WSNs 中面向定位应用的参考点覆盖性能研究 *

弭 雪, 赵 海, 朱 剑
(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘 要: 由于传感器节点具有传感与通信两个功能,基于传感器网络的定位参考点选择不能仅仅考虑定位性能或网络通信性能,根据不同的传感半径与通信半径选择不同的设置方案成为一个亟待解决的问题。为此,对比分析了三种常见的规则网络拓扑结构的性能,提出了一种参考点设置方法。实验结果表明只有依据通信半径与传感半径的关系设置参考点才能够达到较优的覆盖效果。

关键词: 无线传感器网络; 通信半径; 传感半径; 覆盖性能; 定位
中图分类号: TP391 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2012)01-0095-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.026

Research on coverage performance of reference points oriented nodes localization for WSNs

MI Xue, ZHAO Hai, ZHU Jian
(*School of Information Science & Engineering*, *Northeastern University*, *Shenyang* 110819, *China*)

Abstract: As the sensor nodes have two functions: sensing and communication, reference point selection based on wireless sensor networks doesn't only consider the localization performance or the network communication performance. Therefore, selecting node setting method according to different communication radius and sensing radius becomes a considering question. This paper comprised and analysised the performance of three common regular topology and proposed a novel method for reference points setting. The experiment result shows that only by setting reference points according to the relationship between communication radius and the sensing radius, can optimize the coverage performance.

Key words: wireless sensor networks; communication radius; sensing radius; coverage performance; localization

定位技术[1]是无线传感器网络的一个研究热点,相关成果能够广泛应用于军事应用、矿井定位、抢险救灾等领域[2~5]。然而作为定位技术的基础——定位参考点选择[6]一直是一个亟待解决的难点。

由于无线传感器节点具有传感与通信两种功能,传统的参考点选择与布设(如蜂窝布设)方案难以取得较优的性能,运行结果要么获得了较高的定位覆盖性能,却牺牲了较多的通信覆盖效果,降低了网络性能;要么取得了较高的网络连通性,牺牲了定位覆盖效果,最终应用效果难以达到用户需求[7~9]。其原因是传统的解决方法忽略了传感半径与通信半径之间的关系,不同的半径关系对应的最终布设结果也是不一样的。

针对上述问题,本文给出了传感半径 R_s 与通信半径 R_c 两个概念,并结合现有的正四边形、正六边形、正三角形三种规则参考点布局方案进行分析讨论并得出结论。

1 模型建立与分析

在实际应用中,比较常见的三种规则布局是正四边形、正六边形、正三角形,如图 1 所示,传感器节点将被放置在各个多边形的顶点上。

图 1 显示了正四边形布局会使每个传感器节点的连通度为 4;正六边形布局会使每个传感器节点连通度为 3;正三边形会使每个传感器节点连通度为 6。由于图 1 中的各个图形都是拓扑可复制的,因此为了方便描述,本文取出各个图形中的两个拓扑单元作为研究对象。

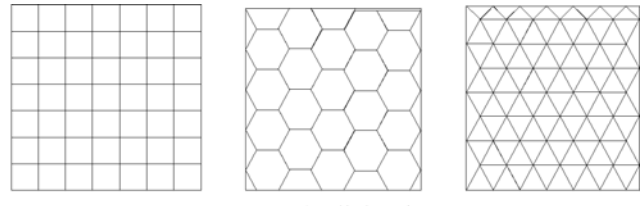

图1 三种网络布局方法

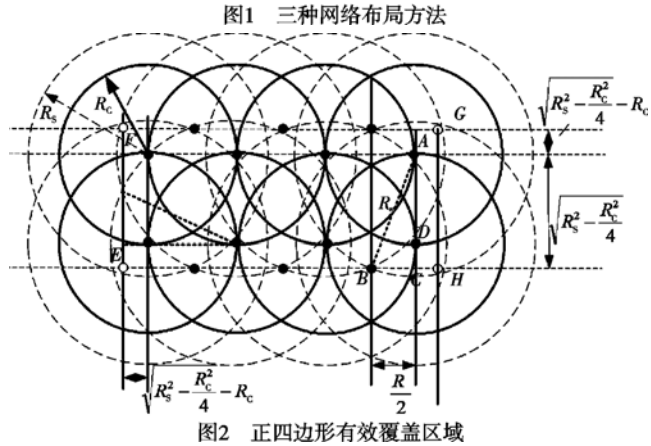

图2 正四边形有效覆盖区域

a)以正四边形布局方法为例,如图 2 所示。图中黑点为传感器节点,以黑点为圆心的实线圆对应的半径为连通半径 R_c;以黑点为圆心的虚线圆对应的半径为传感半径 R_s。为了方便

收稿日期: 2011-05-16; **修回日期**: 2011-06-20 **基金项目**: 国家教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金资助项目(708026)
作者简介: 弭雪(1981-),女,辽宁沈阳人,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、普适计算与嵌入式系统等(mixueneu@126.com); 赵海(1959-),男,辽宁沈阳人,教授,博导,主要研究方向为无线传感器网络、普适计算等.

讨论,本文用两组平行线来标定完全被三重覆盖的区域。从几何意义上不难看出,图 2 中的局部单元内,只有两条平行虚线 GF、EH 与垂直方向上的两条平行实线 GH、EF 构成的矩形 $GHEF$ 区域能够完全达到三重覆盖,本文称这样的区域为有效覆盖区域。

定义 1　有效覆盖率 μ。有效覆盖区域占所有覆盖面积比率,计算式如下:

$$\mu=\frac{\text{有效覆盖区域面积}}{\text{总覆盖面积}}$$

有效覆盖率能够很好地反映某种布局方法对应的覆盖性能,μ 值越大,说明该布局方法在覆盖度上的效果越好;有效覆盖率越高,并不代表有效覆盖区域面积越大;当总覆盖面积一定时 μ 值越大,有效覆盖区域面积越大。

多边形的两个顶点距离均为通信半径 R_c,即每个传感器节点的通信半径均为 R_c,且处于相邻顶点的两传感器节点刚好能够通信。

图 2 中,$AB=R_s$、$BC=R_c/2$、$AD=R_c$,因此

$$DC=AC-AD=\sqrt{R_s^2-\frac{R_c^2}{4}}-R_c \tag{1}$$

$$GH=2DC+AD=2\sqrt{R_s^2-\frac{R_c^2}{4}}-R_c \tag{2}$$

同理可以计算出图 2 中有效覆盖矩形区域的长 EH 为

$$EH=R_c+2\sqrt{R_s^2-\frac{R_c^2}{4}} \tag{3}$$

因此,图 2 正四边形布局的有效覆盖率为

$$\mu_{\text{four}}=\frac{S_{GCEF}}{8\pi R_s^2}=\frac{EH\times GH}{8\pi R_s^2}=\frac{\left(R_c+2\sqrt{R_s^2-\frac{R_c^2}{4}}\right)\left(2\sqrt{R_s^2-\frac{R_c^2}{4}}-R_c\right)}{8\pi R_s^2} \tag{4}$$

b)以正六边形布局方法为例,如图 3 所示。图中的局部单元内,只有过传感圆交点的两条平行虚线 AD、BC 与垂直方向上的两条平行实线 AD、BC 构成的矩形 $ABCD$ 区域能够完全达到三重覆盖。

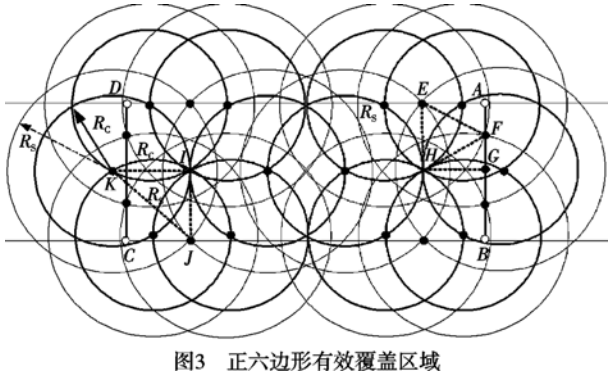

图3　正六边形有效覆盖区域

按照有效覆盖率的定义,首先求出矩形 $ABCD$ 的面积,由于 $KJ=R_s$、$KI=R_c$,因此

$$JI=\sqrt{R_s^2-R_c^2} \tag{5}$$

由图 3 的对称性可以看出:

$$DC=2JI=2\sqrt{R_s^2-R_c^2} \tag{6}$$

同理,由对称性可得 $GA=JI$,又因为 $EH=EF$(对称性)、$\angle EHF$ 等于 60°,因此△EFH 为等边三角形,即 $EF=HF$。

又因为 $EA=HG$,且△EAF 与△HGF 均为直角三角形,所以△EAF≌△HGF,因此

$$AF=GF=\frac{GA}{2}=\frac{\sqrt{R_s^2-R_c^2}}{2} \tag{7}$$

$$HF=HE=GA=\sqrt{R_s^2-R_c^2} \tag{8}$$

因此

$$HG=\sqrt{HF^2-GF^2}=\frac{\sqrt{3(R_s^2-R_c^2)}}{2} \tag{9}$$

又因为

$$BC=3R_c+2HG=3R_c+2\sqrt{3(R_s^2-R_c^2)} \tag{10}$$

因此,正六边形的有效覆盖率为

$$\mu_{\text{six}}=\frac{S_{ABCD}}{12\pi R_s^2}=\frac{BC\times DC}{12\pi R_s^2}=\frac{2\sqrt{R_s^2-R_c^2}\left(3R_c+2\sqrt{3(R_s^2-R_c^2)}\right)}{12\pi R_s^2} \tag{11}$$

c)以正三边形布局方法为例,并将该方法的两个拓扑单元进行局部放大,如图 4 所示。

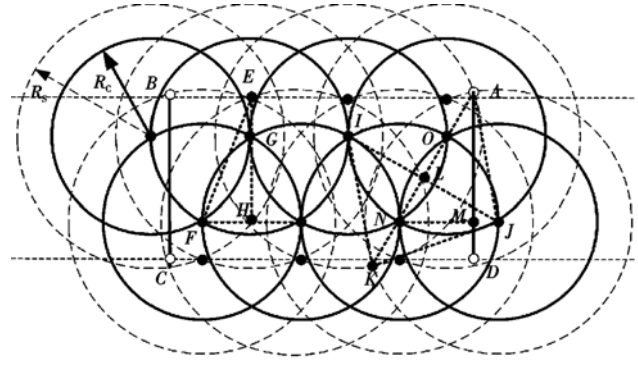

图4　正三边形有效覆盖区域

图 4 中的局部单元内,只有过传感圆交点的两条平行虚线 AB、DC 与垂直方向上的两条平行绿色实线 AB、DC 构成的矩形 $ABCD$ 区域能够完全达到三重覆盖。

按照有效覆盖率的定义,首先求出矩形 $ABCD$ 的面积,由于 $EF=R_s$、$FH=R_c/2$,因此

$$EH=\sqrt{R_s^2-\frac{R_c^2}{4}} \tag{12}$$

$$EG=EH-GH=\sqrt{R_s^2-\frac{R_c^2}{4}}-\frac{\sqrt{3}R_c}{2} \tag{13}$$

因此,由对称性可知矩形 $ABCD$ 的宽 BC 为

$$BC=GH+2EG=2\sqrt{R_s^2-\frac{R_c^2}{4}}-\frac{\sqrt{3}R_c}{2} \tag{14}$$

由于 $IK=R_s$,$IL=\frac{\sqrt{3}R_c}{2}$,因此 LK 可以被求出。

$$LK=\sqrt{IK^2-IL^2}=\sqrt{R_s^2-\frac{3R_c^2}{4}} \tag{15}$$

由对称性原理可知 $LK=LA$,因此 AN 为

$$AN=LA+LN=\sqrt{R_s^2-\frac{3R_c^2}{4}}+\frac{R_c}{2} \tag{16}$$

又因为 $\angle ANM=60°$,因此 $MN=AN/2$。到此,矩形 $ABCD$ 的长 AB 可以求出。

$$AB=2MN+\frac{3R_c}{2}=\sqrt{R_s^2-\frac{3R_c^2}{4}}+2R_c \tag{17}$$

因此,正三边形的有效覆盖率为

$$\mu_{\text{three}}=\frac{S_{ABCD}}{8\pi R_s^2}=\frac{BC\times AB}{8\pi R_s^2}=\frac{\left(2\sqrt{R_s^2-\frac{R_c^2}{4}}-\frac{\sqrt{3}R_c}{2}\right)\left(\sqrt{R_s^2-\frac{3R_c^2}{4}}+2R_c\right)}{8\pi R_s^2} \tag{18}$$

至此,图 1 中的三种布局方法对应的有效覆盖率均已被求解出。

2　性能对比分析

上一章描述了正四边形、正六边形、正三边形对应的有效覆盖率。有效覆盖率能够反映一种布局方法的性能,有效覆盖率越大,则该布局方法需要的资源越少。令 $R_s = \lambda R_c$,则上述三种布局方法对应的有效覆盖率可以变形成如下方程:

$$\mu_{four} = \frac{(R_c + 2\sqrt{R_s^2 - \frac{R_c^2}{4}})(2\sqrt{R_s^2 - \frac{R_c^2}{4}} - R_c)}{8\pi R_s^2} = \frac{(R_c + 2\sqrt{\lambda^2 R_c^2 - \frac{R_c^2}{4}})(2\sqrt{\lambda^2 R_c^2 - \frac{R_c^2}{4}} - R_c)}{8\pi\lambda^2 R_c^2} = \frac{R_c^2(1 + 2\sqrt{\lambda^2 - \frac{1}{4}})(2\sqrt{\lambda^2 - \frac{1}{4}} - 1)}{8\pi\lambda^2 R_c^2} = \frac{(1 + 2\sqrt{\lambda^2 - \frac{1}{4}})(2\sqrt{\lambda^2 - \frac{1}{4}} - 1)}{8\pi\lambda^2} \tag{19}$$

$$\mu_{six} = \frac{2\sqrt{R_s^2 - R_c^2}(3R_c + 2\sqrt{3(R_s^2 - R_c^2)})}{12\pi R_s^2} = \frac{2\sqrt{\lambda^2 R_c^2 - R_c^2}(3R_c + 2\sqrt{3(\lambda^2 R_c^2 - R_c^2)})}{12\pi\lambda^2 R_c^2} = \frac{2R_c^2\sqrt{\lambda^2 - 1}(3 + 2\sqrt{3(\lambda^2 - 1)})}{12\pi\lambda^2 R_c^2} = \frac{\sqrt{\lambda^2 - 1}(3 + 2\sqrt{3(\lambda^2 - 1)})}{6\pi\lambda^2} \tag{20}$$

$$\mu_{three} = \frac{(2\sqrt{R_s^2 - \frac{R_c^2}{4}} - \frac{\sqrt{3}R_c}{2})(\sqrt{R_s^2 - \frac{3R_c^2}{4}} + 2R_c)}{8\pi R_s^2} = \frac{(2\sqrt{\lambda^2 R_c^2 - \frac{R_c^2}{4}} - \frac{\sqrt{3}R_c}{2})(\sqrt{\lambda^2 R_c^2 - \frac{3R_c^2}{4}} + 2R_c)}{8\pi\lambda^2 R_c^2} = \frac{(2R_c^2\sqrt{\lambda^2 - \frac{1}{4}} - \frac{\sqrt{3}}{2})(\sqrt{\lambda^2 - \frac{3}{4}} + 2)}{8\pi\lambda^2 R_c^2} = \frac{(2\sqrt{\lambda^2 - \frac{1}{4}} - \frac{\sqrt{3}}{2})(\sqrt{\lambda^2 - \frac{3}{4}} + 2)}{8\pi\lambda^2} \tag{21}$$

用 MATLAB 将式(19)~(21)的结果显示于图 5 中,由于在本文的路径规划应用中,传感半径 R_s 大于连通半径 R_c,因此,$\lambda > 1$,一般情况下,λ 也不会太大,因此图 5 仅仅显示了 λ 在区间[1,4]的函数段。

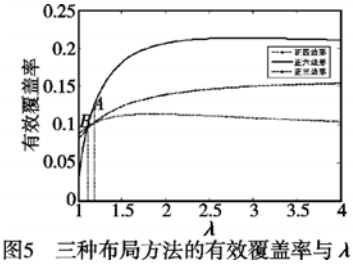

图5　三种布局方法的有效覆盖率与 λ 的关系

各条函数曲线的大体走势相同,即随着 λ 的增加有效覆盖率会增加到一个峰值,继续增加 λ 有效覆盖率反而会有所下降。因此在实际应用中采用某种布局指导策略时,合理地设定传感半径与通信半径的比值 λ 将会提高有效覆盖率。图 5 中 A 点的横坐标为 1.201,B 点的横坐标为 1.109,可以得出如下几个结论:

a)当 $\lambda \in [1, 1.109]$ 时,$\mu_{three} > \mu_{four} > \mu_{six}$,此时正四边形的有效覆盖率最高,其次是正三边形,正六边形有效覆盖率最差;正三边形的连通度要比正四边形、正六边形的连通度分别高 2、3,在本文路径规划算法中,连通度越高,最终的能量均衡程度就越高。因此,当 $\lambda \in [1, 1.109]$ 时正三边形布局方法毋庸置疑地成为首选。

b)当 $\lambda \in [1.109, 1.201]$ 时,$\mu_{six} > \mu_{three} > \mu_{four}$,此时正六边形的有效覆盖率最高,其他两者接近。在 $\lambda \in [1.109, 1.201]$ 区间上,正六边形的有效覆盖率的优势不是太明显,加上六边形对应的度值较低,因此在路径规划中应该根据用户的侧重进行选择。

c)当 $\lambda \in [1.201, 4]$ 时,$\mu_{six} > \mu_{four} > \mu_{three}$,此时正六边形的有效覆盖率最高,并且优势明显。综合来看,尽管正六边形连通度值较低,但是明显的有效覆盖率优势表明此时使用正六边形布局将会大大降低节点设施数量需求,这在实际应用中更具有价值。

结合上述三点结论,用户可以根据实际硬件平台对应的 λ 值选择相应的布局方法,以达到预期的目标。本文仅列出了三种常见布局方法,其他方法的性能可以通过相同的步骤获得。

3　结束语

不同传感器节点的通信半径与传感半径不同,不同的参考点设置对网络性能影响很大,为此,本文对比分析了三种常见的规则网络拓扑结构的性能,提出了一种拓扑研究方法。实验结果表明只有依据通信半径与传感半径的关系设置参考点才能够最优化网络性能。研究结果对网络拓扑及参考点的设置研究具有积极的指导意义。

参考文献:

[1] 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. 软件学报, 2005,16(5):857-868.

[2] YEDAVALLI K,KRISHNAMACHARI B. Sequence-based localization in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2008,7(1): 81-94.

[3] BAHL P,PADMANABHAN V N. RADAR:an in-building RF-based user location and tracking system[C]//Proc of the 19th Annual Joint Conference of IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway: IEEE Press,2000:775-784.

[4] HOSSAIN A M K M,Van NGUYEN H,SOH W S. Fingerprint-based location estimation with virtual access points[C]//Proc of the 17th International Conference on Computer Communications and Networks. Piscataway: IEEE Press,2008:485-490.

[5] CHEN Hong-yang, HUANG Pei, MARTINS M,*et al*. Novel centroid localization algorithm for three-dimensional wireless sensor networks [C]//Proc of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-4.

[6] ZARUBA G V,HUBER M, KAMANGAR F A. Indoor location tracking using RSSI readings from a single Wi-Fi access point[J]. Wireless Networks, 2007,13(2):221-235.

[7] ZORZI M. Power control and diversity in mobile radio cellular systems in the presence of Ricean Fading and log-normal shadowing[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology,1996,45(2): 373-382.

[8] ZAHABY M, GAONJUR P, FARAJIAN S. Location tracking in GPS using Kalman filter through SMS[C]//Proc of International Conferente on Computer as a Tool. Piscataway: IEEE Press, 2009:1707-1711.

[9] ZHOU Yong, XIA Shi-xiong, DING Shi-fei,*et al*. An improved APIT node self-localization algorithm in WSN based on triangle-center scan [J]. Journal of Computer Research and Development,2009,46(4):566-574.