间; 不相交

**中图分类号:** TP393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)03-1157-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.03.098

## Disjointed multi-path routing algorithm based on living time in Ad hoc networks

HUANG Min, LIU Qiong, XI Jian-qing

(School of Software Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** To solve the problem of the mobility and limited power of nodes in wireless mobile Ad hoc networks, this paper designed a mixed multi-path routing algorithm of PEMP-OLSR in the paper. Based on the energy model of nodes, PEMP-OLSR algorithm took the living time of nodes and linked as the selecting factors of routing, which was helpful to advance the stability of paths. At the same time, it used the iterative genes to increase the weights of links and nodes after each routing process, by which to find more disjointed paths and enhance the parallel transmitting efficiency of data. A lot of simulation experiments show that the PEMP-OLSR algorithm can find more multi disjointed paths with higher stabilities.

**Key words:** Ad hoc network; multi-path routing algorithm; OLSR (optimized link state routing); living time; disjointed

### 0 引言

随着无线 Ad hoc 网络的快速发展, 对其路由算法的研究也日益深入。由于 Ad hoc 网络中的任何节点都具有终端和路由两项功能, 在源节点与目标节点之间建立多条路径能更好地适应 Ad hoc 网络拓扑结构的动态变化性, 并实现均衡负载、缩短传输延迟、有效利用带宽、增强容错性和可靠性等, 因此近年来对于多路径路由算法的研究更为广泛<sup>[1~4]</sup>。

目前所提出的各种多路径路由协议中, 从链路使用的并行性角度考虑可分为备份多路径协议和并行多路径协议。前者指源端到目的端之间所获得的多条路径中, 在同一时刻仅有一条路径进行流量传输, 只有当该路径中断时, 才能使用其他路径, 如 AODV-BR 协议<sup>[5]</sup>; 后者指源端到目的端的多条路径中可同时使用两条及以上的路径来进行流量传输, 如 AOMDV 协议<sup>[6]</sup>。虽然备份型多路径协议因同一时刻只有一条路径上具有通信流量而不存在信号干扰等问题, 从而能获得较高的传输

质量, 但它没有发挥出多路径并发传送的诸多优点, 因此并行多路径协议在有效利用带宽、提高传输效率方面具有更大优势。由于无线网络存在节点的移动、天线模式、发射功率、干扰源以及能量等诸多影响因素, 使得无线网络的拓扑结构处于动态变化之中, 这就需要并行性多路径协议充分考虑这些因素来进行路径选择, 以提高所选择路径的稳定性。

近年来, 有很多学者对移动自组织网络中考虑网络拓扑变化和节点能量等问题的路由协议展开了研究, 如文献[7]提出了一种使用路径池的面向连接的路由算法 PPRP (path-pool routing protocol), 该算法通过源节点和目的节点间的路由请求、路由应答及路由确认过程实现路由发现, 并通过数据的确认流来进行路由维护和跟踪动态变化的网络拓扑。文献[8]对文献[7]进行了改进, 增加了节点的能量感知过程, 通过在路由选择过程中考虑路径剩余能量来提高路径的实用性。以上两种路由算法都是属于反应式算法, 主要通过源节点到目的节点所包含的两两节点之间的路由发现和路由维护过程来确

**收稿日期:** 2009-07-15; **修回日期:** 2009-09-09      **基金项目:** 2009 年广东省科技计划工业攻关项目(2009B010800015); 2008 年广东省科技计划社会发展项目(2008B080701019)

**作者简介:** 黄敏(1976-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为 Ad hoc 网络路由算法、移动 agent 和 Web 信息处理、知识管理技术等(minh@scut.edu.cn); 刘琼(1959-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为多媒体通信、网络建模与性能分析、移动通信及应用; 奚建清(1962-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为数据库技术、数据挖掘、软件协作技术等。

论路径,虽然没有周期性的路由信息广播,也不要求节点之间的链路是双向的,但其路由维护过程中对于失效的链路不能在本地进行修复,失效链路信息必须返回到源点。本文提出了一种基于 OLSR<sup>[9]</sup>的、同时引入链路和节点生存时间评估的混合式多路径算法 PEMP-OLSR。该算法在优化链路状态协议基础上引入链路状态和节点能量评估因素来寻找路由,同时通过迭代因子来获得多条不相交的、可并行化的稳定路径。

### 1 PEMP-OLSR 多路由算法的描述

PEMP-OLSR 多路由算法是一种混合式路由算法,与先应式路由算法类似,它通过周期性地发送用于链路感知的 HELLO 消息以及用于拓扑控制的 TC 消息使网络中的节点得到网络拓扑信息;但它又有不同的地方,即该算法不要求每一个节点总是维护一个到网络中其他所有节点的路由表并周期性地更新路由表,而是仅仅在有发送需求时才进行路由计算。

PEMP-OLSR 多路由算法的路由发现包括邻居发现、链路感知、链路状态信息构造、信息扩散以及路由计算等步骤。此过程可简单描述为:节点周期性地构造链路状态分组 LSP 并通过洪泛方式扩散给网络中其他节点。其中,LSP 包含了本节点的基本信息、通过 HELLO 消息获得的、包含节点生存时间的邻居节点基本信息,以及由 GPS 预测的与所有邻居节点相连的链路生存时间等信息。网络中的其他节点接收到该 LSP 后将其保存到本地的网络链路集 NLS (network link set) 中。当某个节点有传输需求时,通过本地 NLS 中所存储的所有网络节点的链路状态信息来构造整个网络的拓扑结构,并计算迭代因子,根据迭代因子的不同取值,运用基于稳定性迭代因子的、改进的多路径 Dijkstra 算法<sup>[10]</sup>获得到其他节点的多条路径,并将得到的多路径信息采用源路由方式保存在数据包的头部,在数据传递过程中一般不需要中间节点进行逐跳路由计算。由此既继承了链路状态算法的较小网络延时和稳定性等优点,又减少了链路状态分组的洪泛数量,同时降低了中间节点的路由计算开销。

### 2 PEMP-OLSR 多路由算法的相关数据结构

#### 2.1 HELLO 消息和拓扑控制 TC 信息

在相邻两个节点间进行传递的 HELLO 消息包中包含了包的长度、序列号、有效时间、生成节点、发送周期等基本信息域,还包括是否作为某邻居节点的 MRP 的标志、链路集、邻居节点集和 MPR 集等用于后续路由发现任务的信息;在网络中以洪泛方式发送的拓扑控制 TC 消息用于非相邻节点之间进行信息交换,它不仅包含发送该消息的节点信息,还包含该节点所有邻居节点的信息,并被该节点的 MRP 广播到整个网络。为满足网络对消息长度的限制,当节点邻居数量较多时,TC 消息可被分成多个包在一个更新间隔内发送完。

为跟踪和体现无线移动网络的拓扑变化以及节点和链路的可用度,本算法在这两个消息中增加了关于链路生存时间和考虑能量的节点生存时间。

将 Ad hoc 网络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,  $E$  是无线链路边的有限集合;  $(x_i,$

$y_i)$  是移动节点  $i$  在全网中的坐标,  $V_i$  和  $\theta_i$  分别为节点  $i$  在网络中的移动速度和移动方向;  $R_i$  为节点  $i$  的有效传播半径。链路和节点的生存时间可通过如下计算获得<sup>[7,11]</sup>:

a) 节点  $i$  和节点  $j$  之间的链路生存时间  $TL_{ij}$

$$TL_{ij} = \frac{-(ab + cd) + \sqrt{(a^2 + c^2)r^2 - (ad - bc)^2}}{a^2 + c^2}$$

$$a = v_i \cos \theta_i - v_j \cos \theta_j, b = x_i - x_j$$

$$c = v_i \sin \theta_i - v_j \sin \theta_j, d = y_i - y_j$$

$$r = R_i \tag{1}$$

b) 考虑能量的节点生存时间  $TN_i$

如果 Ad hoc 网络中的节点具有不同的发射功率且不具备功率调整能力,则节点  $i$  向任意处于其传播半径  $R_i$  之内的邻居节点  $j$  发射数据的功率都为  $e_i$ 。当节点  $i$  的剩余能量为  $E_i$  时,可求得其生存时间为  $TN_i$ ,其中  $f_{ij}$  为从节点  $i$  发送到节点  $j$  的数据流。

$$TN_i = E_i / (e_i \sum_{j \in N_i} f_{ij}) \tag{2}$$

#### 2.2 邻居集、链路集和拓扑集

通过相邻节点之间的 HELLO 消息传送,一个节点的邻居集中包含了该节点的所有一跳和两跳邻居节点的相关信息,如节点名称、地址等,邻居集在节点收到各邻居对其 HELLO 消息的回应时更新;链路集中包含了一个节点的所有链路情况,如链路连接的节点地址、链路存活期、链路的通信模式(单向或双向)等,它通过该节点与所有邻居节点周期性交换 HELLO 消息来获得。其中,单向链路是指该节点与某个邻居节点之间的通信处于非对称状态,即可以收到来自邻居节点的 HELLO 消息,但尚未确认邻居节点可以收到本节点的 HELLO 消息;而双向链路是指双方处于可以互相传送消息的对称状态;拓扑集保存了所有来自于除邻居节点以外的其他节点的 TC 消息,拓扑表中的每个条目记录了节点收到的每一条 TC 消息的序列号、接收时间、发送节点、到达发送节点的一跳邻居节点等信息,由此可获得整个网络的拓扑信息。

##### 2.2.1 基于选择性中继点 SR 的 LSP 洪泛优化

由于网络中的相邻节点通过 HELLO 消息的相互发送构建了邻居集和链路集,可以考虑在每个节点的 LSP 洪泛过程中减少对所有邻居节点的广播,只选择部分邻居节点作为选择性中继点 SR (selective relay) 来转发 LSP,从而减少 LSP 包的洪泛数量。作为节点  $i$  的 SR 节点的条件是:节点  $i$  的一跳对称(即链路是双向的,彼此可以互发信息)邻居节点;所有 SR 节点的前向一跳邻居节点集合能覆盖节点  $i$  的所有对称两跳邻居节点。这样,网络中的任意一个节点既有自己的 SR 集合,同时也可能成为其他节点的 SR,通过在节点内部维护一张 SR 集合表和一张 SR 被选者集合表来实现,前者记录转发自己的 LSP 的邻居节点,后者记录自己需要转发其 LSP 的邻居节点。如图 1 所示,以中心灰色节点为例,它选择第二层的黑色节点作为其 SR,由它们负责将其 LSP 转发给所有两跳及以上节点,而第二层中的白色节点不参与中心节点的 LSP 转发,由此可以有效减少 LSP 在同一区域内的重传数量,从而减少网络路由的开销。

#### 2.3 路由表

路由表是每个节点的核心数据,在有路由请求时通过下面

的多路径路由算法获得到目标节点的多条不相交并发路径,并以源路由方式将源节点到目标节点的路由信息以及路由有效期、时间标签等信息保存到路由表和数据包头部,中间节点在收到数据包时只需检查其头部的源路由信息便可进行转发。

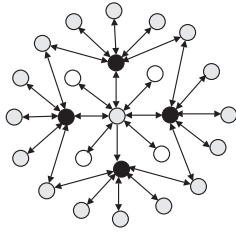


图1 基于SR的LSP转发过程

### 3 基于生存时间的多路径路由算法

针对以上网络节点移动情况和节点能源限制问题,在多路径计算过程中,将链路生存时间和节点生存时间等因素进行综合考虑,一方面要选择维持时间较长的路径和节点来减少路由的更新次数,以防止某条链路的失效或节点的能源耗尽影响整条路径的生存时间,同时减少多条并发路径的相交性以提高数据传输效率。下面介绍采用以链路和节点的生存时间为路径选择因素的单路径路由选择算法和增加迭代因子的多路径路由算法。

#### 3.1 基于链路和节点生存时间的单路径算法

该算法以某个具有传输需求的节点  $s$  为源节点,目的节点设为  $d$ ,通过该节点周期性获得关于网络拓扑和其他节点的相关信息,可以构造出一张包含全网节点的能量图  $G' = (V, E)$ ,该图在上文中有向图  $G$  的基础上对每个节点和每条链路增加了生存时间参数  $TN_i$  和  $TL_{ij}$ 。其中:  $TN_i$  表示任意节点  $i \in V$  的生存时间;  $TL_{ij}$  表示任意链路  $\langle i, j \rangle \in E$  的生存时间。本文采用基于节点和链路能量的、改进的 Dijkstra 算法来寻找从  $s$  到  $d$  的具有最高稳定性的路径。

算法基于传统的最短路径 Dijkstra 算法的思想,但在路径发现时不是考虑路径的长度,而是考虑路径所经过的节点和链路的生存时间。具体过程如下:

a) 初始化网络拓扑图和  $X, Y, Z$  三个集合。其中:  $X$  包括所有已经拓展的节点,初始时只包含源节点  $s$ ,每执行一步加入一个新节点,直到所有节点都加入  $X$  中;  $Y$  包括尚未拓展的节点,每执行一步移走一个节点,最后直到该集合为空;  $Z$  包含  $s$  到  $d$  所选择的最稳定链路,初始时为空,每执行一步增加新拓展的弧。

b) 从初始节点  $v$  出发,按照以下条件进行路径选择:

(a) 从  $v$  的所有输出链路中选择具有最大生存时间的弧;

(b) 如果从  $v$  出发存在多条具有相同最大生存时间的弧,则比较各条弧所对应的邻居节点的生存时间,选择具有最大生存时间的邻居节点的弧;

(c) 如果存在多条有相同链路生存时间和对应节点生存时间的弧,则从中任意选择一条。

按照以上方法进行拓展,每次将选择的弧及其对应的另一端节点分别加入  $Z$  和  $X$ ,直到图中所有节点都包含到  $X$  中,则到目的节点  $d$  的最稳定路径也包含在  $Y$  中了。

#### 3.2 基于迭代因子的多路径算法 MP-Dijkstra'

MP-Dijkstra' 算法是通过多次迭代使用 Dijkstra' 算法来寻找多条路径,在迭代的过程中,通过迭代因子调整路径所包含弧和节点的权重,从而得到多条稳定性依次递减的不同路径。

MP-Dijkstra' 算法的描述如下:

```

for ( i = 1; i <= m; i++ )
    PathTreei = Dijkstra' ( Gi, s );
    Pi = GetPath ( PathTreei, s, d );
    E = GetEdges ( Pi );
    V = GetVertex ( Pi );
    for  $\forall \langle i, j \rangle \in E$  do
         $TL_{ij} = (1 - \alpha) TL_{ij}$ ;
    end for
    for  $\forall i \in V$  do
         $TN_i = (1 - \beta) TN_i$ ;
    end for
end for
return ( P1, P2, P3, ..., Pm )

```

以上算法的主要思路为:

若在第  $i$  次迭代过程中得到  $s$  到  $d$  的稳定路径  $P_i$ ,则在  $i + 1$  次路径计算过程中通过减少路径  $P_i$  所包含弧的生存时间和所经过节点的生存时间来降低这些弧和节点在  $i + 1$  次路径寻找过程中的重用率,使得下次得到的路径  $P_{i+1}$  不同于  $P_i$ ,其中迭代因子  $\alpha$  和  $\beta$  分别是弧和节点的代价调整因子,取值范围均为  $[0, 1]$ 。在本文中的  $\alpha$  和  $\beta$  值分别设置为  $\alpha = \frac{TL_{max} - TL_{min}}{TL_{aver}}$

和  $\beta = \frac{TN_{s_i} - TN_{thrd}}{TN_{thrd}}$ 。此外,也可以根据多路径选择过程中对链路不相交路径和节点不相交多路径的不同倾向来调整  $\alpha$  和  $\beta$  的计算方法。如果增大  $\alpha$ ,则算法趋向于寻找链路不相交路径;而增大  $\beta$ ,则算法趋向于寻找节点不相交路径。

### 4 路由修复

PEMP-OLSR 多路由算法采用源路由方式进行数据传递,即通过路由算法获得的多条路径在初始传递时就保存在数据的头部,从而减少中间节点对路由的重新计算工作,这样不仅能提高数据传输的效率,也能发挥并行多路径算法的优势,但由于算法实现过程中 TC 消息的传播需要一定的延时,加上 Ad hoc 网络的动态变化特性,用于多路径计算的链路状态信息不一定与当前实际的网络状况相一致,可能存在某个链路或节点失效的情况,使得原来获得的某条路径在实际传输过程中不可用,这样就必须在算法中增加路由修复的功能。

该算法的路由修复通过在失效路径或节点附近进行路由的重新计算来实现,具体过程为:在每个节点接收到一个数据包并与其头部获得传输路径信息时,会检查路径中的下一跳节点及对应链路是否在该节点当前的邻居集和链路集中,如果下一跳节点是其邻居节点且链路有效,则按此链路转发数据;否则,说明下一跳节点或对应链路已经不可用,则由该节点以自身为源节点,重新计算到目标节点的路径,并通过新的路径转发数据包。由于存储在该节点内的邻居集和链路集等信息是通过 HELLO 消息在本地实时获得,这些信息比起源节点通过 TC 消息获得的整个网络状况信息要更能反映最新的本地链路情况。通过在算法中增加路由修复过程,能更有效地提高路径

的可靠性和数据包传输的成功率。

### 5 仿真结果

本文对 PEMP-OLSR 多路由算法进行了两个方面的仿真实验。

**实验 1** 采用 Network Simulator version2 (NS2)<sup>[12]</sup> 模拟了一个范围为 1 000 m × 1 000 m、具有 100 个主机的网络,将 PEMP-OLSR 协议和传统的 OLSR 协议从数据包发送成功率和路由负载两个方面进行了比较。在模拟运行前:a)对协议的代理节点进行了设置,包括无线传播模型、信道、链路层协议、网络延迟、带宽、网络节点数等网络基本参数;b)设置包括节点移动场景和网络传输场景的网络模拟,前者定义了节点位置、移动方向和移动速度,并将文中上述基于能量的节点生存时间模型代入到节点设置中,而后者定义数据包的大小、发送速率、持续时间等。仿真试验的结果分别如图 2 和 3 所示。

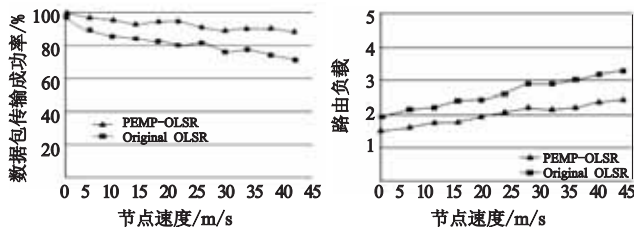


图2 PEMP-OLSR和Original OLSR协议的数据

图3 PEMP-OLSR和Original OLSR协议的路由负载比较

图 2 显示的是在有 50 个 CBR 数据源时,数据包传输率随节点移动速度变化的趋势图。从图 2 中可知,由于在路径选择中增加了对节点能量的考虑,所选择的路径和节点具有更高的传输能力和稳定性,从而使得 PEMP-OLSR 协议比传统 OLSR 协议的数据包传输成功率高出 10% ~ 20% 左右。从图 3 所显示的路由负载比较曲线图可以看出,由于 PEMP-OLSR 协议应用了基于迭代因子的多路径路由算法,降低了路径在不稳定节点或链路上的相交度,从而减少了由于路由失败而频繁进行的路由发现和路由修复过程,因此,路由控制包的减少对于路由负载有很好的减轻作用,PEMP-OLSR 协议比传统 OLSR 协议路由负载要低。

**实验 2** 仿真实验的内容是对 PEMP-OLSR 协议进行路径重合的测试,在上述模拟网络环境下,对所求的多路径条数分别为 4、8、10、12、15 时的协议进行测试,路由选择结果如表 1 所示。其中,每个路径数量下进行了 30 次测试,以求得更为平均的算法效率。

表 1 多路径仿真结果

多路径数量/条	平均路径长度/跳	平均路径生存时间/ms	平均相交节点/个	平均相交链路/条	平均路径修复/次
4	9	100	0	0	1
8	12	80	1	1	1
10	14	70	2	1	2
12	15	50	2	2	2
15	17	30	3	2	3

从表 1 可以看出,随着所求并行路径数量的增加,路径的平均长度、相交节点和链路条数也会有所增加,说明该算法不能完全避免求得的多条路径在某些节点和链路上的重合,但重合节点和链路的数量随着路径条数而增加的速度并不快。另外,路径修复次数较少,说明该算法在路径选择过程中考虑了

节点和链路的生存时间,能减少对即将失效路径和节点的选择,从而减少重新计算路由的次数,有效地增强了所选路径的稳定性。同时,根据木桶原理——一个由若干木板拼成的木桶容量是由最短一条木板决定的,因此从 s 到 d 的一条完整路径的生存时间应为该路径所有链路生存时间之中的最短时间。实验结果显示,源节点和目标节点之间的平均路径生存时间会随着所求路径条数的增加而减少,这说明虽然求得的路径条数越多,源节点到目标节点之间有效路径的整体生存时间就越短,但如果这些路径都能并行使用,则这种多路径并行带来的传输优势就会体现得更明显。

### 6 结束语

本文提出了一种基于链路和节点生存时间的混合式不交叉 Ad hoc 多路径路由算法,该算法以改进的链路状态算法为基础,为提高所选路径的稳定性,在网络拓扑构造和路径选择过程中引入链路和节点的生存时间作为参数,并采用源路由方式减少中间节点的路由计算开销,同时通过迭代因子来提高多条路径的不相交性。通过大量仿真实验表明,该算法能有效提高所选路径的稳定性和节点及链路的不相交程度,从而提高算法的并行传输能力。对算法所选择的路径质量和性能的进一步分析将是本文下一步的工作。

#### 参考文献:

- [1] 安辉耀,卢锡城. 移动自主网络多路径路由技术研究进展[J], 计算机工程与科学,2006, 28(2): 4-9.
- [2] LEUNG R, LIU J, POON E, et al. MP-DSR: a QoS-aware multipath dynamic source routing protocol for wireless Ad hoc networks [C]// Proc of the 26th IEEE Annual Conference on Local Computer Networks. Minnesota: IEEE Computer Society, 2001: 132-141.
- [3] AN Hui-rao, LU Xi-cheng, PENG Wei. A cluster-based multipath routing for MANET [C]// Proc of IEEE International Conference on Networking and Communications. 2005: 369-376.
- [4] MARINA M K, DAS S R. On-demand multipath distance vector routing in Ad hoc networks [C]// Proc of IEEE International Conference for Network Protocols. Washington DC: IEEE Computer Society, 2001: 14-23.
- [5] LEE S J, GERLA M. AODV-BR: backup routing in Ad hoc network [C]// Proc of IEEE WCNC. 2000: 1311-1316.
- [6] MARINA M K, DAS S R. On-demand multipath distance vector routing in Ad hoc networks [C]// Proc of the Int'l Conference on Network Protocols (ICNP). Washington DC: IEEE Computer Society, 2001: 14-23.
- [7] 陈晋伦,周正,吕国英. 一种适用于非对称链路的 Ad hoc 网络路由协议[J]. 电路与系统学报,2004, 9(6): 76-80.
- [8] 陈晋伦,蒋挺,周正. 一种具有能量感知的多路径 Ad hoc 路由算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(7): 1298-1302.
- [9] JACQUET P, MUHLETHALER P, CLAUSEN T, et al. Optimized link state routing protocol for Ad hoc networks [C]// Proc of the 5th IEEE Multi Topic Conference (INMIC). 2001: 439-456.
- [10] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connection with graphs [J]. Numerical Mathematic, 1959, 1: 269-271.
- [11] LEE S J, SU W. Ad hoc wireless multicast with mobility prediction [C]// Proc for IEEE ICCCN. 1999: 4-9.
- [12] 柯志亨,邓德隽. NS2 仿真实验 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.