

Researches on Communication Coverage for Wireless Sensor Network Based on RSSI *

NIE Yunfeng^{*}, SHU Jian, GONG Jiajie, CHEN Yebin

(College of Information and Engineering, Nanchang HangKong University, NanChang 330063)

Abstract: A novel algorithm for sensor node communication coverage prediction based on RSSI path lost collected by the neighbor nodes was presented. According to the spatial relationship, neighbor nodes were mapping to several non overlap sectors. By use of the least squares fitting method, a log distance path loss model was computed based on the RSSI path lost values for each sector. Then, the max radius of each sector was computed according to the path loss model and the given max signal attenuation threshold. Finally, all the sectors were overlapped to estimate the node communication coverage. Experimental results show that the method is simple and effectively improve the prediction accuracy of the node communication coverage.

Key words: wireless sensor network; communication coverage; RSSI; path loss model

EEACC: 5120C; 7230; 6150P

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.07.026

基于 RSSI 的无线传感器网络通信覆盖研究 *

聂云峰^{*}, 舒 坚, 龚佳杰, 湛业斌

(南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330063)

摘 要: 提出了一种利用邻居节点采集的 RSSI 路径损耗来估计传感器节点通信覆盖范围的新方法(NRRC)。首先将邻居节点按照空间关系映射到不同扇区集合, 对各扇区内的 RSSI 采样值进行最小二乘拟合得出相应扇区内的对数距离路径损耗模型, 然后根据损耗模型及给定信号衰减阈值求得各扇区对应的最大通讯半径; 最后将各扇区的覆盖范围进行叠加来估计节点通讯覆盖范围。实验结果表明该方法实现简单, 有效提高了节点通信覆盖的预测精度。

关键词: 无线传感器网络; 通信覆盖; RSSI; 路径损耗模型

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)07-1066-04

覆盖问题是无线传感器网络研究领域的基本问题, 是衡量无线传感器网络服务质量的重要评价因子^[1-2]。覆盖问题包含两个核心内容, 即通信覆盖和感知覆盖^[2-4], 其中通信覆盖直接影响网络连通性, 是网络正常工作的基础。通信覆盖指节点的信号发送能力所能到达的有效空间范围。相关研究表明, 通信覆盖问题会产生覆盖盲区^[2-6], 导致通信质量下降和大量数据包丢失, 严重时甚至出现网络分割问题^[5-10]。在无线传感器网络从理论研究走向大规模应用的新形势下, 加强无线传感器网络通信覆盖研究对无线传感器网络规划、诊断和维护具有重要意义。

为了简化网络覆盖问题, 现有研究通常采用理想圆形发射模型^[8-10]作为节点覆盖模型, 忽视无线

信号在传播过程中受地形、植被及障碍物影响而产生的信号衰减现象。理想圆盘模型过于简单且与实际情况相差很大, 导致部分覆盖控制算法在实际应用中出现失效。大量研究^[11-14]表明传感器节点的通信覆盖范围是不规则的。文献[12]对节点通信覆盖的不规则性进行了建模, 并运用 DOI 模型(Degree of Irregularity)对无线信号传播的不规则性进行定量描述, DOI 定义为角度每变化一个单位时, 信号传播方向上的最大传播距离变化。DOI 模型虽然揭示出 RSSI 呈不规则连续分布, 然而该模型是一个概率模型, 在实际应用中具有较大局限性。文献[13]对 DOI 模型进行了扩展, 结合对大量 RSSI 实测数据的分析, 提出更具操作性的 RIM 经验模型(Radio Irregularity Model), 然而 RIM 需要针对具体

项目来源: 国家自然科学基金项目(60773055)

收稿日期: 2010-12-18 修改日期: 2011-01-06

应用环境采集大量实验数据进行参数估计。此外,在移动通信领域,确定基站的无线信号覆盖范围,普遍采用信道测量的方式,即通过仪器进行具体的信道测量,采集 RSSI 路测数据,然后通过对经验模型进行校正,根据得到的校正模型计算无线信号覆盖范围,该方法具有精度高的优点,然而信道测试工作量很大,不适用于大规模密集部署的无线传感器网络应用。

基于以上分析,本文提出了一种通过邻居节点采集的 RSSI 信息来估计传感器节点通信覆盖范围的方法(NRRC),将邻居节点按照空间位置划分到不同扇区集合,通过对各扇区内的 RSSI 采样值进行最小二乘拟合,得出各扇区内的对数距离路径损耗模型,根据损耗模型及给定信号衰减阈值可求得该扇区对应的最大通讯半径;然后将各扇区进行叠加来估计节点通讯覆盖范围。

1 无线信道模型

无线信号传播的不规则性是无线通信系统不可忽视的现象,其影响因素很多,但大致可以分为设备和传输媒介两类影响因素。设备相关影响因素包括天线类型、发射功率、天线增益及信噪比阈值等;传输媒介相关因素包括介质类型、背景噪声及环境相关的因素如地形、植被及障碍物等。总的来看,无线信号传播损耗的不规则性是由传输媒介的各向异性及设备的异构性造成的。无线信道模型包括理论模型及经验模型,其中适用于无线传感器网络的模型主要有:自由空间传播模型、对数-常态分布模型、对数距离路径损耗模型及哈塔模型等。在实际应用环境中,由于多径、绕射及障碍物等因素,一般采用对数距离路径损耗模型,节点收到信号时的路径损耗为:

$$PL(d) [\text{dB}] = PL(d_0) + 10n \lg(d/d_0) \quad (1)$$

式中: d 为发射节点与接收节点之间的距离; d_0 为参考距离,单位为 m,通常取 1 m; n 为路径衰减因子,表示路径损耗随距离增加而增大的快慢程度,与具体环境有关; $PL(d_0)$ 表示参考距离为 d_0 时的路径损耗,单位为 dB。由式(1)简化可得路径损耗模型的一般表达式:

$$L = K_0 + K_1 \lg d \quad (2)$$

由(2)式可知,路径损耗 L 可表示为一个仅与 T-R 距离 d 有关的函数,路径损耗建模的核心内容就是针对特定应用环境及其 RSSI 采样数据,提供一组更具本地化特征的校准系数 $[K_0, K_1]$ 。

2 NRRC 算法

电池能量是无线传感器网络最为稀缺的资源,节点通信覆盖评估算法必须具备较少的通信开销和较低的实现复杂度。为了准确、低成本获取节点通讯覆盖范围,本文提出了直接通过邻居节点的 RSSI 采样值来估计节点通讯覆盖范围的 NRRC 算法。NRRC 算法基于网络节点均匀部署和节点位置已知两个基本假设,算法主要分为以下几个步骤:

① 传感器节点将采集到的路径损耗均值 $\{\text{NodeID}, \text{NeighbourID}, \text{RSSI_AVR}\}$ 上报至 Sink 节点,由 Sink 节点转发至后台 NRRC 计算程序。

② 对任意传感器节点,将其邻居节点按照空间位置关系映射至以该节点为圆心的 N 个互不重叠的扇区集合 S 。任意扇区可用四元组 $S_i = \{\text{Seq}, \text{Angle}, R, \text{Nodes}\}$ 来表示,其中:Seq 表示扇区编号,初始扇区从坐标横轴正向开始,按逆时针编号;Angle 表示扇区的角度; R 表示扇区半径;Nodes 表示扇区包含的传感器节点集合。定义参数 MAX 表示扇区包含的最大节点数,由于扇区数越多更能精确表达节点通信覆盖的不规则程度,这里取 $\text{MAX} = 4$ 。扇区集合的构造满足以下基本约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N S_i \cdot \text{Angle} = 360 \\ 2 \leq |S_i \cdot \text{Nodes}| \leq \text{MAX} \end{cases} \quad (3)$$

③ 对任意扇区 S_i 内的 RSSI 采样值进行最小二乘拟合,可得出扇区 S_i 相应的对数距离路径损耗模型。记扇区 S_i 的 RSSI 采样数据为 M 组,某邻居节点采样的实际路径损耗记为 L_k ,由式(2)计算所得的预测路径损耗为 \hat{L}_k 。由于测量误差的存在, L_k 与 \hat{L}_k 必定存在一定差值,根据最小二乘理论,使得误差平方和最小,即:

$$E(K_0, K_1) = \sum_{k=1}^M (L_k - \hat{L}_k)^2 = \sum_{k=1}^M [L_k - (K_0 + K_1 \lg d_k)]^2 = \min \quad (4)$$

将式(4)对 K_0, K_1 求偏导,令偏导数等于 0 可得:

$$\begin{cases} -2 \sum_{k=1}^M [L_k - (K_0 + K_1 \lg d_k)] = 0 \\ -2 \lg d_k \sum_{k=1}^M [L_k - (K_0 + K_1 \lg d_k)] = 0 \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)简化,可得:

$$\begin{cases} M \cdot K_0 + \left(\sum_{k=1}^M \lg d_k \right) \cdot K_1 = \sum_{k=1}^M L_k \\ \left(\sum_{k=1}^M \lg d_k \right) \cdot K_0 + \left(\sum_{k=1}^M \lg^2 d_k \right) \cdot K_1 = \sum_{k=1}^M (L_k \cdot \lg d_k) \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)进行求解即可获取修正后的参数 $[K_0, K_1]$,进而得到经本地化校准的信号损耗模型 $L = K_0 + K_1 \lg d$ 。

④对任意扇区 S_i ,若给定信号衰减阈值 MAX_LOST ,根据下式可求得该扇区对应的最大通讯半径 R :

$$R = \exp\left[\left(\frac{MAX_LOST - K_0}{K_1}\right) \cdot \ln 10\right] \quad (7)$$

⑤最后,根据各扇区的角度及求得的最大通信半径可得出各扇区的通信覆盖范围,将所有扇区进行叠加其并集即为节点的通讯覆盖范围。

3 实验分析

为验证所提出算法的有效性,进行了实际传感器节点实验。实验场地选择在空旷的足球场;传感器节点采用 CrossBow 公司的 Telosb 节点;无线收发芯片采用 CC2420,工作频率为 2.4 GHz;传感器节点放置高度均为 0.75 m;发射节点功率设置为 7(-15 dBm),每 100 ms 发送一个数据包,每个测试周期连续发送 200 个数据包;设置路径损耗阈值 $MAX_LOST = 95$ dB。

实验分为两个部分进行。实验一目的在于精确测定传感器节点在给定最大路径损耗阈值 95 dB 时的通信覆盖范围,为 NRRC 算法的预测结果进行验证,其实验步骤为:固定 0 号节点为数据发送节点,1 号节点为数据接收节点;以正北为初始方位,1 号节点以 5° 为步长,逆时针绕 0 号节点旋转 360° ;在每旋转一个步长所对应的射线上,记录 1 号节点测得 RSSI 路径损耗为 95 dB 处的距离及当前射线角度;将记录的 1 号节点位置用平滑曲线相连,即得 0 号节点的实际通信覆盖范围。实验二的目的是获取邻居节点接收信号时的 RSSI 路径损耗值,为了提高效率,利用 10 个数据接收节点,在 0 号节点周围随机测试 300 个位置并记录各采样点的坐标及路径损耗均值。对数据进行预处理,首先舍弃路径损耗大于 95 dB 的数据,得到有效数据 216 个;其次,为简化计算,将样本数据的直角坐标映射为极坐标,并按角度大小进行排序;最后对排序后的数据,随机抽取 12、24、36、48、60、72、84、96、108、120 个样本数据构成 10 组邻居集合。图 1 为节点邻居数量分别为 12、48 和 72 时 NRRC 算法预测的覆盖范围与实际覆盖范围的对比情况。图 1(a)、图 1(b)及图 1(c)表明邻居节点数越多, NRRC 算法预测的覆盖范围与实际覆盖范围越接近,充分说明本文算法的有效性。

定义 NRRC 预测范围为 S_{nrcc} ,实际覆盖范围为 S ,则面积误差 E 可定义为:

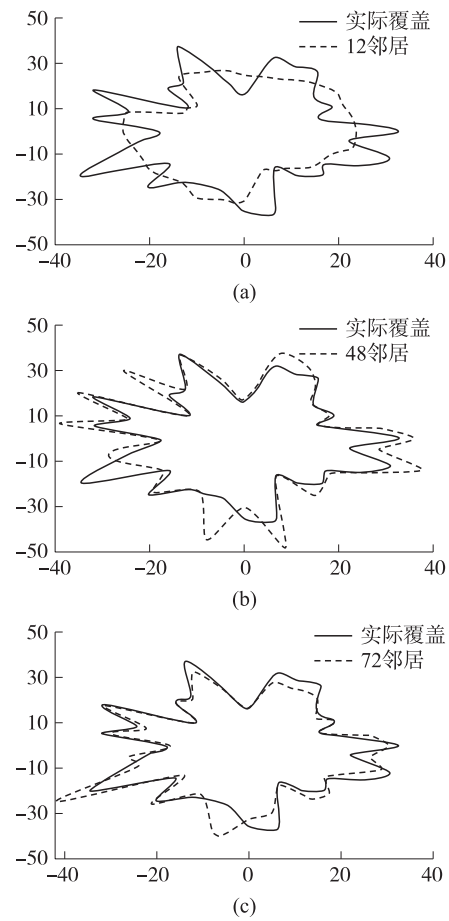


图1 NRRC 算法预测结果与实际信号覆盖对比

$$E = \left(1 - \frac{S \cap S_{nrcc}}{S}\right) \cdot 100\% \quad (8)$$

由式(8)计算上述 10 组 NRRC 预测结果与实际覆盖范围的面积误差,如图 2 所示。图 2 表明:随着邻居节点数目的增加,面积误差率呈逐渐减少趋势;邻居节点数在 12~48 区间,面积误差率呈迅速减少趋势;邻居节点数在 48~72 区间,面积误差率呈较快减少趋势;邻居节点数在 72~120 间面积误差率呈缓慢减少趋势;邻居节点数为 12 时,面积误差率最大,高达 26.6%,说明 NRRC 算法对邻居节点的数量较为敏感,节点数越少,预测误差越大;邻居节点数约为 60~72 时,面积误差率已小于 10%,说明 NRRC 算法具有理想的预测效果;邻居节点数

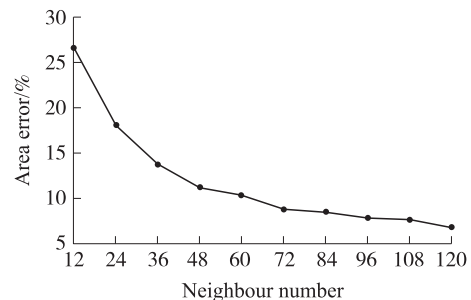


图2 NRRC 算法预测结果误差

为 120 时,面积误差率最小,仅为 6.8%,此时由于邻居节点数足够多,预测范围已十分逼近实际覆盖范围,然而由于无线信号传播的复杂性,NRRC 算法并不能完全准确预测出节点的实际通信范围。

4 结论

无线信号传播的不规则性是无线通信系统不可忽视的现象。DOI 模型和 RIM 模型对无线信号传播的不规则度进行了定量描述,揭示出 RSSI 路径损耗呈不规则连续分布,然而该类模型需针对具体应用环境采集大量实验数据进行模型校正,因此在实际应用中具有较大局限性。本文算法直接通过邻居节点采集的 RSSI 路径损耗来估计传感器节点通信覆盖范围,将邻居节点按照空间位置划分到不同扇区集合,通过对各扇区内的 RSSI 采样值进行最小二乘拟合,得出各扇区内的对数距离路径损耗模型,根据损耗模型及给定信号衰减阈值可求得该扇区对应的最大通讯半径,通过将各扇区进行叠加来估计节点通讯覆盖范围。实验结果表明该方法实现简单,不需要进行具体实验,在保证一定邻居节点数量的情况下,能够充分逼近节点实际通信覆盖范围,有效提高了节点通信覆盖的预测精度。

本文算法针对密集部署的无线传感器网络应用,具有较好的预测效果,其预测结果对无线传感器网络的诊断和维护具有较大应用价值;对于节点稀疏部署的应用,如何提高算法的预测精度,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, et al. Coverage Problems in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks [C]//*IEEE Infocom*, April 2001, 3: 1380-1387.
- [3] Abrams Z, Goel A, Plotkin S. Set k-Cover Algorithms for Energy Efficient Monitoring in Wireless Sensor Networks [C]//*Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks*. Berkeley: ACM Press, 2004: 424-432.
- [4] Carbanar B, Grama A, Vitek J, et al. Coverage Preserving Redundancy Elimination in Sensor Networks [C]//*Proc. of the 1st IEEE Conf. on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, Santa Clara: IEEE Press, 2004: 377-386.
- [5] 刘明,曹建农,郑源,等.无线传感器网络多重覆盖问题分析[J]. *软件学报*, 2007, 18(1): 127-136.
- [6] 毛莺池,冯国富,陈力军,等.与位置无关的无线传感器网络连通性覆盖协议[J]. *软件学报*, 2007, 18(7): 1672-1684.
- [7] 屈玉贵,蔺智挺,赵保华.无线传感器网络的 WPCS 覆盖策略[J]. *电子与信息学报*, 2007, 23(2): 486-493.
- [8] 蒋杰,方力,张鹤颖,等.无线传感器网络最小连通覆盖集问题求解算法[J]. *软件学报*, 2006, 17(2): 175-184.
- [9] 崔莉,鞠海玲,苗勇,等.无线传感器网络研究进展[J]. *计算机研究与发展*, 2005, 42(1): 163-174.
- [10] 刘丽萍,王智,孙优贤.无线传感器网络部署及其覆盖问题研究[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(9): 1752-1777.
- [11] 方震,赵湛,郭鹏,等.基于 RSSI 测距分析[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(11): 2526-2530.
- [12] Wu C H, Chung Y C. Heterogeneous Wireless Sensor Network Deployment and Topology Control Based on Irregular Sensor Model [C]//*Second International Conference, GPC2007, Paris: IEEE Press*, 2007: 78-88.
- [13] Zhou G, He T, Krishnamurthy S, et al. Models and Solutions for Radio Irregularity in Wireless Sensor Networks [J]. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 2006, 2(2): 221-262.
- [14] He T, Huang C, Blum B M, et al. Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks [C]//*Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, San Diego: IEEE Press, 2003: 81-95.



聂云峰(1980-),男,博士,讲师,主要研究方向为无线传感器网络,遥感与地理信息系统,niyunf@gmail.com。



舒 坚(1964-),男,江西靖安人,教授,硕士生导师,主要研究方向为无线传感网络、嵌入式系统和软件工程。