

基于概率可通链路的无线传感器网络栅格路由

刘湘雯^{①②} 于宏毅^① 侯惠峰^① 胡捍英^①

^①(信息工程大学通信工程系 郑州 450002)

^②(空军工程大学电子系 西安 710077)

摘要: 该文基于一种通用的概率可通链路模型,分析了相邻栅格可通概率和路径可通概率,研究了节点密度和栅格大小对它们的影响,分别给出了以能量效率和网络平均分组递交率为目标的最佳栅格大小,并提出了将二者结合的最佳栅格选择标准,在满足用户需求的前提下网络寿命达到最大。最后对其性能进行了仿真分析,结果表明在考虑了概率可通链路后的最佳栅格大小与分析结果非常接近,且分组递交率和能量效率相结合的栅格大小选择标准能够很好的延长网络寿命。

关键词: 无线传感器网络; 概率可通链路; 栅格路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2259-04

Grid Routing Based on Link Reachable with Probability in Wireless Sensor Networks

Liu Xiang-wen^{①②} Yu Hong-yi^① Hou Hui-feng^① Hu Han-ying^①

^①(Department of Communication Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

^②(Department of Electron and Information, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In this paper, the optimal grid size is studied based on link model reachable with probability in realistic environment. Reaching probabilities of neighboring grids and path are analyzed, and the effects of node density and grid size on reaching probabilities is studied, and optimal grid size of which maximize energy efficiency and network average packet delivery ratio is analyzed theoretically. A scheme of combination of packet delivery ratio and energy efficiency to select grid size is proposed, which maximizes network lifetime when meet user's requirements. The grid routing is simulated and analyzed, the results show the optimal grid size of theoretical value and simulation value to be equal almost, and the grid size selecting scheme of combining packet delivery ratio and energy efficiency can prolong network lifetime efficiently.

Key words: Wireless sensor network; Link reachable with probability; Grid routing

1 引言

通常在研究网络上层协议时,采用基于图1所示的圆盘通信模型,圆盘通信模型认为一个节点如果在自己的通信半径内,即就以概率1可通,大于此通信半径后,以概率0可通。但是在实际中,由于信道噪声、障碍物或者多径造成的信道随机衰落等,使得无线链路具有非常大的不确定性,节点间是以概率可通的,如图2所示。在考虑概率可通链路模型后,给上层协议的设计带来很大的影响,本文即就针对该问题进行研究。

一些文献已经对概率可通问题进行了研究^[1-3],并基于此概率可通通信模型,对上层路由协议进行了研究^[4-6]。文献[3]在一个更接近实际无线环境的29个节点的802.11b测试床环境中,验证了DSDV和DSR最小跳数路由的性能比较

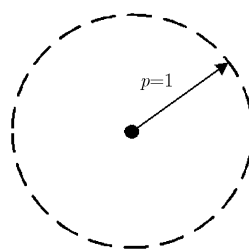


图1 圆盘通信模型

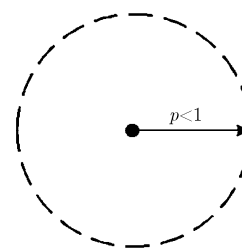


图2 概率可通通信模型

差。文献[4]基于此,考虑链路可通概率,给出了一个更合理的估计传输次数ETX(Expected Transmission Count)度量指标引导路径的选择。ETX度量指标的目标是最小化分组成功递交到目的节点的总传输次数,其中总传输次数考虑了出错重传次数。文献[5]基于此度量指标,对DSDV和DSR路由协议改进,建立一条包括重传次数在内的最小跳数路径。Marco Zuniga等基于文献[2]中的概率可通链路模型,分析了

2007-03-12收到,2007-11-05改回

CNGI示范工程项目(CNGI-04-10-1D)和河南省自然科学基金(SP05ZR23069)资助课题

基于衰落信道的贪婪转发地理路由问题^[5]。作者给出了考虑源到目的能量效率的度量指标——单位能量成功递交的分组个数，并基于此度量指标，从理论上分析了网络中采用 ARQ 和没有采用 ARQ 两种情况下的最佳转发距离。作者还给出了几种贪婪转发策略——基于距离，基于接收率以及基于距离和接收率的乘积。文献[6]是文献[5]的更进一步研究，在考虑概率可通链路下的节点功率可以调整的贪婪转发地理路由，并给出了一种新的本地链路度量指标——单位功率能够成功将分组向 Sink 方向前进的距离，该度量指标表征了功率有效性，在选择下一跳时，根据此度量指标选择一个使得该度量指标最好的下一跳。

地理路由由于其简单性、可扩展性，成为动态路由的一个重要分支。栅格路由^[7, 8]是地理路由具有代表性的一种做法，经典的基于地理位置信息的栅格路由，如果基于圆盘通信模型， d 是节点的最远通信范围，则设定栅格的边长不大于 $d/\sqrt{5}$ ，这样就认为相邻栅格内的任意两个节点以概率 1 可通，此时，能够保证网络连通性并且能量效率最好的最佳栅格大小为 $d/\sqrt{5}$ ，这是因为栅格大小为 $d/\sqrt{5}$ 时，在不考虑栅格中是否有节点且保证分组递交率为 1 的前提下，任意栅格到达目的跳数最少，端到端能耗最小，网络的能量效率最高。如果基于概率可通模型，这使得栅格如果按照 $d/\sqrt{5}$ 划分，相邻栅格不一定可通，且最佳栅格大小不再是 $d/\sqrt{5}$ 。本文即就基于概率可通链路模型，重新审视栅格路由算法，研究节点密度以及栅格大小对相邻栅格可通概率、路径可通概率的影响，分别以能量有效性准则和网络平均分组递交率为目标分析最佳的栅格大小，并提出一种分组递交率和能量效率相结合的最佳栅格划分标准，最后，对基于概率可通链路的栅格路由的性能进行仿真分析。

2 栅格路由的可通概率分析

2.1 栅格路由基本思想

栅格路由^[7, 8]假设每个节点知道自身相对于其它节点的精确位置，并且将节点分布的整个区域划分成小的“虚拟网格”。虚拟网格采用这样的定义：对于两个相邻的网格 A 和 B ，所有 A 中的节点都可以与 B 中的节点通信，反之亦然。因此在每个网格中的所有节点对于所有的路由来说就是等价的。设虚拟网格为一个边长是 d_{grid} 的正方形，如图 3 所示，无线通信的有效传播距离为 d ；则为了满足虚拟网格的定义，任意两个相邻网格中的两个相隔最远的节点间的距离不能超过 d ，因此，可以得到

$$d_{\text{grid}}^2 + (2d_{\text{grid}})^2 \leq d^2 \quad (1)$$

即 $d_{\text{grid}} \leq d/\sqrt{5}$ 。

栅格路由中的每一个栅格只有一个节点完成转发任务，称其为群首，在每一轮总是选择剩余能量最多的节点作为群首。下一跳栅格只能选择上下左右 4 个方向的栅格，这样做的好处是，在协议实现时，不需要交互即可选择一个最佳的

下一跳栅格。分组转发时，节点根据目的节点所在的栅格位置，确定自己的下一跳是哪个栅格，并把分组发送给该栅格，如图 4 所示。

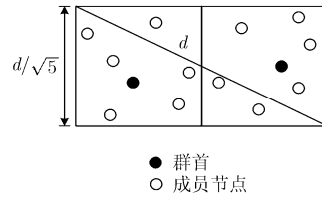


图3 栅格的划分

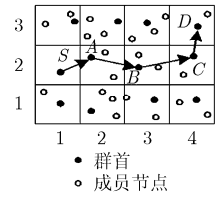


图4 栅格路由过程

2.2 概率可通通信模型

电磁信号在传播过程中，强度随着距离以指数次方衰减，并经历随机衰减。最常用的无线电传播模型是对数距离路径损耗模型^[9]，与发送节点距离为 d 的位置处，路径损耗 $PL(d)$ 用下式表示，

$$PL(d)[\text{dB}] = PL(d_0)[\text{dB}] + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma [\text{dB}] \quad (2)$$

其中 d 是发送节点与接收节点间的距离， d_0 是参考距离， n 依赖于周围环境和建筑物类型，在这里取值为 3， X_σ 是标准偏差为 σ 的正态随机变量。在与发送节点距离为 d 的点处，接收功率 $P_r(d)[\text{dB}] = P_t[\text{dB}] - PL(d)[\text{dB}]$ 。如果采用 NRZ，并且 1Baud=1bit，那么成功接收一个分组的概率 $p = (1 - p_e)^{sf}$ ，其中 f 是分组长度， p_e 是误比特率，对于非相干 2FSK 调制， $p_e = \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha(d)}{2}}$ ， $\alpha(d)$ 是信噪比，如果噪声为 P_n ，那么，

$$\begin{aligned} \alpha(d) &= P_t - PL(d) - P_n \\ &= P_t - PL(d_0) - 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) - X_\sigma - P_n \end{aligned} \quad (3)$$

因此，与发送端距离为 d 的节点成功接收分组的概率为

$$p(d) = \left[1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha(d)}{2}} \right]^{sf}$$

2.3 相邻栅格、路径的可通概率

两个相邻栅格的可通概率为

$$p_{\text{neib_grid}} = \int_0^{d_{\text{grid}}} \int_0^{d_{\text{grid}}} \int_{d_{\text{grid}}}^{2d_{\text{grid}}} \int_0^{d_{\text{grid}}} p(d(x_1, y_1, x_2, y_2)) \frac{1}{d_{\text{grid}}^4} dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \quad (4)$$

假设节点服从密度为 λ_0 的泊松分布，那么，至少有一个节点落入栅格内的概率为 $p_{\text{node}} = 1 - e^{-\lambda_0 s_{\text{grid}}}$ ，其中 s_{grid} 是栅格的面积。

在考虑栅格是否有节点后，相邻栅格的可通概率为

$$p_{\text{neib_grid_node}} = p_{\text{neib_grid}} p_{\text{node}} \quad (5)$$

从以上几个等式可以看出，栅格越大， p_{node} 越大，但是 $p_{\text{neib_grid}}$ 越小；栅格越小， p_{node} 越小，但是 $p_{\text{neib_grid}}$ 越大。

因此, 存在一个适中的栅格大小, 使得相邻栅格的可通概率 $p_{\text{neib_grid_node}}$ 最大。

如果端到端的跳数为 k , 端到端路径的可通概率为

$$p_{\text{path}_k} = (p_{\text{neib_grid_node}})^k = (p_{\text{neib_grid}})^k (p_{\text{node}})^k \quad (6)$$

3 划分栅格的标准

在实际网络中, 如果只考虑圆盘通信模型, 以节点的最大通信范围划分栅格, 那么会导致网络的连通性差, 从而降低网络的分组递交率, 因此, 如何基于更接近实际的概率可通链路模型, 选择合适的栅格大小, 保证网络连通性, 是一个非常重要的问题。

另外, 在考虑了更接近实际的概率可通链路之后, 栅格越小, 一跳越近, 路径可通概率越大, 但是端到端跳数越多, 端到端能耗越大; 栅格越大, 一跳越远, 一跳的可通概率越小, 但是总跳数减少, 端到端能耗减小。因此, 如何在栅格大小和网络总能耗之间折衷, 是一个比较重要的问题。

使得分组递交率最好的栅格大小不一定使得网络的能量效率最好, 对于一个网络, 把二者结合起来考虑是一种比较实用的做法, 前者考虑了网络对用户要求的满足, 后者考虑了网络自身的性能, 首先需要保证网络的分组递交率, 在此基础上考虑能量效率问题。划分栅格的标准应当是满足用户对分组递交率 \bar{D} 要求的前提下, 使得网络的能量效率 $E_{\text{efficiency}}$ 最高。也就是 $\max E_{\text{efficiency}}, \text{ s.t. } \bar{D} \geq x\%$ 。

3.1 网络能量效率 $E_{\text{efficiency}}$

网络中的节点随机均匀分布在范围为 $X \times Y$ 的矩形区域内, 栅格边长为 d_{grid} , 那么, 网络被划分为 $X/d_{\text{grid}} \times Y/d_{\text{grid}}$ 的栅格。如果 Sink 位于第 $(x_{\text{Sink}}, y_{\text{Sink}})$ 号栅格, 且到 Sink 选择最短路径, 那么, (i, j) 号栅格到 Sink 的跳数为 $|x_{\text{Sink}} - i| + |y_{\text{Sink}} - j|$ 。另外, G 为网络中所有栅格的集合。

那么, 网络的能量效率定义为^[6]

$$E_{\text{efficiency}} = \frac{N_{\text{send}} r}{t_{\text{net}} e_t} \quad (7)$$

其中 N_{send} 为网络中所有节点发送的总分组数, r 为网络中所有分组的递交率, 在式(7)中, $N_{\text{send}} r = \sum_{(i,j) \in G} N_{\text{send_ij}} r_{ij}$ 。

$N_{\text{send_ij}}$ 为第 (i, j) 个栅格发送的分组个数, r_{ij} 为第 (i, j) 个栅格的分组到 Sink 的递交率, $r_{ij} = p_{\text{hop}}^{|x_{\text{Sink}} - i| + |y_{\text{Sink}} - j|}$ 。对于该地理栅格路由, 随机选择相邻栅格作为下一跳, 因此, $p_{\text{hop}} = p_{\text{neib_grid_node}} = p_{\text{neib_grid}} p_{\text{node}}$ 。 e_t 为一跳转发一个分组消耗的能量, 对于功率不可调整的网络, 每一跳的能耗相同, 且忽略侦听能耗, 即, $e_t = e_{\text{tx}} + e_{\text{rx}}$, t_{net} 为 N_{send} 个分组转发的跳数, 下面给出如何计算 t_{net} :

(1) 第 (i, j) 号栅格的分组总共转发的次数为

$$\begin{aligned} t_{(i,j)} &= \sum_{N_{\text{hop}}=1}^{|x_{\text{Sink}} - i| + |y_{\text{Sink}} - j|} N_{\text{send_ij}} p_{\text{hop}}^{N_{\text{hop}}} \\ &= \sum_{N_{\text{hop}}=1}^{|x_{\text{Sink}} - i| + |y_{\text{Sink}} - j|} N_{\text{send_ij}} p_{\text{neib_grid_node}}^{N_{\text{hop}}} \end{aligned} \quad (8)$$

(2) 全网总转发次数为

$$t_{\text{net}} = \sum_{(i,j) \in G} t_{(i,j)} \quad (9)$$

3.2 网络平均分组递交率 \bar{D}

网络的平均分组递交率定义为

$$\begin{aligned} \bar{D} &= \frac{\sum_{(i,j) \in G} N_{\text{send_ij}} p_{\text{hop}}^{|x_{\text{Sink}} - i| + |y_{\text{Sink}} - j|}}{\sum_{(i,j) \in G} N_{\text{send_ij}}} \\ &= \frac{\sum_{(i,j) \in G} N_{\text{send_ij}} p_{\text{neib_grid_node}}^{|x_{\text{Sink}} - i| + |y_{\text{Sink}} - j|}}{\sum_{(i,j) \in G} N_{\text{send_ij}}} \end{aligned} \quad (10)$$

4 性能仿真和分析

3000 个节点分别均匀分布在 $300\text{m} \times 300\text{m}$ 和 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 的矩形区域内, Sink 位于矩形区域的一个顶点。网络运行一轮内, 所有栅格的群首节点要向 Sink 发送一个分组, 发送的分组长度相同, 分组长度 $f = 8\text{byte}$ 。节点的发送功率为到达距离 $d = 50\sqrt{5}\text{m}$ 的功率。节点的初始能量为 0.4J 。

图 5 是分组递交率随着栅格边长的变化曲线图。可以看出, 在栅格边长比较小或者比较大时分组递交率比较小, 而当栅格处于合适大小时分组递交率比较高, 这是因为栅格比较小时, 由于栅格中没有节点导致分组丢弃率比较高; 栅格比较大时, 由于链路质量导致分组丢弃率比较高。另外, 网络范围越大, 分组递交率越低, 这是因为网络范围越大, 一个栅格中至少有一个节点的可能性变小并且路径的跳数变多。

图 6 是网络的能量效率随着栅格边长的变化曲线图。可以看出, 在栅格边长比较小或者比较大时网络的能量效率比较低, 而当栅格处于合适大小时能量效率比较高, 这是因为栅格比较小时, 由于栅格中没有节点导致分组丢弃率比较高; 栅格比较大时, 由于链路质量导致分组丢弃率比较高。而这些分组已经花费了网络的能量, 其中在转发过程中被丢弃, 使得转发一个分组的能量增大, 降低了网络的能量效率。另外, 网络范围越大, 能量效率越低, 这是因为网络范围越大, 一个栅格中有一个节点的概率越小, 而且路径的跳数增多, 导致分组递交率下降。

另外, 还可以看出, 分组递交率最好的栅格大小, 不一定就能够使得能量效率最好, 这是因为, 能量效率不仅与网络的分组递交率有关, 还与递交这些分组花费的能量有关。

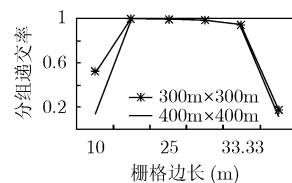


图 5 分组递交率随着栅格大小的变化曲线图

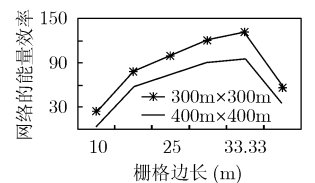


图 6 能量效率随着栅格大小的变化曲线图

依据本文给定的栅格大小确定标准,如果要求的网络分组递交率不小于 90%,对于 400m×400m 的情况,从图 5 可以看出,满足分组递交率要求的栅格大小在 20m~33.33m 之间,在此基础上,考虑能量效率,从图 6 可以看出,在栅格边长为 20m~33.33m 之间,33.33m 栅格大小时,网络的能量效率最好,因此,最佳的栅格边长为 33.33m,网络被划分为 12×12 的栅格。

网络寿命定义为网络能够以 90% 分组递交率运行的轮数。图 7 和图 8 分别是 3000 个节点分布在 400m×400m 范围内时,满足分组递交率 90% 的栅格边长的分组递交率以及能量效率随着网络运行的变化曲线图。可以看出,当栅格边长为 33.33m 时,网络寿命为 44 轮,为满足 90% 分组递交率的最大寿命。这进一步验证了分组递交率与能量效率相结合确定栅格大小的合理性。

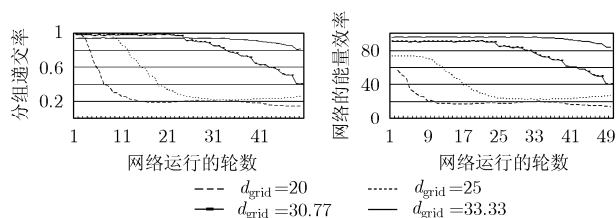


图 7 分组递交率随着网络运行的变化曲线图

图 8 网络的能量效率随着网络运行的变化曲线图

5 结束语

本文研究了概率可通链路的栅格路由,分别分析了使得网络分组递交率和网络能量效率最佳的栅格大小,并提出了同时考虑网络分组递交率和能量效率的栅格划分思想,该栅格划分机制可以很好地延长网络寿命。在研究中发现,选择下一跳栅格时,选择位于网络中间的栅格会提高网络分组递交率,但是文献[10]认为选择边界栅格会提高网络的能量均衡性能,如何在这两者之间折衷,是需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] Cerpa A, Wong J L, Kuang L, Potkonjak M, and Estrin D. Statistical model of lossy links in wireless sensor networks. ACM/IEEE Fourth International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05), Los Angeles, CA, April 25-27, 2005.
- [2] Zuniga M and Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. First IEEE International Conference on Sensor and Ad-hoc Communications and Networks (SECON'04), Santa Clara, CA, USA, October 4-7 2004: 517-526.
- [3] Zhou Gang, He Tian, Krishnamurthy Sudha, and Stankovic John A. Impact of radio irregularity on wireless sensor networks. The 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (Mobisys), Boston, MA, USA, June 06-09, 2004: 125-138.
- [4] De Couto D S J, Aguayo D, Bicket J, and Morris R. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 419-434.
- [5] Zuniga Marco, Seada Karim, Krishnamachari Bhaskar, and Helmy Ahmed. Efficient geographic routing over lossy links in wireless sensor networks. http://www-scf.usc.edu/~marcozun/publications/GeoRoutingOverLossyLinks_Final.pdf, 2006.
- [6] Li Chih-ping, Hsu Wei-jen, Krishnamachari Bhaskar, and Helmy Ahmed. A local metric for geographic routing with power control in wireless networks. IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), Santa Clara, California, USA, September 2005: 229-239.
- [7] Liao Wen-Hwa, Tsend Yu_Chee, and Sheu Jang-Ping. Grid: a fully location-aware routing protocol for mobile Ad hoc networks. *Telecommunication System*, 2001, 18(1): 37-60.
- [8] Xu Y, Heidemann J, and Estrin D. Geography-informed energy conservation for Ad hoc routing. The Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, July 2001: 70-84.
- [9] Theodore S Rappaport 著, 蔡涛, 李旭, 杜振民译. 无线通信原理与应用. 第一版. 北京: 电子工业出版社, 1999 年 11 月: 93-94.
- [10] Salhieh A, Weinmann J, Kochhal M, and Schwiebert L. Power efficient topologies for wireless sensor networks. International Conference on Parallel Processing, Valencia, Spain, Sep 2001: 156-163.
- [11] Theodore S Rappaport, Cai Tao, Li Xu, and Du Zhenmin. Principles and applications of wireless communication. 1st Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, Nov, 1999: 93-94.

刘湘雯: 女, 1977 年生, 博士生, 研究方向为无线网络路由。
 于宏毅: 男, 1963 年生, 博士生导师, 教授, 主要从事无线移动通信和信号与信息处理的研究。
 侯惠峰: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为无线网络路由。
 胡捍英: 男, 1961 年生, 博士生导师, 教授, 国家重大科技攻关项目“中国第三代移动通信系统研究开发项目”总体专家组成员。