

一种信号强度感知的 Ad Hoc 网络节点移动控制算法

张颖, 沈中, 常义林

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对 Ad Hoc 网络节点具有的可移动的特点, 提出了一种基于接收信号功率的移动控制算法. 该算法是在无法获取节点位置信息的情况下, 对网络拓扑进行优化配置. 文中定义了基于接收信号强度的性能函数, 当节点位于该函数的最小值点时, 传输数据所需的能量消耗最小. 可将该函数取得最优解的位置作为节点移动的目标位置, 并根据检测到的接收信号强度逐步搜索到该位置. 实验结果表明, 在位置信息未知的情况下, 可通过该算法找到节点移动的目标位置从而减少传输能量的消耗.

关键词: 移动控制; 接收信号强度; 优化搜索; 传输消耗

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)02-0107-04

Signal-Aware Movement Control Algorithm for Nodes in Ad Hoc Network

ZHANG Ying, SHEN Zhong, CHANG Yilin

(State Key Lab of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: According to the mobility of the nodes in Ad Hoc network, this paper gives an algorithm of the movement control based on the strength of the receiving signal. It proposes a way to optimize the network configuration in the situation that the position information of nodes is unavailable. And furthermore, in this paper, the performance function is also defined. That is, when a node moves to the point where the function is minimized, the transmission cost is also minimized. On the basis of this concept, we can fix the node's target point at the optimum solution of the function. And this solution can be found through the receiving signal strength. Simulation results show that the algorithm can be used to find a node's target point and minimize the transmission cost by moving the node to this target point.

Keywords: mobility control; receiving signal strength; optimal search; transmission cost

无线 Ad Hoc 网络的拓扑结构受到节点移动、网络环境、节点发射功率等因素的影响而呈现出多变的特点. 为了配置一个优化的网络拓扑, 以往的研究主要集中于拓扑控制的方法, 即通过动态调节各节点的传输功率以达到减少能量消耗、增加网络容量等目的^[1-3]. 然而, 在节点密度较为稀疏的区域, 由于节点之间的距离较远, 无论采用哪种拓扑控制算法, 都不能有效降低节点的传输功率, 而且过大的传输功率不仅使节点快速消耗能量, 还会干扰相邻节

点的通信. 在这种情况下, 节点移动到新位置以维护网络连通性、提高网络抗毁性和最小化能量消耗等机制成为了研究热点^[4-7]. 其中, Goldenberg 等^[4]和 Jiang 等^[7]提出的将节点移至其两个通信邻节点连线中点处的算法, 在维护网络原有连通性的同时能够最小化传输能量的消耗. 在这些算法中, 节点的移动是在已知位置信息的情况下进行的. 当网络节点没有配备 GPS 装置或其他定位系统而无法获取相关的位置信息时, 如何移动节点达到上述目的是一

项值得研究和解决的课题. 据此, 我们提出了一种节点移动控制算法, 在不具备位置信息的条件下, 节点根据检测到的接收信号强度, 逐步移动并搜索到最佳位置, 从而避免了节点漫无目的的移动.

1 网络模型

1.1 网络模型

图1所示的某一 Ad Hoc 网络会遇到这样的情况: 受到环境、能量等因素的影响, 节点 B 以最大功率发射信息, 到达接收端 D 的信号强度仍低于门限值, 使得链路 BD (虚线所示) 不能正常通信时, 节点 D 则需要改变其位置以提高节点和链路的有效性. 由于无法获取目标位置, D 的移动必须遵循以下两个原则:

- (1) 朝着提高链路有效性的方向移动;
- (2) 移动到最终位置后, 与其邻节点通信时所需的传输能量和最小.

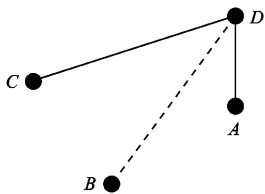


图1 网络模型

1.2 节点移动的最佳位置

在发射功率一定的情况下, 假设可移动节点位于平面上任一点 x 时接收到来自于邻节点 j 的通信信号强度为 $R_j(x)$, 定义节点接收信号性能函数为

$$\xi(x) = \sum_{j=1}^N R_j^{-1}(x) \quad (1)$$

式中: N 为移动节点的邻节点数.

考虑到无线信号的功率按照发送端和接收端之间距离 d 的 β 次方衰减, 我们采用自由空间模型 ($\beta=2$) 进行讨论, 即给定发射功率和传输链路参数 λ , 接收信号强度 R 与 d 的关系为 $R=\lambda d^{-2}$. 于是, $\xi(x)$ 可以表示为

$$\xi(x) = \sum_{j=1}^N \lambda^{-1} \| (x - x_j) \|^2 \quad (2)$$

$\xi(x)$ 在 x 处的梯度为

$$\nabla \xi(x) = \frac{\partial \xi}{\partial x} =$$

$$\left(\frac{2}{\lambda} \sum_{j=1}^N (u - u_j), \frac{2}{\lambda} \sum_{j=1}^N (v - v_j) \right)^T \quad (3)$$

式中: $x(u, v)$, $x_j(u_j, v_j)$ 分别为移动节点及其邻节

点的位置. 当 $\nabla \xi(x) = 0$ 时, 有

$$x^* = \left[\frac{\sum_{j=1}^N u_j}{N}, \frac{\sum_{j=1}^N v_j}{N} \right]^T \quad (4)$$

$\xi(x)$ 的 Hesse 矩阵为

$$G(x) = \nabla^2 \xi(x) = \begin{bmatrix} \frac{2N}{\lambda} & 0 \\ 0 & \frac{2N}{\lambda} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于 N, λ 为正实数, 则 $G(x)$ 是正定矩阵. 于是, 平面上存在 x^* 并且当节点位于 x^* 时, $\xi(x)$ 具有最小值. 从式(4)不难看出, x^* 为移动节点的 N 个邻节点构成的多边形的重心. 特别地, 当 $N=2$ 时, x^* 为邻节点连线的中点. 将 x^* 作为节点移动的目标位置, 则节点从平面上任一点移动搜索到 x^* 的过程可看作是

$$x^* = \arg \min \xi(x) \quad (6)$$

2 基于接收信号强度的节点移动控制算法

节点采用移动试探的方法, 每移动一次就对接收信号进行检测, 以确保节点始终沿着 $\xi(x)$ 减小的方向移动. 节点重复执行移动、检测的过程, 直到 $\xi(x)$ 不再减小为止. 算法的具体描述如下.

(1) 令 $k=1$, 节点从初始位置 $x_0^{(k)}$ 处沿任意方向 p_k 移动单位距离 δ_0 后到达 $x_1^{(k)} = x_0^{(k)} + \delta_0 p_k$. 如果 $\xi(x_1^{(k)}) < \xi(x_0^{(k)})$, 将 $x_1^{(k)}$ 作为下一次探索的起点; 否则, 节点将沿 $-p_k$ 移动到 $x_2^{(k)} = x_0^{(k)} - \delta_0 p_k$, 并将 $x_2^{(k)}$ 作为下一步移动的起点.

(2) 节点从所处位置沿着搜索方向进行移动. 当 $\xi(x_i^{(k)}) > \xi(x_{i-1}^{(k)})$ 时, 移动跨越了 $\min \xi(x)$. 于是, 节点在相反方向上进行搜索. 当 $\xi(x_{i+m}^{(k)}) > \xi(x_{i+m-1}^{(k)})$ 时, 再次反向移动. 节点如此往返, 以确保节点的移动始终沿着 $\xi(x)$ 减小的方向进行, 直到 $|\xi(x_{i+m+n}^{(k)}) - \xi(x_{i+m+n-1}^{(k)})| < \epsilon$ 为止, 记录 $x_{i+n}^{(k)}$.

(3) 令 $k=k+1$, 节点从 $x_{i+n}^{(k-1)}$ 处沿着 p_k ($p_k \perp p_{k-1}$) 方向执行(1)、(2)后算法结束.

为了使节点逼近 x^* , 迭代步长 δ_i 需要不断修正. 节点移动步长定义为 $\delta_{i+1} = \alpha_i \delta_i$, 其中 α_i 是步长因子

$$\alpha_{i+1} = \left(\frac{|\xi(x_i) - \xi(x_{i-1})|}{\max(\xi(x_i) - \xi(x_{i-1}))} \right)^{1/2}, \quad i > 1 \quad (7)$$

它表示节点移动 δ_i 后, $\xi(x_{i-1}^{(k)})$ 与 $\xi(x_i^{(k)})$ 之间的相对

最大值的变化量. 当 α_{i+1} 较大时, 所期望的第 $i+1$ 步步长 δ_{i+1} 较长, 当 α_{i+1} 较小时, 期望的节点移动步长较短.

从算法描述不难看出, 节点始终沿着 $\xi(\mathbf{x})$ 减小的方向移动并逐步搜索到最佳位置 $\mathbf{x}^*$. 图 2 给出了节点搜索的一个过程. 图中 x 轴和 y 轴分别表示节点位置的 x 坐标和 y 坐标. 节点从位置 $\mathbf{x}_0^{(1)}$ 出发, 首先沿着某一方向移动到达 $\mathbf{x}_1^{(1)}$, 由于 $\xi(\mathbf{x}_1^{(1)}) > \xi(\mathbf{x}_0^{(1)})$, 节点的移动未能使 $\xi(\mathbf{x})$ 减小, 于是, 节点反向移动并搜索到该方向上的 $\min \xi(\mathbf{x})$ 点 $\mathbf{x}_{i+n}^{(1)}$ 后转向垂直方向. 可以看出, 当节点移动到 $\mathbf{x}_1^{(1)}$ 时有 $\xi(\mathbf{x}_1^{(2)}) > \xi(\mathbf{x}_{i+n}^{(1)})$, 节点再次在反方向上重复移动、检测的过程, 直到 $|\xi(\mathbf{x}_{i+n}^{(2)}) - \xi(\mathbf{x}_{i+n-1}^{(2)})| < \epsilon$, 此时 $\mathbf{x}_{i+n}^{(2)}$ 为最优位置 $\mathbf{x}^*$.

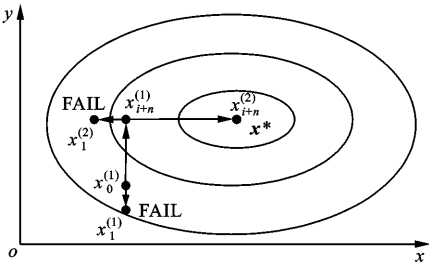


图 2 节点的搜索过程

3 算法收敛性分析

引理^[8] 设 $\mathbf{p}_i$ 是 $\xi(\mathbf{x})$ 减小的方向, δ_i 是步长. 若存在常数 $M > 0$, 对所有的 $\delta_i > 0$ 和任意整数 i , $\|\nabla^2 \xi(\mathbf{x}_i + \delta_i \mathbf{p}_i)\| \leq M$, 则

$$\xi(\mathbf{x}_i) - \xi(\mathbf{x}_i + \delta_i \mathbf{p}_i) \geq \frac{1}{2M} \|\nabla \xi(\mathbf{x}_i)\|^2 \cos^2 \theta_i \tag{8}$$

式中: θ_i 为 $\nabla \xi(\mathbf{x}_i)$ 与 $\mathbf{p}_i$ 的夹角.

定理 $\xi(\mathbf{x})$ 二阶连续可微且 $\|\nabla^2 \xi(\mathbf{x})\| \leq M$ (M 是正常数), 对任意给定的节点初始位置, 算法的迭代在有限步终止, 即 $\lim_{i \rightarrow \infty} \nabla \xi(\mathbf{x}_i) = 0$.

证明 由于节点始终沿着 $\xi(\mathbf{x})$ 减小的方向移动, 根据引理可知

$$\xi(\mathbf{x}_i) - \xi(\mathbf{x}_{i+1}) \geq \frac{1}{2M} \|\nabla \xi(\mathbf{x}_i)\|^2 \cos^2 \theta_i \tag{9}$$

于是有

$$\begin{aligned} \xi(\mathbf{x}_0) - \xi(\mathbf{x}_i) &= \sum_{j=1}^{i-1} [\xi(\mathbf{x}_j) - \xi(\mathbf{x}_{j+1})] \geq \\ &\frac{1}{2M} \sum_{j=1}^{i-1} \|\nabla \xi(\mathbf{x}_j)\|^2 \cos^2 \theta_j \end{aligned} \tag{10}$$

从而有 $\lim_{i \rightarrow \infty} \nabla \xi(\mathbf{x}_i) = 0$.

4 实验仿真

使用 Matlab 进行仿真以验证算法的有效性. 仿真时, 分别考虑 3、4 和 5 个节点独立且随机地分布在 $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ 的平坦区域中而构成的 Ad Hoc 网络, 每个节点的最大通信半径为 50 m . 由于节点的移动只依赖于接收信号强度, 因此, 在发射功率一定的条件下, 移动节点搜索优化位置的过程只受到其 1 跳邻节点的影响. 执行算法的节点在移动的过程中, 其他节点保持位置不变. 因此, 对于更多节点随机分布的场景, 其结果与本文中仿真的网络场景所得到的结果具有一致性.

4.1 误差分析

根据算法描述可知, 对任意小的正实数 ϵ , 当 $|\xi(\mathbf{x}_{i+n}^{(k)}) - \xi(\mathbf{x}_{i+n-1}^{(k)})| < \epsilon$ 时, $\mathbf{x}_{i+n}^{(k)}$ 为节点移动的最终位置. 于是, ϵ 的选取将影响节点移动的最终位置. 对于随机产生的 50 个 4 节点随机分布的网络场景, 每个场景分别考虑 $\epsilon = 10^{-5}$ 和 $\epsilon = 10^{-3}$ 时, 移动的最终位置与理论位置之间的偏差. 如图 3 所示, 当 $\epsilon = 10^{-3}$ 和 $\epsilon = 10^{-5}$ 时, 节点位置偏差的均值分别为 0.74 m 和 0.6 m , 可以看出, $\epsilon = 10^{-5}$ 时的位置偏差普遍低于 $\epsilon = 10^{-3}$ 时的偏差, 且 $\epsilon = 10^{-5}$ 时的误差曲线摆动幅度较小. 这说明 ϵ 越小, 节点移动的最终位置越靠近理论位置.

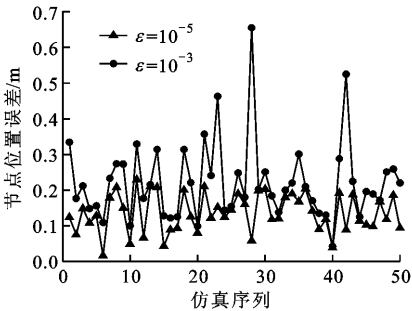


图 3 实际位置与理论位置偏差

4.2 传输消耗的改善

传输消耗的改善是指节点移动到最佳位置后所需的发射功率减少的程度. 我们采用的评价模型为 $E = a + b d^\tau$ ($\tau \in [2, 6]$), 其中 $a = 100 \text{ nJ}$, $b = 0.1 \text{ nJ/m}^\tau$. 它表示不考虑其他因素的影响, 在距离 d 上传输 1 bit 信息所需要的最小能量. 图 4 中 x 轴表示 τ 从 2 增加到 4, y 轴为根据 $(100(E - E_m)/E)$ 计算得到的发射功率的减少率, 其中 E 、 E_m 分别为移动前、后的发射功率. 从图中可知, 随着 τ 的增大, 传输消

耗的改善越大. 随着邻节点数目的增加其改善程度减少.

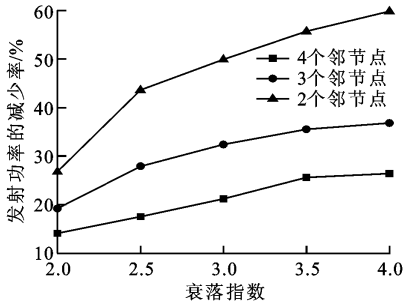


图4 发射功率的改善

4.3 能量有效性

由于节点的移动也要消耗能量,因此算法是否有效需要考虑节点移动时的能量消耗. 我们采用 $(100(E_{to} - (E_m + E_{te}))/E_{to})$ 来衡量能量总消耗是否得到改善,其中 E_{to} 和 E_{te} 分别为移动前、后传输 1 Mbit 信息所需的能量, $E_m = \lambda d$ ($\lambda = 0.1 \text{ J/m}$) 为移动距离 d 所消耗的能量. 图 5 分别给出了当节点位置信息已知和未知时,3 个节点随机分布的网络中,节点移动前后总能耗的比较. 从图中可以看出,无论是否已知节点的位置信息,节点移动后所需的传输能量比移动前减少了,而且位置信息未知时与位置信息已知时的能量消耗基本一致,这说明该算法是可行、有效的.

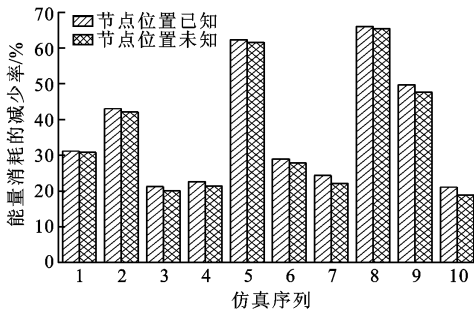


图5 能量消耗的改善

5 结 论

本文提出的移动控制算法是在无法获得节点位

置信息的条件下,移动节点根据接收到的信号强度自适应地搜索信号性能函数最小值来确定移动的目标位置. 从实验结果可以看出,在节点位置信息未知的情况下,可通过该算法找到节点的目标位置并减少传输能量消耗.

参考文献:

- [1] LI Ning, HOU J. FLSS: A fault-tolerant topology control algorithm for wireless networks[C]// Proceedings of MobiCom. New York, USA: ACM, 2005: 275-286.
- [2] RAMANATHAN R, ROSALES-HAIN R. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment[C]// Proceeding of INFOCOM. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 404-413.
- [3] WATTERNHOFER R, ZOLLINGER A. XTC: a practical topology control algorithm for ad-hoc networks[C]// Proceedings of the WMAN 04. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 216-222.
- [4] GOLDENBERG D, LIN Jie, MORSE A S, et al. Towards mobility as a network control primitive[C]// Proceedings of the 5th Mobihoc. New York, USA: ACM, 2004: 163-174.
- [5] BASU P, REDI J. Movement control algorithms for realization of fault-tolerant ad hoc robot networks [J]. IEEE Network, 2004, 18(4): 36-44.
- [6] DAS S, LIU Hai, KAMATH A, et al. Localized movement control for fault tolerance of mobile robot networks[C]// Proceedings of the WSN. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 24-26.
- [7] JIANG Zhen, WU Jie, KLINE R. Mobility control with local views of neighborhood in mobile networks [C]// Proceedings of International Workshop on Networking, Architecture, and Storages. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 9-14.
- [8] 徐成贤, 陈志平, 李乃成. 近代优化方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 106.

(编辑 武红江)