

# Ad hoc 网络基于平面区域划分的多径路由协议\*

董萍, 钱焕延, 魏晓飞, 兰少华

(南京理工大学 计算机科学与工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 相对于传统的单径路由, 多径路由在实现负载均衡、提高路由可靠性和容错性方面具有很强的优势, 但是目前的大多数多径路由协议是在单径路由(如 DSR 和 AODV)的基础上进行扩展的, 在大规模网络环境下容易造成广播风暴的问题。提出了一种快速建立最大限度不相交多径的路由协议, 充分利用节点的地理位置信息, 结合区域内转发模式和边线转发模式在曲线划分的不相交区域内寻找路径并完成数据转发。仿真实验结果表明, 该路由协议使用了较小的控制开销, 找到了尽可能不相交的多条路径, 可以更好地均衡网络的负载, 提高数据包的投递率。

**关键词:** 移动自组织网络; 地理路由; 平面区域划分; 节点不相交; 多径

**中图分类号:** TP393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2014)05-1554-04

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.066

## Zoning-based multipath geographic routing protocol for Ad hoc networks

DONG Ping, QIAN Huan-yan, WEI Xiao-fei, LAN Shao-hua

(School of Computer Science & Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Compared with single path routing protocols, multipath routing protocols have many advantages in loading balancing, improving reliability and fault tolerance. A lot of multipath routing protocols are designed by expanding single path routing protocols, just like DSR or AODV. However, these protocols are not suitable for the network of large scale and high density as too many control messages will lead to the broadcast storm problem. This paper presented a novel multipath routing protocol called ZMG (zoning-based multipath geographic routing protocol) to construct maximally node-disjoint multipath. In the proposed scheme, each node got his location information from GPS, discovered multiple paths and forwarded data packets by combining interior region forwarding mode and boundary forwarding mode. Simulation results show that ZMG not only has less control messages, but also can find maximally node-disjoint paths, which increases the packet delivery ratio.

**Key words:** mobile Ad hoc network; geographic routing; zoning; node-disjoint; multipath

## 0 引言

移动 Ad hoc 网络(MANET)是不依赖于任何固定基础设施的移动节点的动态联合体。由于具有无须基础设施支持、高动态性、无线通信以及多跳传输的高覆盖性等优点, MANET 在军事应用、灾难援助等领域具有广泛的应用前景。然而, MANET 本身具有的高动态性、多跳传输、能量有限性等特点使得保障可靠的数据传输成为一个关键而棘手的问题。

相对于传统的单径路由, 多径路由<sup>[1,2]</sup>在实现负载均衡、提高路由可靠性和容错性方面具有很强的优势, 是 MANET 网络可靠运行的有效保证。多径路由能够减少路由发现次数, 降低传统的差错控制开销与端到端延时, 提高网络实时性, 能够适应无线网络中节点易失效的特点, 从而较好地利用网络拓扑信息。早期提出的经典多径路由一般是在单径路由(如 DSR 和 AODV)的基础上进行扩展<sup>[2]</sup>, 如分离多径路由(split multipath routing, SMR)、备份多径路由(backup routing in Ad hoc network, AODV-BR)、按需多径距离矢量路由(Ad hoc on-demand multipath distance vector, AOMDV)等。而目前大多数协

议仍是在这些协议的基础上进行优化与改进<sup>[3-7]</sup>。无论是表驱动还是按需路由协议, 都需要有路由发现和路由维护的开销, 这些协议应用于大规模的网络环境下都会存在广播风暴的问题。

基于地理位置的多径路由算法仅需维护一跳之内邻居节点的地理位置信息, 具有更低的路由负载, 同时还具有简单性和可扩展性等优点<sup>[8]</sup>。于是地理多径路由协议则成为大规模网络环境下提供可靠实时的数据传输的最优选择。BGR(biased geographical routing)协议<sup>[9]</sup>利用地理位置信息构造多条路径, 使数据包沿弯曲的轨道转发, 并在数据包头部添加字段“bias”, 用于存储节点转发的偏移角度。中间节点逐渐减小角度 bias, 使路径不断靠近目的节点, 当 bias 减小到零之后就不再减小, 此时等同于贪婪转发。BGR 协议构造的多径是重叠的, 而且路径重叠程度随着路径条数的增大而增大。M-Zone(multiple zone-based routing protocol)协议<sup>[10]</sup>则结合了主动式路由协议和地理路由协议。该协议可以构造出节点不相交多径, 但网络中每个节点都需维护一个  $k$  跳邻域的路由表, 故其路由控制开销较大, 而且该协议没有考虑节点稀疏的网络环境下找不到路径的情况。

**收稿日期:** 2013-06-15; **修回日期:** 2013-07-24      **基金项目:** 国防科工委应用基础资金资助项目; 江苏省科技支撑计划(工业部分)资助项目(BE2010199, BE2011342)

**作者简介:** 董萍(1986-), 女, 河南郑州人, 博士, 主要研究方向为移动自组织网络、通信安全等(dongping327@gmail.com); 钱焕延(1950-), 男, 江苏泰州人, 教授, 博导, 主要研究方向为计算机网络应用、IPv6 技术等。

本文提出一种基于平面区域划分的多径路由协议 ZMG, 以快速建立最大限度的节点不相交多径。将网络中的所有节点视为位于同一平面区域上, 利用 GPS 等设备获取节点的地理位置信息, 将该平面划分成不相交的区域, 然后分别在各自区域中寻找一条路径。若在指定区域找不到下一跳节点, 就转发给相邻区域的节点, 并在继续转发的过程中尽快地绕回指定区域。本方法保证在节点密集的情况下可以构造出节点不相交多径; 在节点稀疏的情况下也能找到相交路径条数尽可能少、相交节点个数尽可能少的多条路径。

### 1 协议描述

ZMG 协议利用地理位置信息, 分布式地由每个转发节点选择下一跳。源节点首先计算自身与目的节点之间的距离, 将网络中所有节点所在的平面通过椭圆曲线划分成不相交的区域, 根据需要的路径条数确定区域的个数以及相应的曲线条数, 并计算各个曲线方程的系数。然后, 源节点将自身与目的节点的地理位置信息, 以及曲线方程系数写入数据包头部, 并在数据包头部添加访问路径字段, 根据路由转发策略向下一跳节点转发。转发节点收到数据包后, 从包头部取出源节点与目的节点的地理位置信息, 以及曲线方程系数, 判断自身所在区域, 并根据路由转发策略继续转发。后续转发节点按照上述方法继续转发, 直至数据包到达目的节点。

#### 1.1 平面区域的划分方法

采用椭圆曲线进行区域划分, 以源节点作为原点, 以源节点到目的节点的有向直线作为  $x$  轴建立直角坐标系, 用此坐标系的坐标表示网络中节点的地理位置。通过目的节点作一条垂直  $x$  轴的直线, 把  $y$  轴到这条垂线之间的带状区域  $M$  划分为子区域  $M_i$ , 路径条数为偶数和奇数的情况下平面区域的划分方法分别如图 1 和 2 所示。

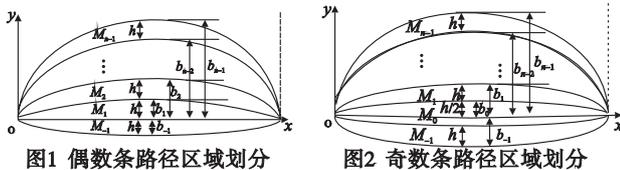


图1 偶数条路径区域划分

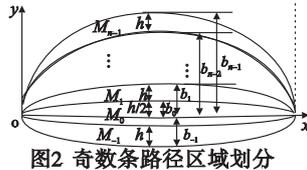


图2 奇数条路径区域划分

网络中节点分布相对均匀时, 本协议设计划分出来的每块子区域面积  $S_i$  相等, 从而使每块子区域中分布的节点个数相差不多, 以保证每块子区域都能找到路径。

假设需要构造  $k$  条路径, 若  $k$  为偶数, 则需要  $\lfloor k/2 \rfloor$  条椭圆曲线和一条直线, 分别为  $\frac{(x-a_i)^2}{a_i^2} + \frac{y^2}{b_i^2} = 1 (i=1, 2, \dots, n-1)$  和  $y=0$ 。由于第四象限与第一象限轴对称, 这里只讨论第一象限的情况。因为  $S_i = \pi \times a_i \times (b_i - b_{i-1})/2$  且  $a_i = d/2$ , 为了使得  $S_1 = S_2 = \dots = S_{n-1}$ , 可以得出  $b_1 = b_2 - b_1 = \dots = b_{n-1} - b_{n-2}$ , 令其等于一个变量  $h$ , 即  $b_i = i \times h$ 。

若  $k$  为奇数, 需要  $n = \lfloor k/2 \rfloor + 1$  条椭圆曲线, 分别为  $\frac{(x-a_i)^2}{a_i^2} + \frac{y^2}{b_i^2} = 1 (i=0, 1, 2, \dots, n-1)$  且  $a_i = d/2$ 。其中, 区域  $M_0$  为椭圆曲线  $\frac{(x-a_0)^2}{a_0^2} + \frac{y^2}{b_0^2} = 1$  的内部区域, 区域  $M_i (1 \leq i \leq n-1)$  为第  $i-1$  条曲线和第  $i$  条曲线之间的区域。此时,  $b_i = h/2 + i \times h$ 。

$h$  与源节点到目的节点之间的距离  $d$  和路径条数  $k$  的关

系设为  $h = C \times k/d$ , 其中  $C$  为常数, 用来调整  $h$  值以选择合适的区域大小,  $C$  的取值直接决定了划分区域的面积大小。本文将在第 2 章详细讨论  $C$  值和路径条数对协议的影响。

#### 1.2 节点所属区域的判断方法

这里判断节点是否属于指定区域内与路径条数  $k$  有关, 当  $k$  为奇数时, 满足公式为

$$M_0: \frac{(x-a_0)^2}{a_0^2} + \frac{y^2}{b_0^2} < 1 \quad (1)$$

$$M_i: \begin{cases} y > 0 \\ \frac{(x-a_{i-1})^2}{a_{i-1}^2} + \frac{y^2}{b_{i-1}^2} \geq 1 \\ \frac{(x-a_i)^2}{a_i^2} + \frac{y^2}{b_i^2} < 1 \end{cases}, M_{-i}: \begin{cases} y < 0 \\ \frac{(x-a_{i-1})^2}{a_{i-1}^2} + \frac{y^2}{b_{i-1}^2} \geq 1 \\ \frac{(x-a_i)^2}{a_i^2} + \frac{y^2}{b_i^2} < 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $M_i$  为划分区域在第一象限,  $M_{-i}$  为划分区域在第四象限。当  $k$  为偶数时, 满足公式为

$$M_1: \begin{cases} y \geq 0 \\ \frac{(x-a_1)^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{b_1^2} < 1 \end{cases}, M_{-1}: \begin{cases} y < 0 \\ \frac{(x-a_1)^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{b_1^2} < 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$M_i: \begin{cases} y > 0 \\ \frac{(x-a_{i-1})^2}{a_{i-1}^2} + \frac{y^2}{b_{i-1}^2} \geq 1 \\ \frac{(x-a_i)^2}{a_i^2} + \frac{y^2}{b_i^2} < 1 \end{cases}, M_{-i}: \begin{cases} y < 0 \\ \frac{(x-a_{i-1})^2}{a_{i-1}^2} + \frac{y^2}{b_{i-1}^2} \geq 1 \\ \frac{(x-a_i)^2}{a_i^2} + \frac{y^2}{b_i^2} < 1 \end{cases} \quad (4)$$

节点通过 GPS 设备获得的地理位置是经纬度坐标系中的坐标, 而曲线的坐标系是以源节点作为原点, 以源节点到目的节点的有向直线作为  $x$  轴的直角坐标系。本文将所有节点视为位于同一平面, 故可以将经纬度坐标系看做直角坐标系, 只需进行相应的坐标变换即可。

节点收到数据包后, 从数据包头部中取出源节点坐标、目的节点坐标和指定区域(从数据包头部取出的曲线系数对所决定的曲线围成的区域)两条边界曲线的系数, 计算节点经过坐标变换之后的曲线坐标  $(x', y')$ 。将曲线坐标  $(x', y')$  代入式(1)(2)计算出路径条数  $k$  为奇数时节点是否属于指定区域, 其中  $1 \leq i \leq n-1$ ; 代入式(3)(4)计算出路径条数  $k$  为偶数时节点是否属于指定区域, 其中  $2 \leq i \leq n-1$ 。若不等式方程组成立, 说明节点在指定区域内, 否则说明节点在指定区域外。

#### 1.3 路由转发策略

路由转发策略采用结合区域内转发模式和边线转发模式来实现。接收到数据包的节点判断自身是否落在指定区域内, 若是, 则按照区域内转发模式转发数据, 否则按照边线转发模式转发数据。本协议在数据包头部添加访问路径字段, 用来存储局部的访问路径, 以防止环路的产生, 并辅助判断所属的转发模式。

与经典 GPSR (greedy perimeter stateless routing) 协议中提到的转发策略不同, 本文采用弱化贪婪转发策略, 即转发策略为转发节点每次选择的下一跳节点不一定是比当前节点更靠近目的节点的节点, 只要是邻居节点集合中最靠近目的节点的节点即可。当前节点若能找到比自身更靠近目的节点的邻居节点, 则处于正常情况, 此时先将访问路径字段清空, 再将自身写入其中, 然后选择最靠近目的节点的邻居节点转发数据。若所有邻居节点都比当前节点更远离目的节点, 则处于局部最优<sup>[6]</sup>的情况, 称当前节点为局部最优节点。发生局部最优情况之后, 后续节点选择下一跳节点时都要先判断下一跳节点与

局部最优节点的位置。若下一跳节点更靠近目的节点,说明可以跳出局部最优的情况,则先将访问路径字段清空,再将自身写入其中;否则直接将自身添加到访问路径字段中。访问路径字段从出现局部最优的情况开始保存后续节点信息,直至跳出局部最优情形;而正常情况下只保存上一跳节点信息。弱化贪婪转发策略选择下一跳节点时不会选择访问路径中的节点,故可以防止环路的产生,在遇到局部最优的情况时,也可以有效地绕过空洞区域。

### 1) 区域内转发模式

当前节点在区域内寻找比自身更靠近目的节点的邻居节点,若找到则正常转发,否则按照弱化贪婪转发策略寻找邻居节点集中最靠近目的节点的节点,此节点有可能在区域内,也有可能在外。若在指定区域内则按照区域内转发模式继续转发,若在区域外则切换到边线转发模式。

### 2) 边线转发模式

发送区域靠近  $x$  轴的曲线即是该区域的边线。节点收到数据包以后,先在指定区域内且比访问路径字段中的第一个节点更靠近目的节点的区域寻找,若有节点则先将访问路径字段清空,再将自身写入其中,选择最靠近目的节点的节点进行转发,然后切换到区域内转发模式;若没有节点则在指定区域外且更靠近目的节点的范围内选择最靠近指定区域边线的节点,使得数据转发能够尽快地回到原先的指定区域,此时直接将自身添加到访问路径字段中。若还是没有找到节点,就在指定区域外按照弱化贪婪转发策略选择最靠近目的节点的节点作为下一跳,此时也要将自身添加到访问路径字段中。边线转发模式下“优先考虑能够回到指定区域的节点作为下一跳”的目的是尽量避免路径相交,或在出现相交时尽快脱离相交。

## 2 仿真实验

### 2.1 参数对协议性能的影响

为模拟不同节点密度下的协议性能,仿真场景选择一个  $4000\text{ m} \times 4000\text{ m}$  的正方形区域,节点随机分布,通信半径为  $250\text{ m}$ ,节点个数  $1000 \sim 3000$ 。评价 ZMG 协议性能的参数包括启动边线转发的次数、节点相交次数和平均路径长度。其中 ZMG 协议在区域内转发时,当发送节点除了上游节点没有落在指定区域的邻居节点时,需要从隔壁区域绕行,进入边线转发模式,边线转发很有可能导致路径相交。

#### 2.1.1 边线转发次数与节点相交次数的关系

实验中  $C$  值与路径条数的取值对协议性能有很大影响,以  $C$  取  $0.8$ ,路径条数取  $6$  条为例,启动边线转发次数和节点相交次数的关系如图 3 所示。由图 3 可见,随着节点密度的增加,启动边线转发的次数和节点相交次数均逐渐减少。这是因为当节点密度相对较小时,数据转发经常会碰到指定区域内无法找到下一跳转发节点的情况,所以需要频繁地启动边线转发。在相同的节点密度下,节点相交次数明显小于启动边线转发次数,这是因为边线转发的思想是选择最靠近指定区域边线的节点作为下一跳。由此可以看出,本协议设计的边线转发策略可以有效地减小多条路径之间节点相交的概率。

#### 2.1.2 参数 $C$ 值对协议性能的影响

路径条数为  $6$  时, $C$  值与节点密度对平均路径长度的影响如图 4 所示。由 2.1 节可知,常数  $C$  与划分区域的椭圆曲线的短轴成正比, $C$  值越小椭圆越扁。由图 4 可见,在相同节点密

度下, $C$  值越大平均路径长度越长。在相同  $C$  值的情况下,节点密度越大平均路径长度越短。这是因为节点密度较小时,可能在指定区域找不到下一跳,需要频繁地进行区域内转发模式和边线转发模式之间的切换,路径长度随之增加。节点密度较大时,在指定区域能够找到且可以选择最靠近目的节点的节点作为下一跳,总的路径跳数较少。

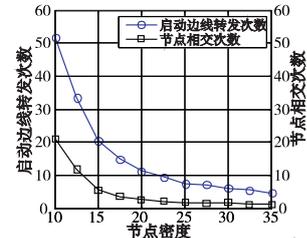


图3 边线转发次数vs节点相交次数

路径条数为  $6$  时, $C$  值与节点密度对节点相交次数的影响如图 5 所示。仿真结果表明, $C$  值的取值对节点相交次数有着重要的影响,针对不同的节点密度,总有一个最优的  $C$  值使得节点相交次数最少。这主要是因为  $C$  值越大  $h$  值越大,在靠近源节点和目的节点的区域,外层的转发区域会随着  $h$  值的增大而变小,这样容易导致无法在指定区域内找到下一跳转发节点而频繁启动边线转发,这就大大增加了发生节点相交的概率。由图 5 可见,最优的  $C$  值随着节点密度的减小而增大,这主要是因为当网络节点密度变小时,需要增大转发区域的面积来增加转发区域内的节点数,以减小节点相交的概率。

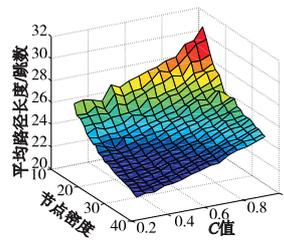


图4  $C$ 值与节点密度对平均路径长度的影响

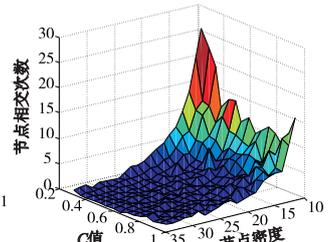


图5  $C$ 值与节点密度对节点相交次数的影响

#### 2.1.3 最优 $C$ 值

为了得到节点密度与最优  $C$  值之间的关系,本文在不同节点密度的网络中针对不同的  $C$  值进行仿真实验,得到对应环境下的节点相交次数,并对这些数据进行二次多项式拟合,二次曲线的最低点对应的即是最佳  $C$  值。如图 6 所示,对于不同的路径条数,随着网络节点密度的增大,最佳  $C$  值都是不断变小。相同节点密度下,路径条数越多,最佳  $C$  值越小。

### 2.2 协议性能对比

本节对 ZMG、BGR 和 M-Zone 协议性能进行了对比实验。评价指标为节点相交次数、平均路径长度、数据包投递率和归一化控制开销。实验中 ZMG 协议的  $C$  取值为图 6 所示的最佳  $C$  值;BGR 协议不同路径条数下使用不同的偏移角度  $bias$ ;M-Zone 节点维护  $3$  跳邻域, $d$  值取  $500$ 。ZMG 协议和 BGR 协议分别比较了路径条数为  $4, 5, 6$  时的数据,由于路径条数太多时,M-Zone 协议会出现较多找不到路径的情况,这里 M-Zone 协议只取路径条数为  $4$  时的数据,节点只维护了  $3$  跳邻域的信息。因为要保证能够找到路径,特别是节点稀疏的网络下,只能增大  $k$  跳邻域信息。但是会增加过多的控制开销。

仿真工具使用 OMNeT++,仿真场景仍然选择一个  $4000\text{ m} \times 4000\text{ m}$  的正方形区域,通信半径为  $250\text{ m}$ ,节点移动遵循

Random Waypoint 模型,移动速度为 5m/s。源节点一共发送 100 个数据包,数据包大小为 512 Byte,传输速率为每秒发送一个包,仿真时间持续 300 s。数据转发采用多条路径并行转发的方式。信标更新周期设置为 2 s。

在不同节点密度的网络中,三种协议的节点相交次数如图 7 所示,ZMG 和 BGR 协议随着网络节点密度的增加,节点相交次数都呈现下降的趋势。相同节点密度下,ZMG 和 BGR 协议的节点相交次数与路径条数成正比。ZMG 协议的节点相交次数明显小于 BGR 协议,这是因为当 BGR 协议的偏移角度减小到零之后,数据包将以贪婪转发的形式发往目的节点,这样多条路径就会发生重叠,导致节点相交的次数很大。M-Zone 协议则可以在路由发现的过程中实现多条路径中的节点不相交。

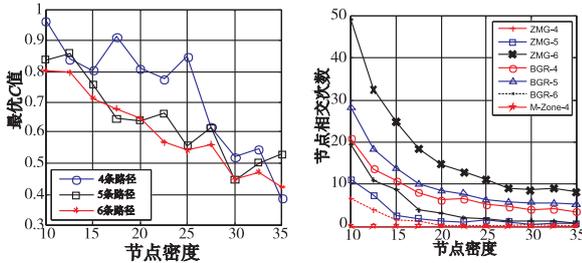


图6 节点密度与最优C值的关系 图7 节点相交次数的对比

在不同节点密度的网络中,三种协议的平均路径长度如图 8 所示,三种协议的平均路径长度都随着网络密度的增加而减小。相同节点密度下,随着路径条数的增加,BGR 协议平均路径长度变短,而 ZMG 协议平均路径长度变长,总体来看,ZMG 协议的平均路径长度都比 BGR 协议要短。这主要是因为 BGR 协议的平均路径长度与初始的偏移角度 bias 有关,bias 越大,路径的弯曲程度越大,路径越长。M-Zone 协议在节点密度较小时,平均路径长度最短,但是在节点密度较大时,性能不如 ZMG 协议。这是因为 ZMG 协议根据不同节点密度选取最优的 C 值,而 M-Zone 协议的 d 值固定不变。在节点稠密的网络中,ZMG 协议能够选取更优的划分方法,取得更优的协议性能。

路径条数为 4 时,在不同节点密度的网络中三种协议的数据包投递率如图 9 所示,随着节点密度的增加,三种协议的数据包投递率都有所增高。这是因为高密度的网络下找到的多条路径相交个数更少,一条路径由于节点移动或节点失效导致的中断,不会影响其他路径正常的数据传输。如果路径过多相交,那么一旦公用节点失效,多条链路都不能正常工作,丢包率随之增高。BGR 协议在节点密度较低的环境下构造的多条路径有较多相交,且路径较长也会增加路径失效的概率,故数据包投递率相比其他两个协议较低。

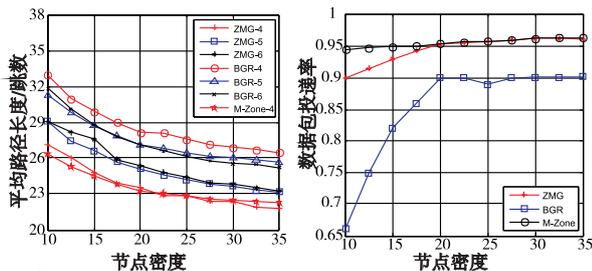


图8 平均路径长度的对比 图9 数据包投递率的对比

在不同节点密度的网络中,三种协议的归一化控制开销如图 10 所示。控制开销与路径条数没有关系,与网络中节点个数以及地理位置信息的更新频率有关。ZMG 协议和 BGR 协议只需维护一跳之内的节点地理位置信息,控制开销较小;而

M-Zone 协议有路由发现与路由维护的过程,且节点需要维护 k 跳邻域的信息,控制开销相对较大。

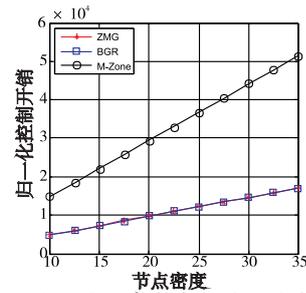


图10 归一化控制开销的对比

### 3 结束语

本文提出了一种快速构造最大限度不相交多径的路由算法。该算法充分利用节点地理位置信息,在划分的不相交区域内构造多条路径,既考虑了节点的不相交性,又避免了简单泛洪带来的路由发现开销,提高了路由寻找的效率。若在指定区域内找不到节点,就从隔壁区域绕行,保证在节点稀疏的情况下也能成功找到路径。启用边线转发模式可以使数据转发尽快地回到原先的指定区域,尽量避免路径相交,或在出现相交时尽快脱离相交。通过大量的仿真实验得出了不同节点密度与路径条数下的协议性能分析,并得出了不同网络环境下协议参数的最优取值。实验结果证明,ZMG 协议使用了较小的控制开销,找到了尽可能不相交的多条路径,可以更好地均衡网络负载,提高数据包的投递率。对于节点移动性对协议性能的影响有待进一步探讨和研究。

### 参考文献:

- [1] TARIQUEA M, TEPEB K E, ADIBIC S, et al. Survey of multipath routing protocols for mobile Ad hoc networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2009, 32(6): 1125-1143.
- [2] RADI M, DEZFOULI B, BAKAR K. A, et al. Multipath routing in wireless sensor networks: survey and research challenges[J]. *Sensors*, 2012, 12(1): 650-685.
- [3] 王丽, 张素伟, 李占胜, 等. 一种基于分治策略的多路径 Ad hoc 路由协议[J]. *计算机研究与发展*, 2008, 45(1): 55-62.
- [4] 杨文静, 杨新宇, 董翅勇. 移动 Ad hoc 网络中提高路由稳定性的动态备份多径路由[J]. *西安交通大学学报:自然科学版*, 2010, 44(12): 16-21.
- [5] 肖克江, 熊忠阳, 张玉芳. 多径路由协议 AODMV 的改进与性能分析[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(6): 99-101, 113.
- [6] DING Shun-li, LIU Li-ping. A node-disjoint multipath routing protocol based on AODV[C]//Proc of the 9th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business Engineering and Science. 2010:312-316.
- [7] LEE Y O, NARASIMHA A L. Constructing disjoint paths for failure recovery and multipath routing[J]. *Computer Networks*, 2012, 56(2): 719-730.
- [8] CADGER F, CURRAN K, SANTOS J, et al. A survey of geographical routing in wireless Ad hoc networks[J]. *Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(2): 621-653.
- [9] GE Yun, WANG Guo-jun, JIA Wei-jia, et al. Node-disjoint multipath routing with zoning method in MANETs[C]// Proc of the 10th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications. 2008:452-460.
- [10] POPA L, RAICIU C, STOICA I, et al. Reducing congestion effects in wireless networks by multipath routing [C]// Proc of the 14th IEEE International Conference on Network Protocols. 2006:96-104.