

# WSN节点定位中移动信标路径规划的研究

党小超<sup>1</sup> 李小艳<sup>2</sup>

(西北师范大学网络教育学院 兰州 730070)<sup>1</sup> (西北师范大学数学与信息科学学院 兰州 730070)<sup>2</sup>

**摘要** 在无线传感器网络的节点定位技术中,通过移动锚节点定位是比较实用的定位方法,移动锚节点定位需要考虑移动路径问题,路径规划合理有效,可以获得较高的定位精度。若将传感器节点看作图的顶点,利用解决TSP的思想结合蚁群算法来寻找一条最佳路径,通过理论分析及仿真实验可知,该方法形成的路径可以很好地覆盖整个网络,很好地适应无线传感器网络节点随机分布时的节点定位。

**关键词** 无线传感器网络,节点定位,移动锚节点,路径规划,蚁群算法

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

## Research of Path Planning with Mobile Anchor in WSN Localization

DANG Xiao-chao<sup>1</sup> LI Xiao-yan<sup>2</sup>

(College of Network Education, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)<sup>1</sup>

(College of Mathematics & Information Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The mobile anchor localization is more practical method in wireless sensor network node localization, it need to consider the problem about moving path, if plan the effective and reasonable path, it can obtain higher location accuracy. Take the sensor nodes as figure vertexs, then use the thoughts of TSP and ant colony algorithm to search for an optimal path. Through the theoretical analysis and simulations show that formed paths can cover the entire network and adapt to the random distribution node localization in wireless sensor network.

**Keywords** WSN, Localization, Mobile anchor, Path planning, Ant colony algorithm

## 1 引言

无线传感网中节点定位技术是通过锚节点的坐标来计算盲节点的坐标,最终达到确定所有传感器节点位置信息的目的。目前锚节点包括固定锚节点和移动锚节点,由于固定锚节点随机散布,在进行定位时精度不高;移动锚节点通过进行路径规划,可以尽量覆盖整个网络,为盲节点提供质量较好的信标点,提高盲节点的定位精度。利用移动锚节点辅助其它节点定位是一种比较实用的方法,但是移动锚节点必须能有效地规划路径才可以达到减少能耗,提高定位精度的目的。可见,移动锚节点的路径规划问题是需要解决的基本问题。

节点路径规划分为静态路径规划和动态路径规划两种。文献[1]中Dimitrios Koutsonikolas提出了3种著名的移动模型:Scan型、Double Scan型和HILBERT型;文献[2]中提出了圆形和S型规划路径的方法;文献[3]中提出等距螺旋形轨迹的路径规划,它们都属于静态路径规划,不考虑节点的分布情况,只是按照预先规划好的路径进行节点定位,当节点靠近路径时定位精度高,反之定位精度低,甚至无法定位。文献[4]中提出随机移动模型,其源于布朗运动,但节点前后时间内运行方向变化很大,容易出现急转弯想象;文献[5]提出禁忌搜索路径规划,其使用记忆存储来指导搜索的过程;文献

[6]提出高斯-马尔可夫移动模型,其通过参数控制前后时刻节点运动速度和方向的变化幅度,它们都属于动态路径规划。本文提出一种动态规划路径策略,该策略将路径规划问题转化为图的遍历以及寻找最优路径的问题,最后利用蚁群算法进行规划路径。

## 2 问题描述

节点定位依据在定位过程中是否测量节点间的距离或角度,将定位算法分为基于测距的和无需测距的定位。其中RSSI定位算法是基于测距的,通过测量接收信号强度,比较两点间信号强度来判断距离从而达到对待测节点定位的目的。本文基于这个原理来得到未知节点之间的大概拓扑信息,从而将路径规划问题转化为求解图中满足条件的路径。

### 2.1 RSSI与距离对应关系

RSSI(接收信号的强度指示)通过接收到的信号强弱测定信号点与接收点的距离,目前存在3种信号传输模型<sup>[7]</sup>:自由空间模型、双路径反射模型和遮蔽模型。自由空间模型认为发送者到接收者之间只存在一条信号传输路径,其模型表示为: $P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$ ,其中 $P_r(d)$ (接收能量)与 $d^2$ (距离)成反比;双路径反射模型考虑了障碍物的影响,其模型表示

本文受甘肃省科技支撑计划项目(090GKCA075)资助。

党小超(1963-),男,教授,主要研究方向为计算机网络、物联网;李小艳(1985-),女,硕士,主要研究方向为无线传感网技术, E-mail: lixiaoyan5666@126.com(通信作者)。

为:  $p_r(d) = \frac{p_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L}$ , 其中  $P_r(d)$  (接收能量) 与  $d^4$  (距离) 成反比。

遮蔽模型考虑了噪声的影响, 将环境噪声引入到接收信号能量的衡量中, 更加实用化, 本文采用遮蔽模型, 这模型表示如下:

$$\left[ \frac{p_r(d)}{p_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\lambda \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \xi \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为路径损耗系数, 取值范围为 2 至 5 之间;  $\xi$  是平均值为 0 的高斯分布随机数;  $d_0$  为参考距离,  $P_r(d_0)$  是参考距离为  $d_0$  的接收信号强度。

由此得出 RSSI 与距离  $d$  的换算公式为:

$$RSSI = p_r(d) = -10\lambda \log(d) + \xi \quad (2)$$

推导得:

$$d = 10^{\frac{|RSSI| - \xi}{10\lambda}} \quad (3)$$

## 2.2 图论化

若将传感器节点看作无向图中的顶点, 则求解移动锚节点的路径规划问题便转化为求解图中顶点之间最佳路径的问题。由于传感器节点众多, 不可能在一个图中将所有传感器节点都作为图的顶点进行遍历。考虑到传感器节点可以根据接收到的 RSSI 将其转化为两个节点之间的距离, 因此引入邻居节点和内部节点的定义。本文假设节点的通信半径为  $R_c$ , 但由于实际的环境中存在噪音、障碍物等, 造成节点的实际通信半径小于  $R_c$  且各方向不等<sup>[8]</sup>, 因此本文以  $5/6R_c$  作为通信半径中的最大值。

**定义 1 (邻居节点)** 传感器节点  $V_i$  发出信号, 节点  $V_n$  接收到  $V_i$  的信号, 将 RSSI 转换成对应的距离  $d(V_i, V_n)$ , 若存在  $d(V_i, V_n) \in (2/3R_c, 5/6R_c)$ , 则称节点  $V_n$  为节点  $V_i$  的邻居节点。

**定义 2 (内部节点)** 传感器节点  $V_i$  发出信号, 节点  $V_n$  接收到  $V_i$  的信号, 将 RSSI 转换成对应的距离  $d(V_i, V_n)$ , 若存在  $d(V_i, V_n) < 2/3R_c$ , 则称节点  $V_n$  为节点  $V_i$  的内部节点。

**定理 1** 每个传感器节点都以自己为根节点, 可以形成一棵树或者一个无向图。

**证明:** 当节点  $V_i (i=1, 2, 3, \dots)$  判断节点  $V_n (n=1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots)$  是自己的邻居节点时, 将其加入到自己的邻接点表中, 节点  $V_n$  判断节点  $V_j (j=1, 2, \dots, n-1, n+1, \dots)$  为自己的邻居节点, 将  $V_j$  加入自己的邻接表中, 如此递推下去, 则形成以  $V_i$  为根,  $V_n, V_j, \dots$  为子节点的树, 或者是从节点  $V_i$  到  $V_j$  的  $n$  跳邻节点的无向图。

**定理 2** 若节点  $V_n$  为节点  $V_i$  的内部节点, 则节点  $V_i$  可以自身定位。

**证明:** 根据定义 2 可知, 若节点  $V_n$  为节点  $V_i$  的内部节点, 则存在  $d(V_n, V_i) < 2/3R_c$ , 若移动锚节点经过节点  $V_i$  所在路径, 则节点  $V_n$  将会收到移动锚节点发送的定位信息,  $V_n$  根据接收到信息进行自身定位。

## 3 移动锚节点路径规划

如图 1 所示, 在  $100 \times 100$  的区域内随机散布了 50 个传

感器节点。传感器节点通过接收到的 RSSI 信号, 根据式(3)将其转化为对应的距离, 若节点  $i$  到节点  $j$  的计算距离满足邻居节点的条件, 则节点  $i$  将节点  $j$  记录到邻节点的表项中。所有传感器节点以自身为根节点, 形成一棵树。当起始节点选定后就可以形成一个拓扑图, 依据一定的条件遍历完该拓扑图后会形成一条路径, 该路径即为所求规划路径。

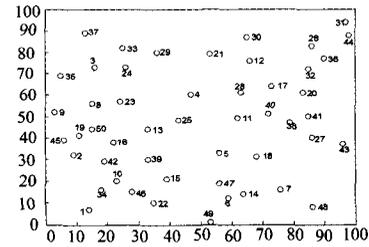


图 1  $N=50$  时传感器节点随机分布图

### 3.1 移动锚节点路径规划步骤

Step1 选择起始节点

如图 1 所示, 假设以节点 1 作为起始节点, 即树的根节点, 取节点的通信半径  $R_c = 18m$ 。

Spet2 构造初始树

若两个节点之间的距离在  $12m(2/3R_c)$  与  $15m(5/6R_c)$  之间, 则认为这两个节点互为邻居节点, 从树的定义角度来说, 每个节点有且只有一个父节点, 若规定两个节点是邻居节点, 则距离根节点跳数少的作为父节点。依据此条件构造的初始树如图 2 所示 (图 2 为在图 1 的基础上以节点 1 为根构造的初始树)。

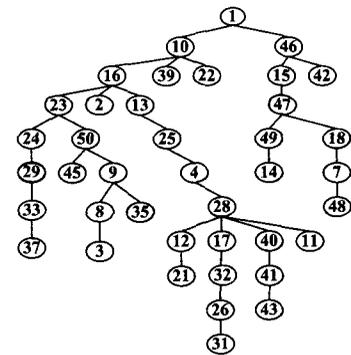


图 2 初始树

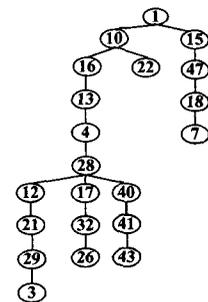


图 3 优化始树

Step3 树的优化

不同于图论中的树, 无线传感器网络中节点构成的树中存在冗余节点。例如, 由图 1 的节点分布图及图 2 的初始树可知, 节点 39 为节点 10、节点 16、节点 13 等的内部节点, 它

可以通过周围节点获得自身定位,它的邻居节点均属于初始树中某个节点的内部节点或邻居节点,因此可以将其从树中删除,按此规则将冗余节点删除,将图 2 的树进行优化得到图 3 的树。

#### Step4 遍历树

对图 3 中的节点按一定规则进行遍历,可求得一条最优路径,即为该问题的解。图中的节点通过遍历可以接收到移动锚节点发送的锚节点位置信息,可以完成自身定位;又由定理 2 可知,这些节点的内部节点同时也可以接收到该信息并完成自身定位,即网络中的所有传感器节点均可以完成定位,所以遍历树形成的路径即为所需的规划路径。

### 3.2 移动锚节点路径规划算法

要得到移动锚节点的移动路径只需遍历图 3 中的所有点仅此一次即可,它类似于 TSP 问题。TSP 问题是在给出城市数与各城市之间的距离的情况,找到一条能够经过所有城市的最短路径,因此可以用解 TSP 的思想来规划路径。解决 TSP 的算法很多,本文采用蚁群算法来完成移动锚节点路径规划。

设需要遍历的结点个数为  $N$ ,集合  $C$  表示所需遍历节点的集合; $d_{ij}(i, j=1, 2, 3, \dots, N)$  表示节点  $i$  与节点  $j$  之间的计算距离,集合  $D$  表示各个节点之间距离(通过 RSSI 计算得到); $b_i(t)(i=1, 2, \dots, N)$  表示在时刻  $t$  节点  $i$  处蚂蚁的个数,设蚂蚁的总数为  $M$ ,则有  $M = \sum_{i=1}^N b_i(t)$ ;  $h_i(i=1, 2, \dots, N)$  表示节点  $i$  到当前节点的跳数; $c_i(i=1, 2, \dots, N)$  表示节点  $i$  的邻节点个数,需要满足  $c_i \geq 1$ 。

$\tau_{ij}(t)$  表示  $t$  时刻在节点  $i$  与节点  $j$  连线上信息素的浓度,初始信息素浓度相等,有  $\tau_{ij}(0) = A(A$  为常数)。参数  $\alpha$  表示路径上信息素对路径选择的作用程度,  $\tau_{ij}^\alpha$  表示蚂蚁在运动过程中节点  $i, j$  连线上所积累的信息素浓度;参数  $\beta$  表示路径的长度对路径选择的作用程度,  $\eta_{ij}^\beta$  表示在启发式因子作用下蚂蚁所选路径为  $ij$  的期望程度,其中  $\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$ ;参数  $\gamma$  表示邻节点个数对路径选择的作用程度,  $\phi_{ij}^\gamma$  表示在启发式因子作用下邻节点个数对节点  $i$  选择下一节点为  $j$  的期望度,其中  $\phi_{ij}(t) = 1/c_j$ (邻节点少的节点先被遍历,由于下次成为邻节点的可能性小);参数  $\delta$  表示跳数对路径选择的作用程度,  $\phi_{ij}^\delta$  表示在启发式因子作用下跳数对节点  $i$  选择下一节点为  $j$  的期望度,其中  $\phi_{ij}(t) = 1/h_j$ (先遍历离当前节点近的。若当前节点的邻节点全被遍历,则逆向寻找未遍历的节点)。设  $P_{ij}^k(t)$  表示在  $t$  时刻第  $k(k=1, 2, \dots, M)$  只蚂蚁由节点  $i$  移动到节点  $j$  的概率,节点一步转移概率计算公式为:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha * \eta_{ij}^\beta(t) * \phi_{ij}^\gamma(t) * \phi_{ij}^\delta(t)}{\sum_{j=allowed_k} \tau_{ij}^\alpha * \eta_{ij}^\beta(t) * \phi_{ij}^\gamma(t) * \phi_{ij}^\delta(t)}, & j \in allowed_k \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $allowed_k = \{N - tabu_k\}$ , 表示蚂蚁  $k$  下一步允许选择的节点,其中  $tabu_k$  表示第  $k(k=1, 2, \dots, M)$  只蚂蚁的禁忌表(tabulist),用来计算蚂蚁当前所经过的节点。

信息正反馈:在一次迭代过程中,蚂蚁走完所有规定节点之后需要对路径上的信息素进行更新,作为后续蚂蚁的参考。设本次迭代经过了  $s$  时刻,此时信息素更新的计算方法为:

$$\tau_{ij}(t+s) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^M \Delta\tau_{ij}^k \quad (6)$$

式(5)中  $\rho$  表示信息素挥发系数,  $1-\rho$  表示信息素残留因子,  $\rho \in [0, 1)$ ;  $\Delta\tau_{ij}$  表示本次迭代中节点  $i$  到节点  $j$  路径上的信息素增量,初始时刻  $\Delta\tau_{ij}(0) = 0$ ;式(6)中  $\Delta\tau_{ij}^k$  表示第  $k$  只蚂蚁在本次迭代中留在路径  $(i, j)$  上的信息量。本文  $\Delta\tau_{ij}^k$  的计算采用 Ant-Density 模型:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在 } t \text{ 和 } t+1 \text{ 之间时刻经过 } (i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

## 4 仿真实验与分析

使用 Matlab 平台,将蚁群算法引入 WSN 移动信标节点获取中进行仿真,具体仿真环境:在  $100m \times 100m$  的正方形区域内随机散布传感器节点,设路径损耗系数  $\lambda = 2$ ,信息素挥发系数  $\rho = 0.7$ ,信息素权重  $\alpha = 3$ ,启发因子权重  $\beta = 4, \gamma = 2, \delta = 1$ ,信息素增量  $\Delta\tau_{ij} = 0.02$ ,蚂蚁数  $M = 1000$ 。

图 4 的仿真实验描绘了当随机散布传感器节点个数为  $N = 50$ ,节点通信半径  $R_c = 18m$  时进行路径规划得到的结果。由图可以看出,对于非均匀分布的网络节点来说,本算法能够根据网络区域内节点分布密度灵活规划出移动路径,得到的路径能够定位所有的节点。图 5 的仿真实验描绘了当随机散布传感器节点个数为  $N = 50$ ,节点通信半径  $R_c = 30m$  时进行路径规划得到的结果。

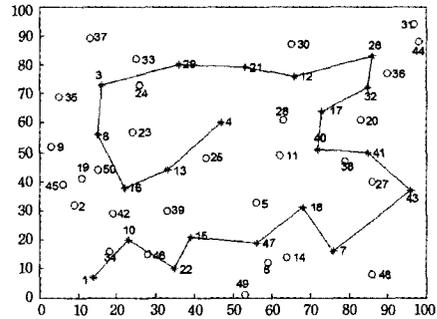


图 4  $R = 18, N = 50$  时的路径

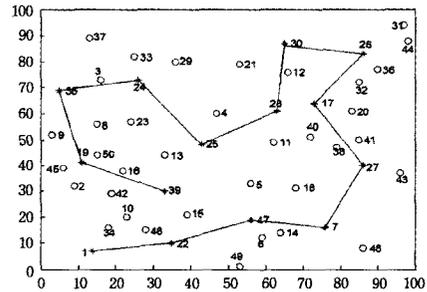


图 5  $R = 30, N = 50$  时的路径

表 1 说明了通信半径对定位精度的影响,比较图 4 和图 5 知,当节点的通信半径增大时,邻节点的个数减少,遍历的节点数减少,由于节点的发射功率有限,通信半径越大,节点接收到的信号越弱,造成定位误差增大,但通信半径太小时,由于节点随机分布,会使许多节点收不到广播信号,因此针对不同的节点密度应设置相应的通信半径,在此采用平均定位

误差  $\epsilon$  来衡量定位精度,其计算公式如下:

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^k \| p_i - q_i \|}{kR}, 0 < k \leq N$$

式中,  $k$  表示可以定位的节点个数,  $p_i$  表示可定位的第  $i$  个未知节点的计算位置,  $q_i$  表示可定位的第  $i$  个未知节点的实际位置。表 1 为  $N=50$  时,通信半径对节点定位精度的影响。

| 半径 R(m) | 平均定位误差 $\epsilon$ (%) |
|---------|-----------------------|
| 12      | 6.361                 |
| 18      | 4.314                 |
| 24      | 3.250                 |
| 30      | 2.867                 |
| 36      | 3.112                 |

图 6 为将随机传感器节点个数  $N$  增至 100 时的仿真环境,相对于图 1 中的仿真环境,节点密度明显增加。图 7 的仿真实验结果描绘了在图 6 的仿真环境下,节点通信半径  $R_c = 18m$  时进行路径规划得到的结果,与图 4 比较可知,节点的密度在一定范围内增大时,同种情况下路径的总长度增加。

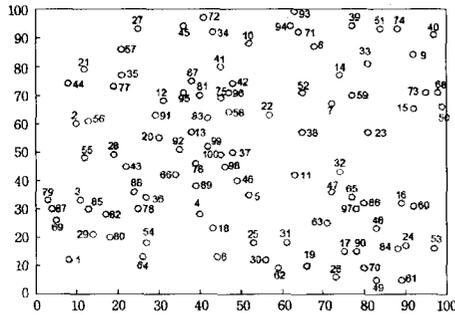


图 6  $N=100$  时的仿真环境

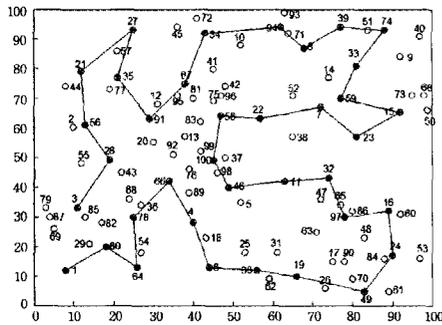


图 7  $R=18, N=100$  时的路径

图 8 为在  $100m \times 100m$  的区域中,通信半径  $R=30$ ,散布节点数分别为 30、50、100、150、200 时求的相应的路径,并按此路径定位后得到的定位误差图。由图中可以看出,节点的密度越大定位精度越高,随着节点密度增加,规划路径时遍历的范围越大,所有节点就可以接受多个广播信息,更利于其自身定位。

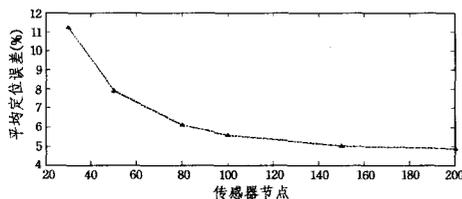
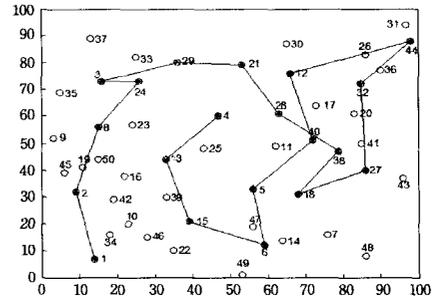


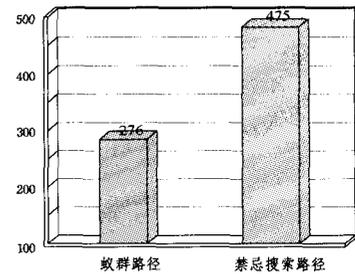
图 8 节点密度对定位精度的影响

利用文献[5]提出的禁忌搜索进行路径规划,如图 9(a)为  $R=30, N=50$  时禁忌搜索的路径规划结果。比较相同环境下,两种方法所得路径的总长度,图 9(b)为信标移动路径长度的比较,由图可以看出同种条件下,本文提出的规划路径策略较之禁忌搜索路径规划总长度减少,节省了能量。

分别沿着图 5 和图 9(a)所规划的路径进行节点定位,然后与实际位置进行比较,分别得到两种路径下单个节点的误差,图 10(a)较图 10(b)定位精度略有提高,图 10(a)的平均偏离误差为 0.88m,图 10(b)的平均偏离误差为 0.926m。

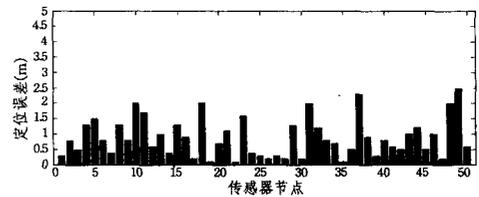


(a)  $R=30, N=50$  时的禁忌搜索路径

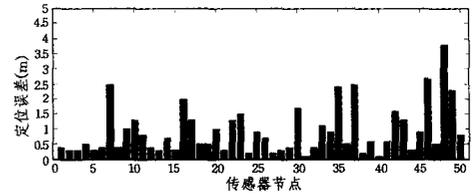


(b) 信标路径长度

图 9



(a) 单个节点误差(蚁群)



(b) 单个节点误差(禁忌搜索)

图 10

**结束语** 本文讨论了无线传感器网络节点定位中移动锚节点路径规划的问题,并将该问题的求解转化为图的遍历问题,利用解决 TSP 的方法来完成节点的路径规划。理论分析和实验证明将图论和蚁群算法应用到节点路径规划中能很好地适应大规模随机散布的 WSN 节点的定位,并取得较高的定位精度。

### 参考文献

[1] Koutsonilas D, Das S M, Hu Y C. Path planning of mobile land-

marks for localization in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007(30): 2577-2592

[2] Huang Gui, Zaruba G V. Static path planning for mobile beacons to localize sensor networks[C]//Proceedings of the Fifth Annual IEEE International Conference. 2007: 323-330

[3] 黎作鹏. 基于移动锚节点的无线传感器网络定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010

[4] Wang B, Yan B Y, Yuan D H. The basic Study of the Features of the Adhoc Nodes Mobility Mode[J]. Journal of Sichuan University, 2006, 42(1): 68-72

[5] 梁甲金. 基于移动锚节点的无线传感器网络定位技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010

[6] Jian L, Pmohapatra L. Location Aided Knowledge Extraction Routing for Mobile Adhoc Networks[J]. wireless Communications and Networking, 2003, 5(2): 1180-1184

[7] 王继春. 无线传感器网络节点定位若干问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009

[8] Lee J, Chuang W, Kim E. A new range-free localization method using quadratic programming [J]. Computer Communications, 2011(34): 998-1010

(上接第 314 页)

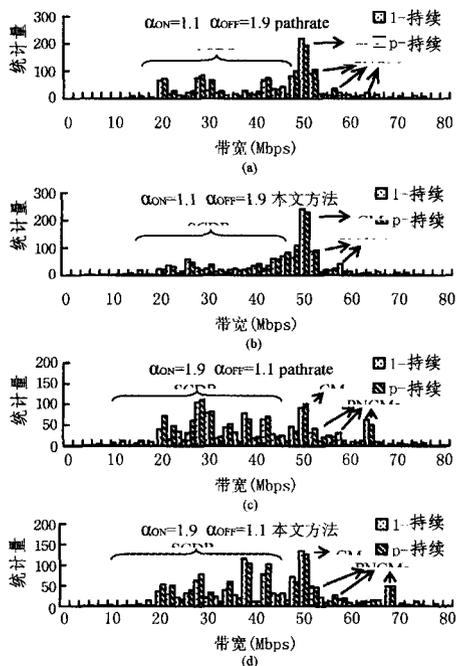


图 4 路径容量多峰分布图

需要指出的是:对于 IPv4 网络来说,由于中间路由器需要对分片进行重组,这样会扰乱测量分组的离散,因此本文方法并不适用于 IPv4 网络环境。

**结束语** 本文重点研究了源端分组离散对路径容量的影响,分析了 IPv6 协议栈中的分组发送机制,提出了一种新的 IPv6 网络路径容量测量方法。理论分析及实验表明:该方法克服了目前常见方法中分组间间隙较大、发送带宽利用率低的缺点,能够有效地降低背景流量对测量的影响,特别适合高速 IPv6 网络环境。在今后的工作中将考虑如何减小分片开销,以更好地满足实时测量的需求。

### 参 考 文 献

[1] Dovrolis C, Ramanathan P, Moore D. What do packet dispersion techniques measure [C]//Proceedings IEEE INFOCOM, 2001: 905-914

[2] Carter R L, Crovella M E. Measuring bottleneck link speed in packet-switched networks[J]. Performance Evaluation, 1996, 27&28: 297-318

[3] Shigeo S, Takahiro Y, Kenichi M. A New Approach to the Bot-

tleneck Bandwidth Measurement for an End-to-End Network Path[C]//IEEE International Conference on Communications. 2005: 59-64

[4] Lai K, Baker M. Nettimer: a tool for measuring bottleneck link bandwidth[C]//Proceedings of 3rd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems. 2001: 122-133

[5] 张文杰, 钱德沛, 伍卫国, 等. 一种非均匀包对序列带宽测量方法[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(10): 1045-1048

[6] 李智涛, 徐雅静, 刘利宏, 等. 一种新的 IPv6 网络带宽测量方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(9): 2283-2286

[7] Li Xing-feng, Luo Wan-ming, Yan Bao-ping. Study and Implementation of Bottleneck Bandwidth Measurement in IPv6 Networks[C]//ICCT International Conference on Communication Technology. 2006: 1-4

[8] 李雯, 潘乔, 朱畅华, 等. 一种适用于 IPv6 的高效瓶颈带宽测量方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(22): 142-144

[9] Crocker M, Lazarou G, Baca J, et al. A Bandwidth Determination Method for IPv6-based Network[J]. The International Journal of Computers & Applications, 2009, 31(2): 109-118

[10] Cabellos-Aparicio A, Garcia F J, Domingo-Pascual J. A novel available bandwidth estimation and tracking algorithm [C]//IEEE International Workshop on Bandwidth on Demand. 2008: 87-94

[11] Xu Da-wei, Qian De-wei. A bandwidth adaptive method for estimating end-to-end available bandwidth[C]//IEEE Singapore International Conference on Communication Systems. 2008: 543-548

[12] 邱全杰, 吴中福. 一种 IPv6 网络可用带宽测量方法及分析[J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 84-86

[13] Tanenbaum A S. Computer Networks[M]. Prentice Hall, 2003: 476-484

[14] Li Q, Jinmei T, Shima K. IPv6 Core Protocols Implementation [M]. Morgan Kaufmann Publishers, 2007: 131-286

[15] Comer D E. Network Systems Design Using Network Processors [M]. Prentice Hall, 2004: 97-102

[16] Kramer G. On Generating Self-similar Traffic Using Pseudo-pareto Distribution[R]. Department of Computer Science, University of California, Davis, 2000

[17] Dovrolis C, Ramanathan P, Moore D. Packet-dispersion techniques and a capacity-estimation methodology [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(6): 963-977