

南京邮电大学

硕士学位论文

基于RSSI的无线传感器网络定位算法研究

姓名：赵飞

申请学位级别：硕士

专业：测试计量技术与仪器

指导教师：陈小惠

2011-02

## 摘 要

无线传感器网络中节点定位技术是其主要的支撑技术之一，只有节点自身可以正确定位才能提供监测事件的位置信息。随着无线传感器网络技术的不断成熟进步，其在实际生活中的应用也将越来越广泛，节点定位技术研究对于传感器网络技术的提高有着重要的理论意义和应用价值。

本文基于无线传感器网络中的定位系统对节点定位技术进行了研究。主要的研究内容和结论如下：

(1) 对无线传感器网络技术的国内外研究现状进行了总结，并研究分析了无线传感器网络及其关键技术和应用，重点对无线传感器网络中的各定位技术和定位算法进行了研究和分析，总结分析了定位技术中有待解决的问题。

(2) 基于 RSSI 校验的无线传感器网络节点定位算法：本文通过将 RSSI 定位系统与数学工程中最优化问题结合在一起研究分析了基于 RSSI 测距的 BFGS 定位算法，该方法把无线传感器网络节点的定位问题转化为无约束的最优化问题。最后的仿真结果验证了该算法在环境适应性方面明显优于其它相关算法。

(3) 在当前信号模型的基础上对 Shadowing 模型和质心定位算法进行了优化，首先对信号模型的参考节点选取进行了有效约束，然后对选取的优选节点进行三边测试，对未知节点进行估计，最终使用加权质心算法，实现更精确的定位。RSSI 定位系统中锚节点与未知节点的距离对定位结果有一定的影响，距离越近的锚节点对未知节点的定位影响越大，反之越小，基于此对质心算法进行距离加权，利用加权系数来体现锚节点对未知节点决定权的大小。我们把 Shadowing 信号传播模型和质心算法与结合在一起进行模拟仿真，结果显示该定位系统可以有效提高未知节点的定位精度，提高系统定位性能。

**关键词：** 无线传感器网络定位，RSSI，信道模型，BFGS，锚节点

## Abstract

Node localization technology is one of the important supporting technologies in wireless sensor networks technology. It is obviously that the technology of wireless sensor networks will go-ahead very quickly and its applications will be wider and wider in the coming future, sensor node localization technology has improved the wireless networks technology in theoretical significance and application value.

The dissertation focuses on the discussion of the localization technologies of professional applications based on wireless sensor networks. The major analyses and findings are as follows:

(1) Summarize the wireless sensor networks technology research status and analyze the key technology and applications of wireless sensor networks, emphasize on the sensor node localization technology and the positioning algorithm in wireless sensor networks, propose the positioning problems to be solved in localization technology.

(2) Design and implementation of A RSSI-based Localization Algorithm: By the way of combining RSSI method and optimization in mathematics engineering, the dissertation proposes BFGS Localization Algorithm based on RSSI Localization Algorithm. The method is to set the wireless sensor network node Localization issue into unconstrained optimization issue. The paper discusses the main features of the algorithm and compare it with the similar algorithm. Finally, it is proved that this algorithm is obviously superior to other algorithms through MATLAB simulation on environmental adaptability.

(3) Optimize the Shadowing signal model and centroid localization algorithm based on the current signal model, firstly, select the reference nodes for signal model with an effective constraint, then do the triangular test for the selected reference nodes above to estimate the unknown nodes, finally, use weighted centroid localization algorithm to achieve more accurate node localization. The range between anchor nodes and unknown nodes in RSSI localization system have an effect on the localization results, the closer, the more. So we can weigh the centroid algorithm based on distance, using the weighted coefficient to reflect the importance of the anchor nodes on the localization results of unknown nodes. Finally, simulate the centroid algorithm based on the signal model on MATLAB, the simulation results show that the positioning system can improve the positioning accuracy of the unknown nodes and the system positioning performance.

**Key words:** Localization in wireless sensor networks, RSSI, signal model, BFGS, anchor nodes

## 南京邮电大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京邮电大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

## 南京邮电大学学位论文使用授权声明

南京邮电大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。本文电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权南京邮电大学研究生部办理。

研究生签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是在因特网普及之后, 将对人类的生活方式产生重大影响的IT技术之一。它是由部署在监测区域周围的大量的微型传感器节点组成, 通过无线通信方式形成一个多跳的自组织的网络系统, 其目的是相互协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中监测对象的信息, 并发送给观察者。传感器、监测对象和观察者构成了无线传感器网络的三个主要要素。计算技术、微电子技术和无线电通信技术等技术飞速进步, 推动了多功能低功耗传感器的快速发展, 在传感器微小的体积内能够进行集成信息采集、无线通信和数据处理等多种功能。人们可以通过无线传感器网络来直接地感知客观世界, 作为对现有因特网的一种扩展并极大提高了人类认知世界的能力。如果说因特网构成了思维逻辑上的信息世界, 改变了人们之间的沟通方式, 那么, 无线传感器网络便是将思维逻辑上的信息世界与客观存在的物理世界融合为一体, 来改变人类与自然界的交互方式。美国MIT技术和商业周刊评论在预测未来高新技术发展的一项报告中, 分别将无线传感器网络评为改变世界的十大技术和 21 世纪最有影响的 21 项技术之一。仿生人体器官、塑料电子学和无线传感器网络被称为人类未来发展的三大高科技产业<sup>[1]</sup>。

## 1.2 国内外研究现状

20 世纪 90 年代中后期, 无线传感器网络技术引起了学术界、军界和工业界广泛的关注, 得到了快速的发展。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration NASA)、美国先进国防研究项目局(DARPA-Defense Advanced Research Projects Agency)等支持常春藤高校、科研单位等具有一定实力的部门进行无线传感器领域的研究, 1994 年加州大学洛杉矶分校的William J.Kaiser教授向DARPA提交了建议书“Low Power Wireless Integrated Micro sensors”, 对推动无线传感器网络的研究具有里程碑的意义。进入 21 世纪以来, 发达国家相继启动了许多关于传感器网络的研究计划。美国国防高级研究计划署(DARPA)在 1993 年资助开展了无线集成传感器网络WINS项目, 涉及MEMS传感器和接收器、网络协议设计、信号处理结构和检测理论的基本原理等方面; 1995 年, 美国国家交通部正式提出“国家智能交通系统项目规划”, 该规划试图建立一个实时的、准确的、大范围的、高效的综合交通运输管

理系统,主要途径是要整合通信技术、传感器技术、微电子技术以及计算机数据处理于一体。该系统利用WSNs来监视每一辆汽车的运行状况,如发动机调速、汽车制动等,对潜在的危险发出警告,使车辆保持在低耗高效的最佳运行状态。1996年DARPA资助开展了 $\mu$ AMPS项目,设计出低功耗的 $\mu$ AMPS-I、AMPS-II传感器节点,提出了以节能、可重构为主要目标的成组递阶网络通信协议-LEACH;加利福尼亚大学伯克利分校也在美国先进国防研究项目局赞助下进行了智能尘埃项目,其硬件平台的微型化已经到了一个很好的水平,研制出体积不超过一立方毫米,使用太阳能电池供电,具有光通信能力的传感器节点。目前由智能尘埃项目支持下开发的嵌入式数据库管理系统TinyDB和嵌入式操作系统TinyOS也已进入了实用化的阶段。2001年美国陆军部提出“灵巧传感器网络通信”计划,以获得更好的预先战场感知能力。Crossbow公司开发出的一系列MICA传感器开始在平民领域中使用<sup>[2]</sup>。2002年Intel公司发布了“基于微型传感器网络的新型计算发展规划”,计划在森林防火、环境监测、预防医学甚至行星探查等领域应用无线传感器网络技术。2003年美国陆军部在俄亥俄州开发了“沙地直线”系统,这是一个用于战场探测的无线传感器网络系统项目,主要研究如何将低成本的传感器覆盖整个战场,获得精确的战场信息。2004年美国陆军部提出“无人值守地面传感器群”项目,目标是使基层部队指挥员可根据需要将传感器灵活部署到任何区域。同年,日本和韩国也都推出了下一步国家信息化战略,提出u-Japan和u-Korea计划,通过构建无线传感器网络,实现全社会范围内的普适计算环境。

我国政府也非常重视传感器网络技术的各项发展,在《国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006-2020)的重点领域及其优先主题(43)中就明确指出要大力发展智能信息处理和传感器网络技术,重点开发多种新型传感器以及射频标签、条码自动识别、基于多种传感信息的智能信息处理技术,发展实时信息处理系统和低成本的传感器网络,提供功能更强、更方便的信息服务环境和平台<sup>[3]</sup>。1999年,无线传感器网络首次正式启动于中国科学院《知识创新工程重点领域方向研究》的“信息与自动化领域研究报告”中。2004年中国国家自然科学基金委员会也将无线传感器网络列为重点研究项目。国内的一些大学和研究机构从2002年开始也先后分别展开对无线传感器网络的研究,如清华大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、中国科学院等。重庆大学也在同一时间开始研究了嵌入式无线传感器网络节点、无线传感器中的路由技术、定位技术等。我国国家自然科学基金2005年将无线网络传感器中的基础理论和关键技术列入计划,2006年国家自然科学基金将水下移动传感器网络的关键技术列为重点研究。此外,国家863计划、973计划也开始筹划对传感器网络的研究支持。目前国内也有越来越多的企业开始关注传感器网络技术的发展。从研究问题的深度和投入的科研力量来说,国内

的水平相对国外落后，更多的研究集中在关键技术的理论研究以及系统集成应用研究等，缺少对整个系统的创新性研究。虽然无线传感器网络技术的研究历史不长，但是发展迅速。在一份我国未来 20 年预见技术的调查报告中，信息领域 157 项技术课题中有 7 项与传感器网络直接相关。2006 年初发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》定义了 3 个信息技术前沿方向，其中 2 个与无线传感器网络的研究直接相关，即智能感知技术和自组织网络技术。我国 2010 年远景规划和“十五”计划中，也将无线传感器网络列为重点发展的产业之一。

在无线传感器网络没出现之前，主要利用GPS系统进行目标节点定位的。但是由于成本以及系统本身架构问题，GPS不适合广泛用到无线传感器网络中。1992 年AT&T Laboratories Cambridge开发了室内定位系统Active Badge，从此，科研人员开始对自定位的系统 and 算法产生了越来越浓厚的兴趣。到现在为止，一些可适用于无线传感器网络的定位系统陆续被提了出来。其中比较有代表性的是Microsoft'S RADAR,Active Badge<sup>[4]</sup>,SpotON<sup>[5]</sup>,AHLoS,Cricket<sup>[6]</sup>等。

## 1.3 研究目的及意义

### 1.3.1 研究目的

无线传感器网络(Wireless Sensor Network,WSNs)是由许多传感器节点通过自组织的形式形成的一种特殊的Ad-hoc网络，每一个传感器节点主要由通信模块、供电模块、数据采集模块、数据处理模块和控制模块等几部分组成。多样化的传感器可以测量电磁、化学、温度、湿度、压力、噪声、移动速度、土壤成分和方向等多种多样的我们感兴趣的物理现象<sup>[7,8]</sup>。

在WSNs研究领域，数据管理、时间同步、网络路由、节点定位、拓扑控制等已经成为研究重点，其中节点定位技术是一项基本技术。近些年来，国内外的许多研究机构 and 大学已研究出来很多方法来解决传感器节点自身定位的问题，根据节点在整个定位过程中是否需要测量节点间的实际距离，可以将现有的定位算法分为两类：距离无关定位算法和基于距离定位算法。距离无关定位算法无需测量节点间的绝对距离或方位，而是利用节点的拓扑结构来计算节点具体位置。基于距离定位算法需要测量相邻节点间的绝对距离或方位，并利用节点间的距离或方位计算未知节点的位置；通常距离无关的定位技术降低了硬件要求，成本也相对较低，可更好地适用于大规模节点的传感器网络，它的主要缺点是定位精度不够高；而基于距离的定位技术对节点的硬件要求比较高，定位过程中的能耗也比较大，但是其定位精度相对较高。由于各种定位系统应用需求不同，因此针对不同的应用，要通过考虑节点的成

本、规模及系统对定位精度的要求，来选择适合本系统的定位算法。本文就是基于这样的目的，对目前常用的定位算法进行详细的分析、研究和比较，然后改进了基于RSSI的定位算法[9][10][11]。

### 1.3.2 研究意义

WSNs的应用范围非常广，除了能够广泛应用于建筑物安全状态监控、城市交通监控、军事、航空、防爆、救灾、医疗、商业、农业、空间探索、大型车间以及居民区的安全监控等，还可以进行目标跟踪，实时监控目标的行动路线，预测目标的前进轨迹等领域<sup>[12]</sup>。在以上各种应用中，节点定位技术是WSNs应用的主要支撑技术之一，它是实现WSNs各种应用的前提，事件发生的位置信息是传感器节点监测过程中所包含的重要信息，没有位置信息的监控通常情况下是没有任何意义的。对于突发事件，比如森林火灾中需要知道发生灾情的详细位置信息，战场上敌方到达的精确区域，石油管道破裂的具体位置<sup>[1]</sup>。而在环境监测应用中需要知道采集到的信息具体是发生在哪个位置区域，对于上述各问题，实施者必须知道事件发生的具体的地理位置然后才能进一步采取措施去应对问题，因此节点定位技术对WSNs的各种应用起关键作用，也是近来众多研究者研究的热点之一。

传感器网络节点定位技术的研究对推动WSNs中其它核心技术的研究发展起着至关重要的作用。节点定位是网络管理、地理路由、事件位置报告、目标跟踪等系统功能的前提<sup>[13]</sup>。传感器节点为了获得有效的位置信息，随机部署后的节点应该能够在系统部署之后及时地进行自身系统定位，但由于传感器节点目前传感器节点的部署通常是由飞机等随机分布在监测区域中的且容易受到障碍物、能量、温度和目标区域范围大小的影响，根本无法预知节点部署后的自身位置信息，只能进行二次部署以后通过一定的定位方法进行自身定位计算。所以无线传感器网络节点定位技术应该能够满足健壮性、自组织性、分布计算、低能耗等要求<sup>[14]</sup>。

## 1.4 本文的研究内容和组织结构

针对无线传感器网络定位算法相关热点的研究范围和现有研究成果，本文做了相应的研究，主要工作如下：

(1) 本文提出了一种基于 BFGS 算法的无线传感器网络定位，此定位系统是基于 RSSI 测距的定位系统，此算法把无线传感器网络节点的定位问题转化为无约束的最优化问题。它不仅解决了 DFP 算法中由于一维搜索不精确和误差积累造成的迭代奇异问题，而且不需要计



算二阶导数矩阵及其逆矩阵，并且有较好的数值稳定性。仿真结果表明，该算法比基于最小二乘的无线传感器网络定位和基于变尺度的无线传感器网络定位具有更好的定位精度和算法的简便性。

(2) 基于 RSSI 测距的定位系统的一个关键问题是对信号传播模型进行建模，此模型必须更好地反映出距离和传播能量损耗之间的对应关系，它直接关系到第二部定位的精确性。本文中采用 Shadowing 经验模型并在此基础上进行改进优化，选取优选节点，使用三边测量法对未知节点坐标估计，然后使用基于距离的加权方法进行质心定位。经过大量仿真实验比较后，发现此信号传播模型在基于质心定位的算法中可以更好地模拟距离与信号能量之间的对应关系，提高定位精度，减小定位误差。

本文的内容结构安排如下：

第一章概括了无线传感器网络的研究背景、国内外研究动态、分析了传感器网络的研究目的和意义，并介绍了本文的组织结构。

第二章从几个方面介绍了传感器网络，并对现在的研究现状进行了一定的分析。首先，从根本上阐述了无线传感器的概念，然后从硬件以及软件方面说明了它的体系结构；然后介绍了传感器网络的特点，最后对无线传感器网络的关键技术和主要的应用领域进行了详尽的介绍。

第三章首先介绍了无线传感器网络定位的基本概念、节点定位算法分类、定位算法性能评估标准等相关内容；接着重点分析了现有的经典测距算法和定位系统和算法，并简单描述了各种算法的优劣以及具体定位步骤以及使用范围等，并对各算法的具体性能参数进行了对比分析；最后指出了目前定位算法存在的有待解决的问题。

第四章详细介绍了 BFGS 算法在 RSSI 测距定位系统中的应用，以及相关仿真工作。并简单介绍了在无线传感器网络定位系统中 BFGS 算法相对于 DFP 算法和最小二乘法的优越性。

第五章对质心算法进行了相关改进，介绍了现在研究中常用到的信号传播模型以及各模型的一些优缺点，对工程上常用到的 Shadowing 模型进行了详细介绍并进行了相关改进工作，最后结合我们定位算法以及信号传播模型进行模拟仿真，分析此定位系统的定位精度等各项性能。

第六章对本文进行总结和工作展望。

## 1.5 本章小结

本章是本课题研究内容的前言部分，简单介绍了一下课题研究背景，无线传感器网络尤

其定位这部分国内外研究现状以及本课题研究的目的、研究意义等，最后介绍了本文的研究内容以及组织结构。

## 第二章 无线传感器网络

本章主要从几个主要方面介绍了无线传感器网络，首先简单介绍了传感器网络的体系结构和其特点。无线传感器网络在现在科研以及实际生活中有很大的研究意义，其应用也越来越广泛。但是无线传感器网络中很多关键技术尚未发展成熟，在实际应用中还有很多限制，有待进一步研究发展。

### 2.1 无线传感器网络体系结构

#### 2.1.1 传感器网络结构

传感器网络结构如图(2.1)所示，传感器网络系统通常包括任务管理节点、汇聚节点(sink node)、传感器节点(sensor node)等。大量传感器节点部署在监测区域(sensor field)附近或内部，能够通过自组织方式构成网络。它们通常携带有限的电池进行供电，数据处理能力、通信能力、存储能力等相对较弱。

汇聚节点通常为一个带有无线通信接口的特殊网关设备，可以担任有线网络和传感器网络的网关，各个传感器节点通过多跳路由的方式与汇聚节点进行命令、数据等的通信。一般来说，汇聚节点具有很强的通信能力和数据处理能力，可以把收集到的数据转发到外部网络，同时把管理节点发布的任务传送给传感器网络。

管理节点可以直接和汇聚节点相连或通过因特网、通信卫星等与汇聚节点相连。用户通过管理节点访问传感器网络的相关数据或者向网络发送命令等。

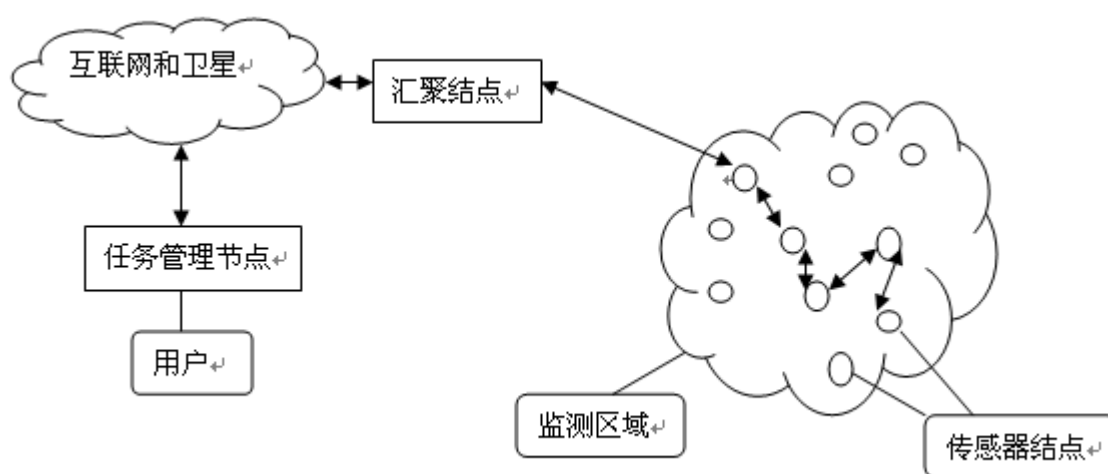


图 2.1 传感器网络体系结构

### 2.1.2 传感器节点的硬件组成

传感器节点主要由四个基本模块组成<sup>[15]</sup>，他们依次是：传输模块、数据处理模块、控制模块、数据采集模块、电源管理模块和通信模块等。他们之间的关系如图(2.2)所示。

(1) 传输模块负责与其它传感器节点进行无线通信，收发采集数据和交换控制消息等。根据通信协议，该模块将数据分段，打包，成帧，最后通过无线信道发送给其它传感器节点。该模块内应包含路由协议，适合于传感器网络的 MAC 媒体接入控制协议，来保证数据通信的有效性，可靠性。

(2) 数据处理模块是由嵌入式系统构成，它是传感器网络节点的核心模块，主要包括存储器、CPU、嵌入式操作系统等。它不仅要在系统节点初始化时能处理节点定位信息，而且要完成感知信息处理，控制节点编号过程等。它还必须通过通信模块与其它传感器节点进行交互，实现通信节点间的合作。

(3) 数据采集模块负责观测目标、进行监测区域内信息的采集和一系列的数据转换工作，主要目的是采集目标运动过程的参数信息，并完成信息的数字化过程，将其送入处理模块进行处理。

(4) 电源管理模块负责优化节点的电能，通过合理安排传感器网络的拓扑结构和节点的工作时间，来减少节点的能量浪费，从而大大提高节点能量的利用率。

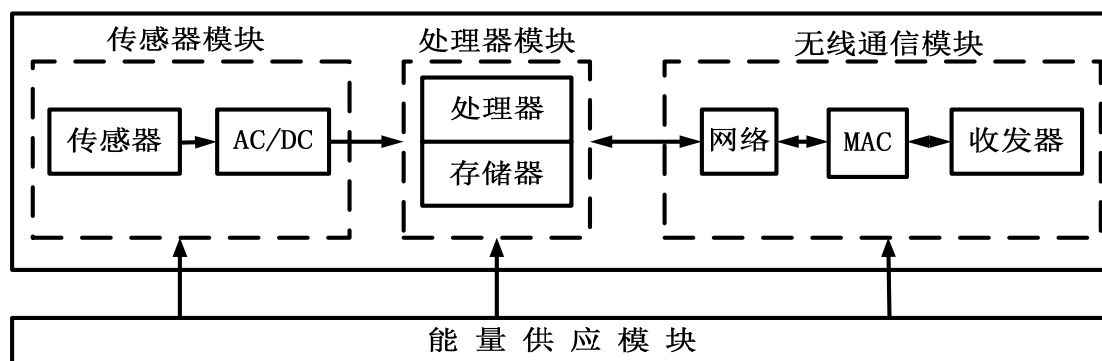


图 2.2 传感器节点的组成

## 2.2 无线传感器网络的特点

### (1) 大规模网络

为了获取准确的节点位置信息，在监测区域内通常部署大量的传感器节点，传感器节点数量可能达到成千上万，甚至更多。大量冗余节点的存在，使得网络系统具有很强的容错性能，不仅如此，大量的传感器节点还能增大覆盖的监测区域，减少洞穴甚至盲区。一般来说，

通过不同空间视角获得的信息通常具有更大的信噪比，通过分布式处理大量采集的信息能够提高系统监测的精确度，降低对单个节点传感器的精度要求。

### （2）自组织网络

在无线传感器网络的应用中，通常情况下传感器节点的位置不能预先精确设定，而是被放置在没有基础设施的地方。如果通过飞机撒播方式撒播大量传感器节点到面积广阔的原始森林中，或随意放置到危险的或人不可到达的区域中时，节点之间的相互邻居关系也不会预先知道，这样的情况下就要求传感器节点具有自组织的能力，能够自动进行管理和配置，通过网络协议和拓扑控制机制自动形成可以转发监测数据的多跳无线网络系统。在无线传感器网络使用过程中，一些传感器节点为了替补失效节点、提高监测精度而加入到网络中，也有部分传感器节点由于环境因素或能量耗尽造成失效，这样在无线传感器网络中的节点个数就动态的减少或增加，从而使整个网络的拓扑结构随之动态变化。无线传感器网络的自组织性就是要能够适应网络拓扑结构的动态变化。

### （3）多跳路由

传感器网络中节点的通信距离有限，一般在几十到几百米的范围内，节点只能与它的邻居节点直接通信。如果希望与其射频覆盖范围之外的节点进行通信，则需要通过中间节点进行路由。传统网络的多跳路由使用路由器和网关来实现，而无线传感器网络中的多跳路由没有专门的路由设备而只是由普通传感器网络节点完成的。这样每个节点既可以是信息的转发者，也可以是信息的发起者。

### （4）动态性网络

无线传感器网络是一个时刻动态的网络，节点可以按需要进行一定的移动；一个节点可能由于工作的需要添加到网络中；也可能会因为环境影响或电池能量耗尽等其他故障，退出网络运行。

### （5）以数据为中心的网络

传感器网络是一个以任务为导向的网络，抛开传感器网络谈论传感器节点没有任何实际意义。传感器网络中的节点普遍采用编号标识，节点编号是否为全网唯一取决于网络通信协议的设计。由于传感器节点是随机部署的，所以节点编号和节点位置间没有必然联系，导致传感器与节点编号之间的关系是完全动态的。使用者用传感器网络查询事件时，并不是通告给某个有确定编号的节点而是直接将所关心的事件通告给传感器网络。传感器网络在获得指定事件的信息后汇报给使用者。

### （6）应用相关的网络

客观世界的物理量数不尽数，不可穷尽。传感器则主要用来感知客观存在的物理世界，

获取物理世界的信息量。不同的传感器应用获取不同类型的物理量，因此不同的传感器应用系统也可以满足用户的各种各样的要求。

传感器网络不能像因特网一样，有统一标准的通信协议平台。所以不同的应用背景对传感器网络的要求也各有不同，其软件系统、硬件平台和网络通信协议必然会有很大差异。虽然不同的传感器网络应用存在一些共性的问题，但是针对每一个具体的应用来研究传感器网络技术，这是传感器网络设计不同于传统网络的显著特征。

## 2.3 无线传感器网络关键技术

无线传感器网络作为当今的热门研究方向，其本身是在大量理论基础与实践基础上发展而来的，有很多关键技术值得大家去进一步探索和研究。

### (1) 网络安全协议问题

传感器网络中移动 Ad-hoc 网络所受到的安全威胁与传统网络并不相同，所以现有的网络安全机制不再适合此领域，研究人员需要开发针对无线传感器网络的专门网络通信协议。

目前为止主要有两种思想来解决此方面的问题：一种思想是把解决重点放在安全协议方面，此领域也出现了大量的研究成果。在文献<sup>[18]</sup>中，作者假定此传感器网络的任务是为高级政要人员提供安全保护的，并提供一个安全解决方案为解决此类安全问题建立一个普遍适用的模型。在具体的技术实现上，先假定基站总是安全的并且正常工作的，满足必要的存储器容量、计算速度，基站功率满足路由和加密的要求；射频层总是能正常工作的；通信模式是点到点的通信，通过端到端的加密保证了数据传输过程的安全性。另一种思想是尽可能寻找安全的路由以保证网络的安全性，主要从维护路由安全角度出发。文献<sup>[16]</sup>指出，如果路由协议遭到破坏导致传送的信息被篡改，那么对于应用层上的数据包来说是没有任何的安全性可言的。文中介绍一种方法叫“有安全意识的路由(SAR)”，其思想是找出节点和真实值之间的关系，然后利用这些真实值去生成相对安全的路由。该方法解决了两个问题，即如何保证路由协议中的信息安全性和数据在安全路径中的传送。文中假设两个军官利用按需距离矢量路由(Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing, AODV)协议通过Ad-hoc网络来通信，他们的通信基于Bell-La安全模型(Padula Bell-La Padula Confidentiality Model)<sup>[17]</sup>，这种模型中，节点会自动的从路由选择中退出来保证整个网络的路由安全如果节点的安全等级达不到系统要求。

### (2) 大规模传感器网络中的节点移动管理

此类问题实质上就是无线传感器网络在没有无线基础设施的情况下的节点查询问题。最简单的节点查询方式是全局洪泛法，但是如果无线传感器网络资源有限，则此类查询方法不

适用, 因此在设计中应该尽量避免使用全局洪泛法。扩展环搜索法(expanding ring search)用增加生存时间(Time-To-Live, TTL)的方式重复进行洪泛, 这种方式和在此基础上发展而来的方式也不适合无线传感器网络。为了改善洪泛法的效率, 文献<sup>[19]</sup>中提出的方案是通过减少查询每个节点时出现的多余的消息来减少洪泛法固有的冗余, 如果冗余本身并不明显, 则这种方案对提高效率没有太多贡献。在Ad-hoc网络中, 查询节点是通过基于界标和簇的层次表来实现的, 当簇头或界标失败又或者节点移动时, 层次表则需要重新配置这种方式, 因此需要在节点之间设置比较复杂的协调机制。通常簇头会成为一个瓶颈, 所以我们应尽量避免这种分层次的协调表和使用簇头。

GLS<sup>[20]</sup>中提出的技术是一种基于所有节点都已知的网络网格图。节点使用位置服务器来保存它们的位置, 并用一种基于ID号的算法去更新它们的位置, 当某节点寻找指定ID号的节点的位置时, 也使用这种算法去服务器中寻找目标节点的位置。如果已知传感器网络的网格图和节点自身的位置并且知道目标节点的ID号时, 这种方法是一个好方法。

针对无线传感器网络中的分布式结构, 文献<sup>[21]</sup>比较了三种定位算法: 鲁棒性、Ad-hoc、N跳多向(N-hop multilateration)。要根据应用系统的网络参数来选择具体的定位算法, 比如连通性和差错分布等。

### (3) 网络的自动配置和自动康复和维持系统能量的有效性

无线传感器网络部署在无人值守或恶劣的环境中时, 更换能源几乎不可能, 节点间通信通常需要中间节点作为中继, 因此, 为了节约能源, 节点传输距离要尽可能短, 发射功率尽可能小。在无人飞行器或者是地震救灾中, 网络的自动康复和自动配置功能显得异常重要。大多数无线网络中的分类以网络的地理位置为依据, 分类的标准是簇间的逻辑直径(相对于地理直径而言)和簇里的节点数量。但是, 当不同的簇间路由消息负荷(routing traffic load)不平衡时, 且簇头(cluster leader)和簇内其它节点间的链路很长, 相邻簇间地理位置交迭很大时, 一个簇头节点和它的非簇头(non-leader)节点之间通过仅有的长链路通信将要消耗很多的能量, 并且簇间能量消耗不平衡, 相邻簇间的并行通信冲突频发, 由此带来的结果是网络的通信质量与有效性以及它的寿命都会大幅度减小。因此, 为了改善通信质量和有效性并且节约能量, 在设计簇算法时, 簇的地理半径也应该考虑在内。文献<sup>[22]</sup>中提出, 在传感器节点内路由协议可以用一种简单的细胞聚类结构去构成, 这样便可以维持一种能量有效的可测量的系统, 关键的问题是使这种细胞簇结构具有自动康复性。作者针对大规模多跳传感器网络的自动康复和自动配置提出了一种传感器网络节点分布式算法, 这种算法可以保证网络节点自动配置成细胞簇结构, 其细胞单元之间的交叠很小并且每个单元都有紧凑的地理半径。这种结构在各种扰动下是自动康复的, 比如节点移动、死亡、加入、离开、被捕获等。

#### (4) 系统功耗问题

无线传感器网络应用于恶劣环境等特殊场合时, 电源不可实时更换, 因此功耗问题便显得至关重要。

西安交通大学的黄进宏等在文献<sup>[23]</sup>中提出了一种ALEP协议, 它是基于能量优化的无线传感器网络自适应组织结构和协议。与传统的无线传感器网络协议相比, ALEP协议更加充分地考虑到实际应用。它将一种高效能量控制算法引入组网协议, 显著延长了无线网络的生命周期并且提高了网络的能量利用率, 增强了网络的健壮性。通过对ALEP协议进行OPNET仿真, 结果显示该协议与传统无线传感器网络协议相比, 在传送相同的数据量的条件下有更高效的信息传输特性和能量特性。

## 2.4 无线传感器网络的应用

无线传感器网络可以工作在长期无人值守的状态, 使人们在任何地点、时间和任何环境条件下获取大量有效可靠的信息, 因此在军事应用、医疗应用、环境应用、智能家居、建筑及城市管理、空间探索、公共安全和反恐等许多领域都值得去研究和应用。

#### (1) 军事应用

无线传感器网络的发展最初起源于军事应用, 一般通过炮弹发射、飞机撒播等手段将大量传感器节点密集散布于本方人员不易到达的区域。通过主动传感器, 如超声波传感器, 雷达和被动传感器, 如声学传感器、化学传感器、磁学传感器、光学传感器、电气传感器等对目标的存在、距离、速度、方向和目标的目的地进行分析。还可以对这些传感器的信息进行进一步分析, 来确定目标是武装人员、非武装人员、车辆的规模甚至车辆本身<sup>[24]</sup>。

#### (2) 医疗护理

无线传感器网络在医疗护理、人身健康研究方面也逐渐大显身手, 为远程医疗研究提供更加方便、快捷、安全的科技手段。比如, 在病人身上安装可以感知人身体温的温度传感器或者可以检测患者血压、心率的传感器等, 医生便可以实时观测患者自身各项生理指标, 一旦出现危险情况便可以马上进行治疗。Rochester 大学的研究员们利用无线传感器建立了一个智能医疗房间, 它使用智能尘埃测量病人的脉搏、呼吸、心跳、睡姿等各项生理活动。在 Intel 公司的 SSIM(Smart Sensors and Integrated Microsystems)计划中, 100 个无线传感器组成的人工视网膜被放置到盲人的眼中, 让他们重见光明。所以, 无线传感器网络技术必将在未来人们的生活中起到举足轻重的作用。

#### (3) 农业领域



我国是农业大国，农作物对国家经济发展有着至关重要的意义。在这些方面，无线传感器网络发挥着极高的技术优势。它可用于监视大面积的地表检测、土壤空气变更、农作物灌溉情况、牲畜、家禽的环境状况等。

无线传感器网络具有部署方便、通信便利的优点，使其在节水灌溉的控制中得以应用。同时，传感器节点还具有气象参数、土壤参数的测量能力，再与 GPS 技术、互联网等技术相结合，可以比较方便地实现作物需水信息采集、灌区动态管理与精量控制专家系统的构建，并进而实现低能耗、高效、多功能、低投入的农业节水灌溉平台。

#### （4）建筑及城市管理

结构安全监测称之为structure health monitor（简称SHM）。目前一般通过在结构上安置传感器节点进行结构监测。MEMS加速度传感器是广泛应用在结构安全监测上的传感器。纽约的Clarkson大学和伊利诺斯大学在这方面都开展了研究。加州大学伯克利分校在 2005 年利用加速度传感器对金门大桥的摆动情况进行系统监测<sup>[25]</sup>。

在交通系统监测中，2004 年 8 月，加州大学伯克利分校提出使用磁传感器计算车辆速度来进行车辆流量控制。车辆通过时，会影响地磁场，通过磁传感器测量磁场变换并判断有无车辆通过，通过计算同一车辆通过相邻传感器的时间间隔来计算车辆的行进速度<sup>[26]</sup>。

随着物联网的不断发展，对智能家居的研究开始越来越多，无线传感器网络通过布置于房间内的湿度、温度、空气成分等无线传感器，感知房间不同地点的微观状况，从而对门窗、空调以及其他家电进行自动控制，提供给人们舒适、智能的居住环境。

#### （5）公共安全和反恐

通过具有特殊用途的传感器，特别是化学生物传感器来监测危险物、有害物的信息，最大限度地减少对人民群众生命安全造成的伤害。

美国Crossbow公司于 2005 年开展了一项利用无线传感器网络对狙击手进行联合定位的课题。首先在传感器节点上布设听觉传感器，根据狙击时声音传到不同传感器节点时产生的时间差，来对狙击点进行联合定位<sup>[27]</sup>。这类传感器不需长时间待机，可以在大型集会或重要事件前提前布置，对于此类传感器本身来说，必须能够精确地分辨枪声，并及时记录枪声到达的时间。在传感器体积方面的需求，目前的技术已然可以满足。

## 2.5 本章小结

这一章从几个方面介绍了传感器网络，并对现在的研究现状进行了一定的分析。首先，从根本上阐述了无线传感器的概念，然后从硬件以及软件方面说明了它的体系结构；然后介

绍了传感器网络的特点，最后对无线传感器网络的关键技术和主要的应用领域进行了详尽的介绍。鉴于无线传感器网络相比于普通无线网络和因特网的优越性，无线传感器网络显然有着更好的应用前景和研究意义。

### 第三章 无线传感器网络定位技术

节点定位问题是无线传感器网络中的一个重要研究领域，近年来得到广泛的研究。现实生活中的许多应用都依赖于节点的相对或绝对位置。例如，森林火灾监测任务、战场上敌方车辆监控也需要知道报警节点的精确位置，否则监控信息毫无价值；还有地理信息辅助路由协议 GEAR 需要利用节点的位置信息，为了避免信息在整个网络中无节制地扩散，网络管理中利用传感器节点传回的位置信息构建网络拓扑图、实时统计网络覆盖情况，节点密度比较低的区域也要采取相应的措施。在如图(3.1)所示的传感器网络中， $S$  代表未知节点， $M$  代表锚节点。 $S$  节点通过相邻  $M$  节点或已经得到自身位置信息的  $S$  节点之间的通信，然后根据一定的定位算法计算出自身的位置。

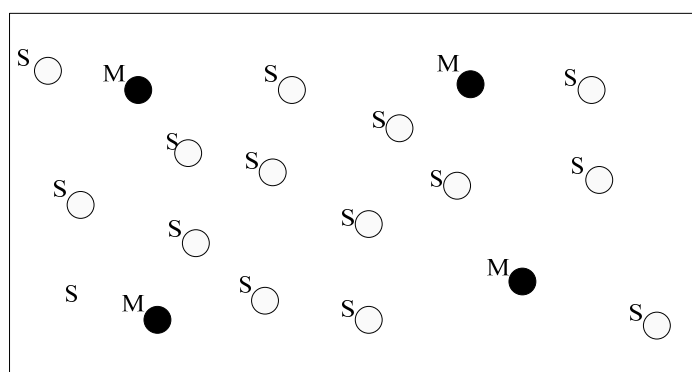


图 3.1 传感器网络中锚节点和未知节点

基本术语：

- 邻居节点(neighbor nodes)：传感器节点通信半径范围内的所有其它节点，称为该节点的邻居节点；
- 跳数(hop count)：两个节点之间间隔的总跳段数，称为两个节点间的跳数；
- 跳段距离(hop distance)：两个节点之间总的跳段距离之和，称为两节点间的跳段距离；
- 基础设施(infrastructure)：协助传感器节点进行自身定位的已知自身位置信息的固定设备，如基站、卫星等；
- 到达时间(time of arrival, TOA)：传播信号从一个传感器节点传播到另一个节点所需要的总时间，称为信号的到达时间；
- 到达时间差(time difference of arrival, TDOA)：两种具有不同传播速度的信号从一个节点传播到另一个节点的时间之差，称为信号的到达时间差；
- 接收信号强度指示(RSSI)：传感器节点接收到的无线信号强度的大小，称为接收信号强度指示；
- 到达角度(angle of arrival, AOA)：传感器节点接收到的信号相对于自身轴线之间的角度，

称为信号相对于接收节点的到达角度；

- 视线关系(line of sight, LOS): 两个节点间能够直接通信, 并没有障碍物间隔, 称为两个节点间存在着视线关系;
- 非视线关系(NLOS,no LOS): 两个节点之间不能够直接通信, 存在障碍物间隔, 称为两个节点间存在着非视线关系。

### 3.1 无线传感器网络定位算法分类

无线传感器网络自身定位系统和定位算法的分类没有一个统一的标准, 以下这些分类方法在一定程度上说明了无线传感器网络研究中不同定位技术的相关特点。

#### (1) 基于距离的定位和无需测距的定位

根据定位过程中是否需要测量实际传感器节点间的距离, 把定位算法可以分为: 距离无关定位算法<sup>[28]</sup>和基于距离的定位算法。前者无需测量节点间的绝对方位或者距离, 而是利用某种机制估计节点之间的距离来计算节点位置; 后者需要测量相邻节点间的绝对方位或者距离, 并且需要利用节点间的实际距离值来计算未知节点的具体位置。

距离无关的定位机制在近些年的研究中倍受关注, 若使定位精度小于 40%, 此定位机制对目标追踪精确度和路由性能的影响不是很大, APIT、质心、凸规划法、Dv-Hop、MDS-MAP 和 Amorphous 是现有的六种主要的距离无关定位算法。

基于距离定位算法常用的测距技术有 TOA<sup>[34,35]</sup>, TDOA<sup>[36-38]</sup>, AOA<sup>[39,40]</sup> 和 RSSI<sup>[29-33]</sup>。TOA(Time Of Arrival)需要传感器节点间具备精确的时间同步机制, 不利于耦合松散型定位系统; TDOA(Time Difference On Arrival)技术需要额外的硬件设备, 而且所需硬件的功耗和尺寸不适用于传感器节点, 不仅如此, 超声波信号在传播过程中也要面临NLOS问题而且超声波本身的传输距离也是有限的。AOA(Angle Of Arrival)测距也需要额外的硬件设备, 并且易受到周围环境的影响。

#### (2) 绝对定位与相对定位

绝对定位和物理定位很类似, 定位的结果是一个绝对的经纬度值等地理坐标位置。但是相对定位过程是以网络中的部分节点作为参考点, 然后对未知节点进行逐点定位以建立整个传感器网络的相对坐标系统。绝对定位机制中定位出来节点的位置信息是地球上的某一个确定坐标点, 所以即使节点不断处于移动的状态, 仍可以为整个定位系统网络提供唯一的命名空间。相对定位机制不需要锚节点, 并且可以实现路由协议。典型的相对定位系统是 LPS(local positioning system), SpotON, SPA(self-positioning algorithm), MDS-MAP, 它们可以在不同的网

络配置环境下实现不同的定位机制。

### (3) 集中式计算与分布式计算

分布式计算主要是依赖于节点间信息的交换进行自身节点定位的一种方法；集中式计算则是指把所有的节点位置、拓扑信息等传送到中心节点比如服务器处，在服务器端进行节点定位计算的一种方法。

集中式计算可以从整个定位系统的角度进行节点的部署，获得相对精准的定位信息估算，对存储量和计算量几乎没有什么太大限制，但是缺点是由于定位过程中通信量太大，距离中心节点（服务器）端的节点会因耗能太大而过早消耗完能量脱离整个传感器网络导致影响节点的实时定位。集中式定位可以分为凸规划法、MDS-MAP 等。

### (4) 基于锚节点定位和无锚节点定位

根据定位过程中是否需要使用锚节点，将定位算法分为：基于锚节点定位的定位算法和无锚节点定位定位算法<sup>[41]</sup>，基于锚节点定位的定位算法中，未知节点直接或者间接地需要利用锚节点的位置、距离、能量信息等度量值进行自身定位，最终产生整体坐标系统。无锚节点定位的定位算法中，未知节点以自身作为参考点，不断地将邻近节点纳入自己定义的坐标系中，然后相邻两个坐标系统先进行转换然后合并为一个坐标系统，最终产生整体坐标系统。

### (5) 粗粒度与细粒度

根据定位系统在定位过程中所需传感器节点信息的粒度问题可将定位系统和算法分为细粒度和粗粒度两类：细粒度定位系统是指根据信号角度或强度来度量与锚节点的距离，可以分为基于距离(RSSI)和方向性(AOA 等)测量两类；粗粒度定位系统则是指根据与锚节点的接近度(proximity)来度量的定位系统。

## 3.2 定位算法性能评价标准

无线传感器网络定位系统和算法的性能是否优良可直接影响最终定位的有效性和精确性，以下几个指标是我们在实践研究过程中要考量的主要评价标准：

(1) 定位精度。定位精度是否满足指定大小是是否采取某定位系统首先要考虑的问题。定位精度一般用定位结果误差值与定位节点的无线射程比值表示，比如，定位精度为 10% 表示定位结果误差值相当于此节点无线射程的 10%。定位精度也可以用网格来表示如果将整个定位系统用网格来表示的话，比如微软的RADAR<sup>[42]</sup>、RadioCamera、Wireless Corporation 的等。

(2) 规模。定位系统有的适合野外操作、室内定位、园区内定位等不同的地点，定位系统和算法必须要适应不同的应用场景。此时，单位地理范围内可以定位的节点的时间和节点数目也可以作为评判定位算法和系统的一个标准。比如 RADAR 系统便可以在一层建筑物内

实现目标的定位。

(3) 锚节点密度。锚节点都有安装 GPS 设备, 是位置已知的节点, 用来定位未知节点的位置。GPS 造价昂贵, 所以锚节点的费用通常是普通节点的百倍以上, 我们现在评定定位算法和系统的重要指标之一就是怎样尽量在节点定位过程中达到我们所需要的定位精度又减少所需锚节点的数量。

(4) 节点密度。节点密度通常是指网络的平均连通度, 它一般可以影响定位算法的定位精度, 典型的 Dv-Hop 算法便是只有在节点密度部署合理的情况下才能达到理想的目标定位。无线传感器网络中, 节点的增加会使网络拓扑结构变得复杂网络部署费用增加, 产生信道竞争拥塞问题, 导致定位的延迟。

(5) 自适应性和容错性。无线传感器网络定位系统和算法需要依靠比较理想的可靠的节点设备和无线通信环境。真正定位场景中通常都会有如下几个问题: 硬件设备本身的限制导致节点间的测试角度或者距离有较大误差; 外界环境中会面临多径衰弱、噪声影响、温度变化等问题; 网络中节点由于电量耗尽或者自身遭到破坏而脱离无线传感器网络。所以, 定位系统和算法的软、硬件必须有很强的自适应性和容错性, 尽量适应各种应用场景, 自动调整整个网络结构以提高节点定位精度。

(6) 功耗。很多通信量需求很大的定位系统中, 中心节点(服务器端)附近的节点由于通信量大很有可能会导致电池能量耗尽而脱离传感器网络, 因此网络拓扑结构的设计、通信量、时间复杂度等与功耗相关的技术指标也是近来研究的重点之一。

(7) 代价。可以从几个不同的方面来评价定位系统或算法的代价。首先是空间代价, 包括定位系统所需网络节点的数量、基础设施和硬件尺寸等; 其次时间代价, 包括一个系统配置时间、搭建时间、定位所需时间等; 再次是资金代价, 包括实现整个定位系统的过程中所花费的总费用。

上述 7 个性能指标是我们设计和实现的优化目标, 也是评定一个定位算法和系统优劣的重要标准。为了达到这些指标, 还需要更多的研究人员投入其中。

### 3.3 节点定位基本原理

#### 3.3.1 节点间距离(或角度)的测量方法

在无线传感器网络中, 传感器节点间距离或者角度的测量常用的技术有 RSSI, TOA, TDOA 和 AOA。RSSI(Received Signal Strength Indicator): RSSI 技术中的传播信号

主要使用 RF 信号，接收点接收来自其它发射节点发来的信号并测得接收功率，此时根据信号传播模型得到两节点间的距离值，信号传播模型可以是经验模型也可以是理论模型。这种测距方法容易受到外界环境的影响，加上节点本身的无线通信能力有限，因此是一种精度较低比较低效的测距方法。传播模型建模具有一定的不精确性和复杂性，所以测距结果很粗糙，甚至有可能产生  $\pm 50\%$  的测距误差。

**TOA (Time of Arrival):** 该技术通过测量信号在两节点间传播时间来计算距离。使用TOA技术最多的是GPS系统，GPS系统需要高耗能且昂贵的电子设备来使卫星精确同步。但传感器在硬件尺寸、耗能方面、价格方面有所限制，TOA技术很难以应用到WSNs中。文献<sup>[43]</sup>中给出了基于TOA定位的简单实现，如图(3.2)所示，节点的定位部分主要采用伪噪声序列信号作为声波信号，根据声波的传播时间来估计节点间的距离，主要有扬声器模块、无线电模块、麦克风模块和CPU模块组成。

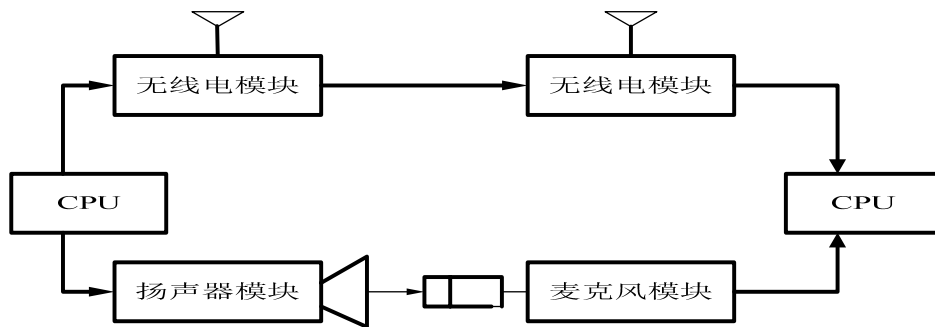


图 3.2 使用声波进行测距

**TDOA (Time of Difference On Arrival):** TDOA 测距技术一般是在节点上安装 RF 和超声波收发器。发射端收发器同时发射两种信号，利用电磁波和声波在空气中传播速度差在接收端收发器中记录两种信号到达的时间差，然后把时间转化成距离。如图(3.3)所示，发射节点同时发射超声波信号和无线射频信号，接收节点记录两种信号到达的时间  $T_2$ ， $T_1$ ，已知超声波和无线射频信号的传播速度为  $c_2$ ， $c_1$ ，那么两点之间的距离为  $(T_1 - T_2) \times S$ ，其中  $S = \frac{c_1 c_2}{c_1 - c_2}$ 。

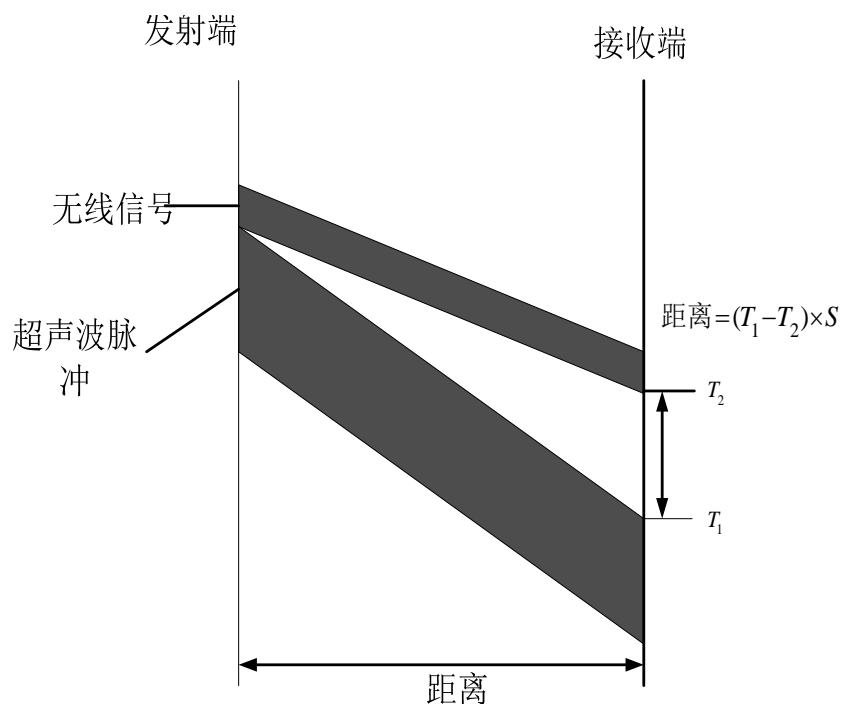


图 3.3 TDOA 定位原理示意图

AOA(Angle Of Arrival): AOA 测距技术可以通过多个接收器或天线阵列来估算节点发送信号的方向，MIT 的 The Cricket Compass 等项目中就利用多接收器提出了基于 AOA 的解决方案，其测距系统可以在  $\pm 40^\circ$  角内以  $\pm 5^\circ$  的误差确定接收信号的方向。AOA 技术易受到外界环境的影响，而且在硬件尺寸和功耗上可能无法应用于传感器节点。图(3.4)所示，接收节点通过麦克风阵列，感知发射节点信号的到达方向，下面分三个阶段阐述 AOA 测定方位角和定位的具体过程。第一阶段：测量相邻节点之间方位角；第二阶段：测量相对锚节点的方位角；第三阶段：利用所测节点方位信息计算节点自身位置进行定位。

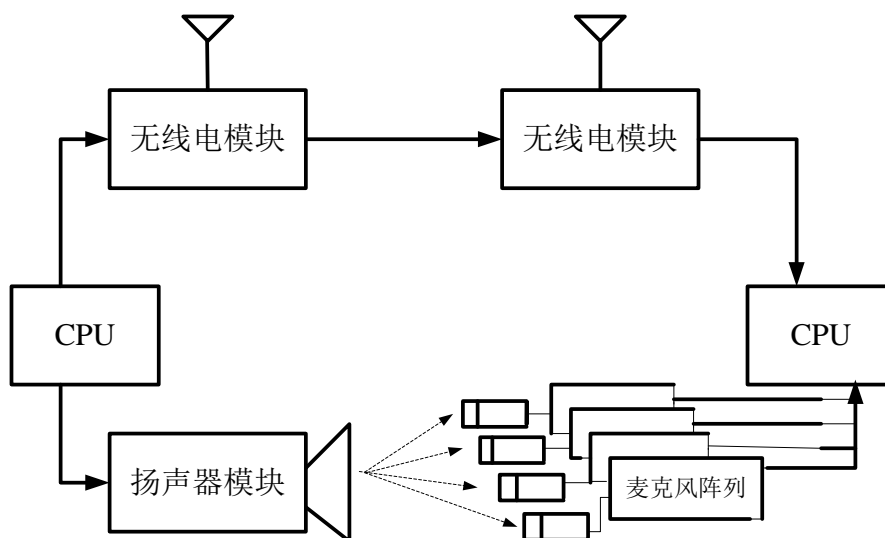


图 3.4 AOA 定位示意图



以下表(3-1)在抗干扰能力以及测距费用、误差方面简单介绍以上各种测距技术的特点：

表 3-1 各种测距技术的特点

名称	有效距离	抗干扰能力	额外硬件	测距误差
RSSI	长	多径衰落、受电磁干扰，可穿透障碍物	不需要	较大
TOA	较短	受多途、混响效应影响，不能穿透障碍物	需要	较小
TDOA	很短	受多途、混响效应影响，不能穿透障碍物	需要	很小
AOA	很短	受环境影响，不能穿透障碍物	需要	很小

### 3.3.2 节点基本定位计算方法

无线传感器网络中，未知节点通过获得与锚节点之间的角度或距离等信息来为自身定位，通常的计算方法有以下几种：

#### (1) 三边测量法

三边测量法<sup>[44]</sup> (Trilateration) 如图(3.5)所示，已知A、B、C三个节点的坐标分别为 $(x_a, y_a)$ 、 $(x_b, y_b)$ 、 $(x_c, y_c)$ ，他们到未知节点D的距离分别为 $d_a$ 、 $d_b$ 、 $d_c$ ，假设节点D的坐标为 $(x, y)$ 。

可得以下公式：

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2} = d_a \\ \sqrt{(x-x_b)^2 + (y-y_b)^2} = d_b \\ \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2} = d_c \end{cases} \quad (3.3.1)$$

由上式(3.3.1)可以得到节点D的坐标为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_a - x_c) & 2(y_a - y_c) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_a^2 - x_c^2 + y_a^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_a^2 \\ x_b^2 - x_c^2 + y_b^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_b^2 \end{bmatrix} \quad (3.3.2)$$

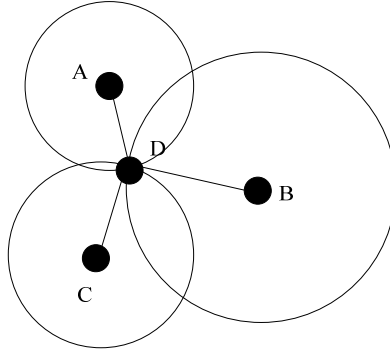


图 3.5 三边测量法图示

## (2) 三角测量法

三角测量法 (Triangulation) 如图(3.6)所示,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三个节点的坐标分别为  $(x_a, y_a)$ 、 $(x_b, y_b)$ 、 $(x_c, y_c)$ , 节点  $D$  相对于  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三个节点的角度分别为:  $\angle ADB$ 、 $\angle ADC$ 、 $\angle BDC$ , 此时假设  $D$  点的坐标为  $(x, y)$ 。

对于节点  $A, B$  和角  $\angle ADB$ , 如果弧  $AB$  在  $\triangle ABC$  内, 那么能够唯一确定一个圆, 设圆心为  $O_{AB}(x_{AB}, y_{AB})$ , 半径为  $r_{AB}$ , 那么  $\alpha = \angle AO_{AB}B = (2\pi - 2\angle ADB)$ , 且存在以下公式:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_{AB} - x_a)^2 + (y_{AB} - y_a)^2} = r_{AB} \\ \sqrt{(x_{AB} - x_b)^2 + (y_{AB} - y_b)^2} = r_{AB} \\ (x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 = 2r_{AB}^2 - 2r_{AB}^2 \cos \alpha \end{cases} \quad (3.3.3)$$

由上式(3.3.3)可以确定圆心  $O_{AB}$  点的坐标和半径  $r_{AB}$ , 同理对  $A, C$  和  $B, C$  节点也可以相应分别确定其圆心坐标和半径。

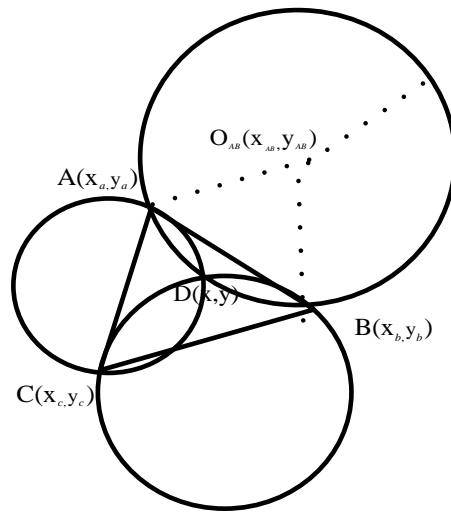


图 3.6 三角测量法图示

最后由三边测量法, 已知点  $O_{AB}(x_{AB}, y_{AB})$ ,  $O_{BC}(x_{BC}, y_{BC})$ ,  $O_{AC}(x_{AC}, y_{AC})$  来确定点  $D(x, y)$  的具

体坐标位置。

### (3) 最小二乘法<sup>[45]</sup>

假如未知节点收到的信息中含有错误的信息，即坐标距离组合与真实信息相差巨大，或噪声引起的测量误差，事实上在一个存在噪声的真实环境中，由于测距误差的存在，这些圆的公共交点可能不会交于一点。这时我们可以在知道多个锚节点信息的情况下利用最小二乘法得到最优解。最小二乘法如图(3.7)所示，已知  $A, B, C \dots N$  等点的坐标分别为  $(x_a, y_a)$ 、 $(x_b, y_b)$ 、 $(x_c, y_c) \dots (x_n, y_n)$ ，它们分别到点  $M$  的距离分别为  $d_a, d_b, d_c \dots d_n$ ，假设  $M$  的坐标为  $(x, y)$ 。

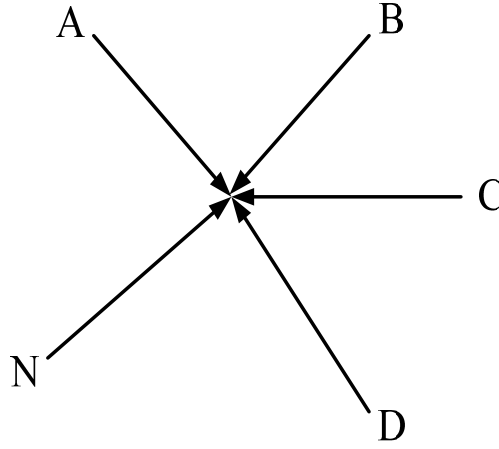


图 3.7 最小二乘法

则存在以下公式：

$$\begin{cases} (x_a - x)^2 + (y_a - y)^2 = d_a^2 \\ (x_b - x)^2 + (y_b - y)^2 = d_b^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (3.3.4)$$

从第一方程开始分别减去最后一个方程，可得：

$$\begin{cases} x_a^2 - x_n^2 - 2(x_a - x_n)x - y_a^2 - y_n^2 - 2(y_a - y_n)y = d_a^2 - d_n^2 \\ x_b^2 - x_n^2 - 2(x_b - x_n)x - y_b^2 - y_n^2 - 2(y_b - y_n)y = d_b^2 - d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x - y_{n-1}^2 - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y = d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{cases} \quad (3.3.5)$$

上式的线性方程可表示为  $AX=b$ ，其中：

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_a - x_n) & 2(y_a - y_n) \\ 2(x_b - x_n) & 2(y_b - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} x_a^2 - x_n^2 + y_a^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_a^2 \\ x_b^2 - x_n^2 + y_b^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_b^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.3.6)$$

使用标准的最小均方差估计方法可以得到  $D$  的坐标为:  $\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T b$ 。

#### (4) 双曲线定位法

双曲线定位法如图(3.8)所示, 设  $A, B, C, D$  各锚节点的坐标为  $(x_a, y_a)$ 、 $(x_b, y_b)$ 、 $(x_c, y_c)$ 、 $(x_d, y_d)$ , 未知节点  $M$  的坐标为  $(x, y)$ , 以锚节点  $A$  为参考, 设  $M$  到各自两节点( $A$  和  $B$ ,  $A$  和  $C$ ,  $A$  和  $D$ )的距离差分别为  $d_{AB}$ 、 $d_{AC}$ 、 $d_{AD}$  则有以下各式:

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2} = d_{Ai} \quad i = b, c, d \quad (3.3.7)$$

利用最小二乘法可以计算未知节点  $M(x, y)$  的具体坐标位置。利用双曲线进行节点定位时, 至少需要 4 个锚节点。

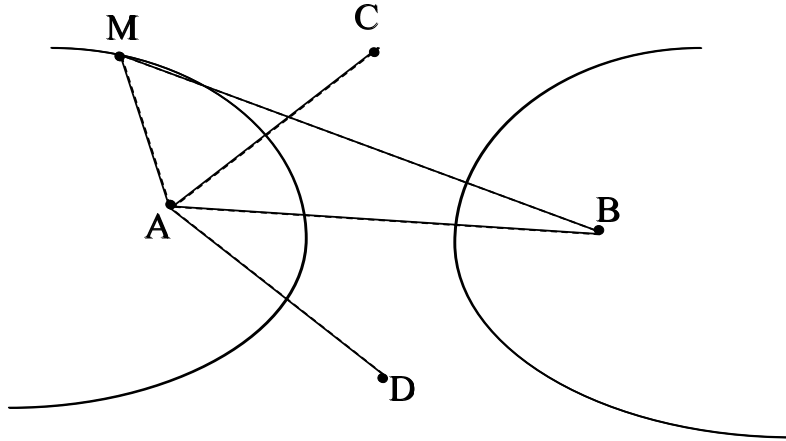


图 3.8 双曲线定位示意图

### 3.4 无线传感器网络自身定位系统和算法综述

迄今为止, 对无线传感器网络自身定位算法和系统的研究基本上经历了两个主要阶段。第一阶段偏重于基于基础设施的定位系统, 但是此类定位系统不易扩展。目前, 对无基础设施的自身定位系统和算法的研究是无线传感器网络研究的热门领域。下面对比较典型的定位系统和算法进行了归纳总结。

#### (1) Cricket 定位系统

Cricket 定位系统测距部分采用 TDOA 原理进行测距, 它是由布置在建筑物内位置固定的

锚节点和待定位的未知节点组成。锚节点随机地同时发射超声波信号和 RF 信号，其中，RF 信号包含该锚节点的 ID 和位置。未知节点使用 TDOA 技术测量其与锚节点间的距离，当该节点获得其与三个以上锚节点间的距离时便可使用三边测量法进行自我定位，否则就以房间为单位提供符号定位。

Cricket 系统的缺点是不能做追踪和导航只支持位置信息的获取，而且作为锚节点的传感器节点需要一直广播 RF 信号和超声波信号，大大增加节点的能耗减小了节点的寿命。

### (2) 质心算法

质心算法是一种仅基于网络连通度的定位算法。该算法的基本思想是：锚节点每隔一段时间向邻居节点广播一个包含其 ID 和位置信息的信号。当未知节点接收到的不同锚节点的信号数量超过一定时间或阈值后，估算自身位置为各锚节点组成的多边形的质心进行自身定位。仿真结果显示，几乎网络中 90% 的未知节点的定位精度均小于锚节点间距的 1/3。该算法优点是完全基于网络连通性，操作简单。缺点是对锚节点密度要求较高，仅能实现粗粒度定位。如图(3.9)所示，多边形  $ABCDE$  的顶点坐标分别为  $A(x_a, y_a)$ ,  $B(x_b, y_b)$ ,  $C(x_c, y_c)$ ,  $D(x_d, y_d)$ ,

$E(x_e, y_e)$ ，其质心坐标  $(x, y) = (\frac{x_a + x_b + x_c + x_d + x_e}{5}, \frac{y_a + y_b + y_c + y_d + y_e}{5})$

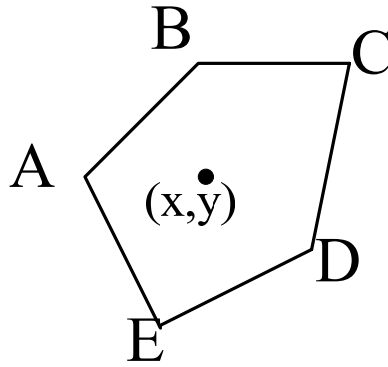


图 3.9 质心定位算法图示

质心定位算法中前提是假设各节点的传播模型都为理想的球形，而实际上由于外界环境的干扰无线信号的传播模型并不理想。另外，用质心作为节点的位置本身就是一种估计，其精度要依赖于锚节点的密度。

### (3) Dv-Hop 算法

Dv-Hop 算法类似于传统网络中的距离向量路由机制。具体定位过程如下：

- 计算未知节点和锚节点之间最小跳数

锚节点不断地向邻居节点中发送包含自身 ID、位置信息、跳数（初始值为 0）的分组。

接收节点忽略来自同一锚节点的跳数较大的分组保留跳数较小的分组，然后较小跳数加一转发给此接收节点的邻居节点。通过此方法，网络中的所有未知节点都可以获得到每个锚节点的最小跳数。

· 计算未知节点和锚节点之间实际跳段距离

每个锚节点根据上一步骤中记录的其它锚节点的位置信息和跳数，利用下式(3.4.1)估算平均每跳的实际距离为：

$$HopSize = \frac{\sum_{b \neq a} \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}}{\sum_{b \neq a} h_b} \quad (3.4.1)$$

$(x_a, y_a), (y_a, x_b)$  是锚节点  $A, B$  的物理坐标， $h_b$  是锚节点  $A, B (A \neq B)$  之间的跳段数。

将求得的所有跳段距离作为一个校正值(correction)以可控洪泛法广播至整个传感器网络中,一个节点仅接收第 1 个校正值,忽略其它后来者,确保了大多数节点是从最近的锚节点处接收的校正值。最后,节点根据跳数与收到的校正值来计算与锚节点之间的距离。

· 未知节点获得与 3 个或更多锚节点间的距离后,在第三阶段执行三边测量定位

如图(3.10)所示,已知锚节点  $L_1$  与  $L_2, L_3$  之间的跳数和距离,  $L_2$  计算得到即平均每跳距离  $(40+75)/(2+5)=16.42$  作为校正值进行广播。在上例中,假设  $A$  从  $L_2$  获得校正值,则它与 3 个锚节点之间的距离分别为  $L_1-3 \times 16.42$ ,  $L_2-2 \times 16.42$ ,  $L_3-3 \times 16.42$ ,最后使用三边测量法确定节点  $A$  的位置。

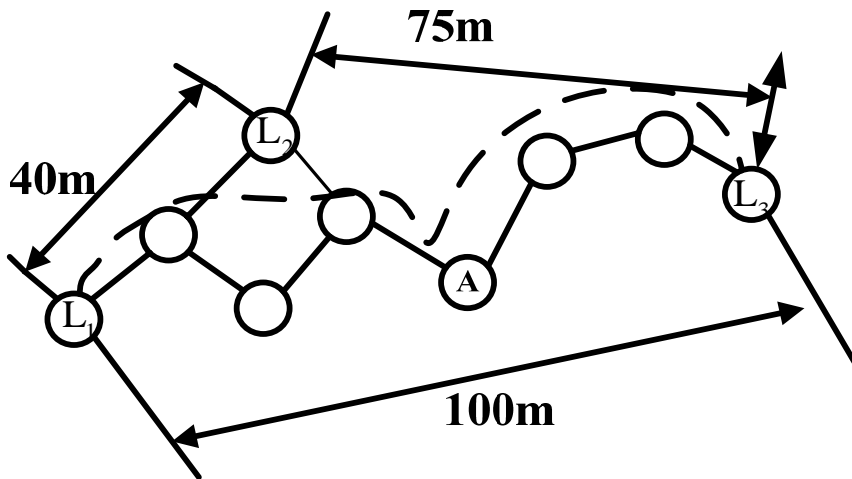


图 3.10 Dv-Hop 定位算法示例

Dv-Hop 算法的缺点是校正值若要合理地估算平均每跳距离必须在各向同性密集网络中。仿真结果证明,在网络平均连通度为 10,锚节点比例为 10%的各向同性网络中未知节点的定位精度约为 33%。

#### (4) APIT 定位算法

APIT(approximate point-in-triangulation test)近似三角形内点测试法是一种无需测距的适合大规模无线传感器网络的分布式定位算法,它首先确定多个包含有未知节点的不同三角形,重叠区域为一个多边形,利用质心定位算法估算此多边形的质心作为未知节点的位置。APIT 主要利用信号强度大小与距离的相对关系,对节点密度要求较低,定位精度相对其它无需测距定位算法相对较小,通信量小。

##### · APIT 定位算法的基本思想

未知节点不断接收来自锚节点发来的包含自身信息的信号,然后任意选择其中三个节点作为三角形的三个顶点。测试未知节点和每个三角形的位置关系,计算包含有目标节点在内的所有三角形的重叠区域,未知节点的位置估算为此重叠区域的质心。图(3.11)为 APIT 定位原理图,黑点便为估算出来的未知节点的位置,也即是三角形重叠区域的质心位置。

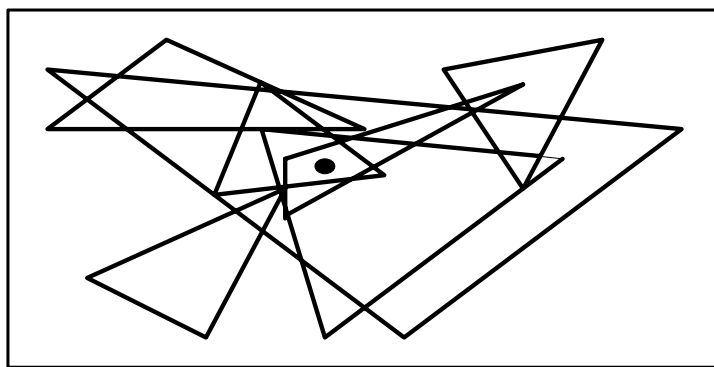


图 3.11 APIT 定位原理示意图

##### · APIT 定位的理论基础

PIT(perfect point-in-triangulation test)为 APIT 定位的理论基础。原理如图(3.12)所示,若点  $M$  向某一方向的移动会同时远离  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点则可判定  $M$  点在三角形  $ABC$  外部,反之则判定  $M$  点在三角形  $ABC$  内部。

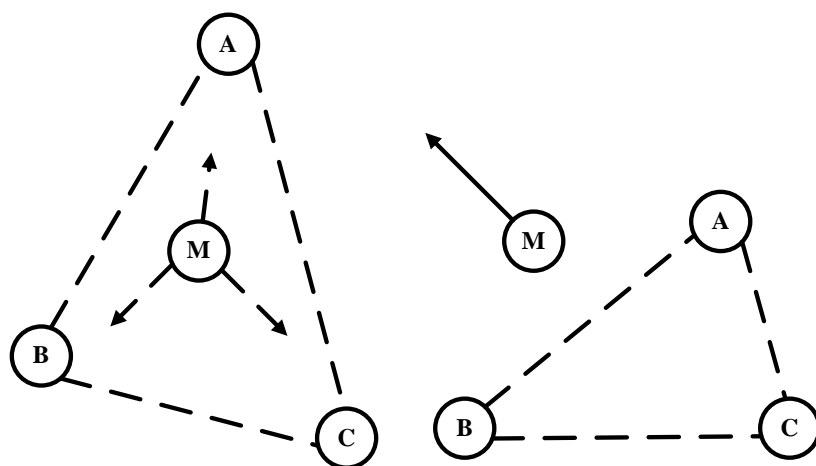


图 3.12 PIT 原理示意图

#### (5) AHLos 定位

AHLos(Ad-Hoc Localization System)是一个迭代定位算法。定位过程如下：未知节点利用TDOA方法测得与邻居锚节点（原始锚节点和转换锚节点）之间的距离，当得到3个或3个以上邻居锚节点的距离时根据最小二乘法进行自身定位，并将该未知节点转换为锚节点进行广播。

根据未知节点周围锚节点的分布情况，分别利用相应的算法计算未知节点的位置。

##### ． 原子多边算法

原子多边算法(atomic multilateration)如下图(3.13)所示，每个未知节点的邻居节点中至少有3个原始锚节点（非转换锚节点），未知节点可直接利用其邻居锚节点自身的位置信息用最小二乘法进行自身定位。

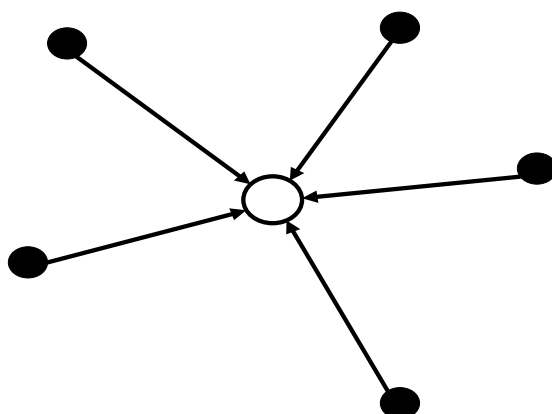


图 3.13 原子多边算法

##### ． 迭代多边算法



迭代多边算法(iterative multilateration)是指未知节点的邻居锚节点数量少于 3 个无法进行自身定位,一段时间后,其邻居节点中的未知节点经转换成为锚节点,当该未知节点的邻居锚节点数大于或者等于 3 个时,便可以基于转换锚节点和原始锚节点利用最小二乘法进行自身定位。

#### ． 协作多边算法

协作多边算法(collaborative multilateration)指系统经过多次迭代定位以后部分未知节点周围的邻居锚节点(转换锚节点和原始锚节点)的个数依然少于 3 个,必须利用其它节点才可以进行自身定位。如下图(3.14)所示,多次迭代定位以后,未知节点 2 的邻居锚节点只有 1 和 3,它要通过未知节点 4 计算到锚节点 5 和 6 的多跳距离,然后再利用最小二乘法进行自身定位。

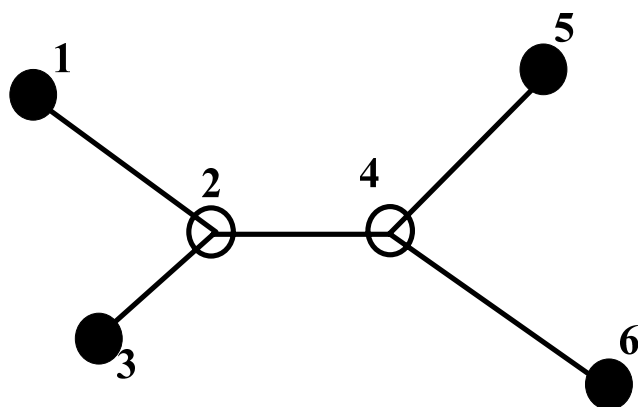


图 3.14 协作多边算法

AHLos 算法的缺点是:随着各未知节点逐步转化为锚节点,定位误差也在不断积累;没有对该定位系统执行的条件进行详细约束。如下图(3.15)所示情况,此时执行协作多边算法的话,计算出的未知节点的位置可能并不唯一。

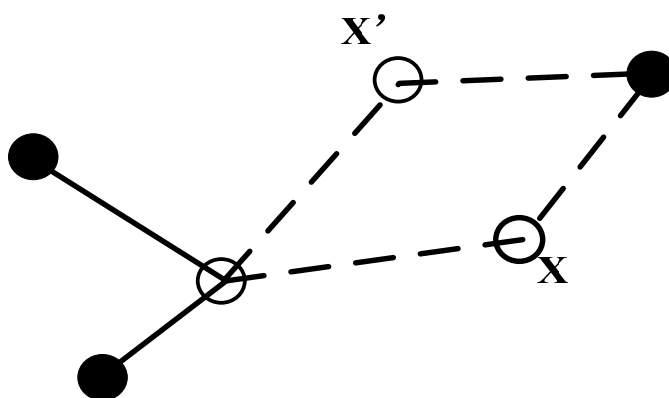


图 3.15 协作多边算法(二)

### (6) MDS-MAP(Multidimensional Scaling: MDS)定位算法

MDS方法主要应用在心理学、工程领域、社会科学等方面。Shang yi<sup>[46]</sup>等人将MDS方法引入到设计无线传感器网络定位算法中。采用此技术时,输入量通常是刺激体(stimuli)的接近性(proximity measurement)度量值,所谓接近性度量通常表示刺激体的相异性(Dissimilarity)或相似性(Similarity)的数值大小表示,这种相异性或者相似性在定位领域中表现的是节点之间的通信跳数或者距离的大小。MDS可以将这些节点映射为低维空间中的一个点根据节点间接近性度量值,当空间维数是2或者3的时候,就成为一个定位问题。

MDS 算法进行定位有如下优点:第一,MDS 算法应用广泛,可应用于各种基于测距的定位算法中,相似性度量可以是信号传输时间、通信跳数、距离大小。第二,MDS 算法可以应用于锚节点稀疏的网络中,仅需要少量锚节点便可对结果矩阵进行坐标变换从而得到更加精确的定位结果。第三,MDS 算法可对非凸区域进行定位。非凸区域可认为由若干凸区域粘合而成,对每个凸区域可进行 MDS 定位,然后将所有凸区域粘合成一个非凸区域。MDS 算法的缺点也很明显,对于大型无线传感器网络,节点之间的测量距离非常多,导致得到的测量矩阵非常大,所以需要很大的存储空间,同样对于这个测量矩阵进行特征值分解也需要很大的计算复杂度。

### (7) SDP(Semi-definite Programming)半定规划定位算法

Doherty等人在文献<sup>[47]</sup>中将半定规划的方法应用于无线传感器网络定位算法中。在此算法中,可用线性矩阵不等式(Linear matrix inequality: LMI)来表示未知节点的几何约束,然后利用半定规划法进行求解,求得的结果是每个节点的约束区域,具体见图(3.16):

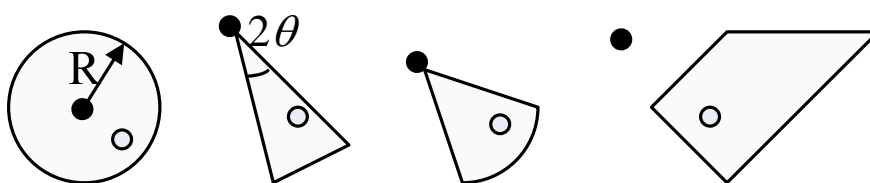


图 3.16 半定规划法求解出的未知节点的约束区域

半定规划法的自身使用范围也有所限制,首先,只有未知节点的约束区域是凸区域的时候才能用线性矩阵不等式来表示,比如上图中的圆弧、三角形、梯形等都是凸区域。而且,半定规划法的最大缺陷是线性矩阵不能表示精确的距离信息。其次,半定规划法是集中式的,对于一个大型无线通信网络来说,约束条件个数  $n$  可能非常大,这样半定规划算法的计算时间复杂度可能会变得非常大,不适用于节点能量有限的传感器节点。

此类问题的解决方法通常可以是将整个通信网络分为几个层次结构，从而减小每层子网络的通信量和计算量。

### 3.5 无线传感器网络定位算法的评估指标

评价一个特定系统的定位算法通常可以从以下几个方面进行考虑：

#### (1) 定位精度

首先，设计一个定位算法的基本宗旨是要利用其提高节点定位的定位精度，通常，简单的定位误差可以由下式(3.5.1)来表示：

$$\varepsilon(i) = x(i) - \hat{x}(i) \quad (3.5.1)$$

如果需要全面衡量该定位算法的平均定位误差，则要综合考虑所有未知节点的定位误差，可由下式(3.5.2)来表示：

$$\zeta = \frac{\sum_i |x(i) - \hat{x}(i)|}{N} \quad (3.5.2)$$

上式中， $N$  为待定节点的总数量， $x(i)$  为待定节点的实际坐标位置， $\hat{x}(i)$  为待定节点的估算坐标位置， $\varepsilon(i)$  为单个节点的定位误差， $\zeta$  为所有节点的平均定位误差。

#### (2) 定位响应速度

传感器网络定位的响应速度也是需要考虑的因素之一，尤其在一些比较特殊的应用场合，比如在战场上，根据某种定位机制监测到敌军所在具体位置信息或者距离信息时应当尽快计算出具体物理位置（经纬度等），否则由于物体的移动性，将难以对监测的物体做出正确的行动。所以，定位算法的计算复杂度和时间复杂度也是我们在设计时应当着重考虑的因素。但是，由于无线传感器网络节点硬件平台设备的差别，不同的处理芯片计算速度不尽相同，所以难以对无线传感器网络中节点定位算法的响应速度  $V$  有一个精确的数学式表示，可以简略描述为：

$$V = (\text{定位算法延时} + \text{硬件处理延时} + \text{通信延时} + \text{其它模块延时}) / \text{运行总时间}$$

#### (3) 定位算法的鲁棒性

定位算法的鲁棒性表现为定位算法在不同应用场景下的定位精度的波动范围。在本文中，主要用定位算法在同一网络拓扑结构下的网络密度时定位精度的变化来表示定位算法的鲁棒性：

$$R = \sum_{i=d(n)}^{d(m)} |\zeta(i) - \zeta(i+1)| \quad (3.5.3)$$

其中， $\zeta(i)$  表示在  $d(i)$  种网络拓扑结构时定位算法的平均误差，衡量鲁棒性时需要对比  $d(m)-d(n)$  种网络密度时算法的性能，鲁棒性  $R$  的值越小说明定位算法的鲁棒性越好。

#### (4) 定位算法能量消耗估计

实际上，在一个无线传感器网络进行节点定位的过程中，能量消耗主要集中在通信传输的过程中，定位算法计算消耗的能量所占的比例并不大，基于此，可采用 Rabbat 等提出的能耗模型来表示能耗大小：

$$\delta(n) = b(n) \times h(n) \times e(n) \quad (3.5.4)$$

上式中， $b(n)$  是通信传输的比特/数据包的平均大小， $h(n)$  是通信传输过程中的节点平均跳数， $e(n)$  是每比特/数据包在传输过程中每经过一跳需要的平均能耗大小。此类情况下，我们假定传感器节点是均匀分布在 2 维或 3 维空间中的，两节点之间的间隔为一个长度单位，并且假定一个传感器节点能够在  $d_{thr}$  范围内与其它传感器节点进行通信。

### 3.6 定位技术有待解决的问题

作为无线传感器网络中比较重要的技术，节点定位技术在近年来各国科研人员的研究下取得了突破性进展，但研究过程中也逐步发现了很多待解决的问题，主要概括如下：

#### (1) 定位精度

节点定位精度的大小是系统定位过程中首先应该考虑的因素，它是评价一个系统整体定位机制的首要标准，由于外界环境的影响、硬件平台本身的误差、定位算法的迭代误差，定位结果不可避免地与实际节点坐标位置存在一定计算误差，因此如何减小定位误差提高定位精度成为节点定位技术中需要不断改进的关键问题。

#### (2) 成本控制

为了提高节点定位精度，无线传感器网络节点的分布密度一般比较大，为了减小整个网

络的部署成本, 传感器节点的硬件配置必然有所限制, 比如带有 GPS 装置的锚节点的数量应该尽量减少, 定位算法设计中也应减小算法的时间复杂度和空间复杂度等, 另外, 网络的拓扑结构必须设计合理, 这样在节点通信传输的过程中才可以尽量减小通信能耗提高节点的生存寿命。

### (3) 锚节点数目

锚节点是自身配备有 GPS 定位装置可以进行自身定位的传感器节点, 由于 GPS 造价较高, 如果锚节点数目所占比例过多则会增加整个传感器网络的部署成本, 但是如果部署过少则在一定程度上影响整个传感器网络的网络连通率和最终节点的定位精度, 因此, 如何在尽量减少锚节点所占节点比例的情况下得到系统最大的节点定位精度, 还有待进一步的研究。有学者指出锚节点可以部署为移动性的, 那样多个未知节点可以重复利用某一个锚节点的位置信息等来进行自身定位, 因此如何设计锚节点的移动轨迹进而最大化地利用同一个锚节点信息是此类问题中重点考虑的一个因素。

### (4) 环境的不均匀性

无线传感器网络的应用场景一般是人员难以到达的比较复杂的外部环境, 这也是无线传感器网络的优势所在, 但是, 很多定位系统和算法在实施中易受到环境的影响而导致最终定位误差的增大。比如, 节点发射信号时由于空间中障碍物的存在在各个传输方向上的无线通信距离各不相同, 因此, 利用定位算法所估计的网络平均每跳距离误差较大而导致最终定位误差的增加。在本文研究的基于 RSSI 测距的定位系统中, 环境的影响使得信道模型建模时应考虑各种复杂因素, 计算量也大大增加, 所以, 在实际定位系统中, 充分考虑外界环境因素的影响是提高定位精度的一个重要因素。

## 3.7 本章小结

本章首先介绍了无线传感器网络定位的基本概念、节点定位算法分类、定位算法性能评估标准等相关内容; 接着重点分析了现有的主要测距算法和定位系统和算法, 并简单描述了各种算法的优劣以及具体定位步骤以及使用范围等, 对各算法的具体性能参数进行了对比分析; 最后指出了目前定位算法存在的有待解决的问题。现有的定位算法的具体领域都有各自的针对性, 没有哪一种算法是绝对最优的, 因此需要在综合考虑各项应用性能的基础上进行定位算法和系统的选择和优化。

## 第四章 基于 BFGS 算法的无线传感器网络定位

### 4.1 概述

无线传感器网络自定位算法可以从定位机制上分为基于测距和测距无关两类。基于测距的定位算法需要测量两节点之间的角度或距离信息，然后在测距的基础上进行节点的自身定位。基于测距的定位算法中最常用的是基于 RSSI 方法进行节点定位，因为 RSSI 方法不需要增加任何额外的硬件设备，操作比较简便。测距方法的目的是为了得到相邻两节点之间的相关物理量比如距离、信号能量、角度值等，有些算法还需要通过间接计算获得锚节点与其它不相连的节点之间的距离。相连节点指的是无线通信可达的节点，也即互为邻居节点。此类算法从锚节点开始有节制地发起洪泛，节点间可共享节点信息，可以较小的计算代价确定各节点与锚节点之间的距离。不相连即无线通信不直接可达，但是可以间接计算获取该锚节点位置信息。测距无关定位算法则不需要相邻节点间距离或者角度等相关信息，仅仅利用节点之间的连通信息定位,主要基于网络连通性。相对于基于测距的定位，测距无关的定位在硬件要求、成本、能耗方面要求较低，比较适合大规模无线传感器网络，但是其定位精度相对较低。

本章设计的无线传感器网络定位算法主要研究基于RSSI测距的定位系统，在测距基础上为了减少定位误差提高定位精度进行研究。对于无线传感器网络来说，不同应用场景下，距离相同的节点的RSSI（信号接收强度）值不尽相同。基于这两种考虑，孔军等提出了基于加权变尺度法的无线传感器网络定位<sup>[48]</sup>,该方法首先对接收到的RSSI值进行加权修正，然后使用工程优化中的变尺度法(DFP)求出使系统定位误差最小的未知节点的估计。该算法虽然避免了计算二阶导数矩阵及其求逆计算，但是由于一维搜索的不精确和计算误差的积累可能导致DFP算法中某一次的迭代矩阵奇异<sup>[49]</sup>。

鉴于此，本文提出基于 BFGS 算法的无线传感器网络定位。BFGS 算法跟 DFP 算法同样具有二次终止性，同时 BFGS 算法还具有超线性收敛性。对于 DFP 算法，由于一维搜索的不精确和计算误差的积累可能导致迭代矩阵奇异，而 BFGS 算法对一维搜索的精度要求不高，并且由它产生的迭代矩阵也不易奇异。因此 BFGS 算法比 DFP 算法具有更好的数值稳定性，更适合于无线传感器网络定位。

## 4.2 相关工作

节点定位对传感器网络应用至关重要，所以近两年来出现了很多有代表性的定位方法。在传感器网络中经常使用的定位技术有：TOA(Time Of Arrival)、TDOA(Time Difference Of Arrival)、AOA(Angle Of Arrival)、贝叶斯滤波法、模式识别法、RSSI(Received Signal Strength Indication)等。

TDOA 技术实现节点定位可以获得较高的定位精度，但是要求节点间严格同步，造成节点体积大、成本高等问题。基于 AOA 技术的系统需要无线天线原理，这会极大地增加系统的复杂性和体积。而贝叶斯法、模式识别法则要求节点具有很强的计算能力和很大的存储能力，这对于无线传感器网络来讲是一个很大的挑战。

无线传感器网络节点信号在大气环境中传播时，由于各种环境因素的影响，信号强度会随着传播距离的增加而衰减，这种现象表明传播距离和信号强度变化之间有着一定的函数关系，节点定位时便可利用这点关系。而且，收发信号模块在传感器节点中很容易配置。所以，近些年来，研究人员越来越多地开始将 RSSI 技术用于传感器节点定位中。

已有的使用 RSSI 定位方法大部分使用的是传统的无线传播信道衰减模型，这类研究中信道模型通常有自由空间模型，对数常态模型或者节点布置前通过大量测试建模的信道传播模型。前面两种模型不能应用于大部分传感器网络。对应于很多环境恶劣的应用场合，或者在实时性要求极高的军事应用场合，后一种方式也是不现实的。

因大部分传感器节点均很容易实现 RSSI 测距功能，所以基于 RSSI 技术的定位系统具有结构简单、体积小、成本低等优点。许多定位系统都可以根据无线信号发射端强度和接收端强度的对应关系来估算发射端和接收端之间的距离。

采用 RSSI 定位的系统中最有名的是 RADAR 定位系统，它是一个使用 802.11 网络的室内定位系统。该系统在监测区域中部署了能覆盖 50 个房间的三个基站，基站和用户均配备能接收并测量信号强度的无线网卡。位置节点定期发射信号分组，且发射信号强度已知，各基站根据接收到的信号强度计算传播损耗，并利用信号传播的经验模型计算未知节点的位置。信号传播经验模型要在实际定位以前通过大量信号强度测试获得。经验模型的获取方法为：在楼层内选取若干测试点，三个基站上记录这些测试点发送过来的信号强度并建立各个点上的位置和信号强度对应的离线数据库  $(x_i, y_i, ss_1, ss_2, ss_3)$ ，其中  $(x_i, y_i)$  为测试点坐标。实际定位时，根据测定信号强度  $(ss_1', ss_2', ss_3')$  和离线数据库记录的强度相比较，并以

$((ss_1 - ss_1')^2 + (ss_2 - ss_2')^2 + (ss_3 - ss_3')^2)^{1/2}$  值最小的那个点的坐标最为未知节点的估计坐标。

这种方法具有较高的定位精度，但要预先做大量的数据测试建立位置和信号强度的离线关系数据库，不过缺点是当基站移动时要重新建立此关系数据库。

文献<sup>[50]</sup>提出的 APIT 算法也是基于 RSSI 测距的定位算法。基本原理为：多个锚节点组合为若干个三角形以覆盖整个感知区域。若区域中有  $n$  个节点，则由数学知识知可以组合为  $C_n^3$  个三角形，然后根据未知节点移动到各个方向时各锚节点接收到的信号能量关系判断未知节点是否位于这些三角形区域的内部。算法实施时需要使用 RSSI 数据以判断未知节点移动时与其相邻节点相比是远离或是靠近某一固定节点。可见，这种算法使用 RSSI 的目的不是获得距离信息而是判断接收信号强度的变化趋势来判断节点是否在此三角形区域内。

文献<sup>[51]</sup>也对 RSSI 技术进行了广泛深入的研究，该研究表明，利用无线信号强度的收发机制可以明显改进传感器节点定位精度，从总体性能评价来看，基于 RSSI 定位的技术将成为最具潜力的测距定位技术之一。

## 4.3 基于 BFGS 算法的 RSSI 定位系统

### 4.3.1 最小二乘算法

已知如图(4.1)所示 1, 2, 3, 4 等  $n$  个锚节点的坐标，分别为  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ ,  $\dots$ ,  $(x_n, y_n)$ ，它们到未知节点的距离分别为  $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ ，假设未知节点的坐标为  $(x, y)$ ，则存在下列公式：

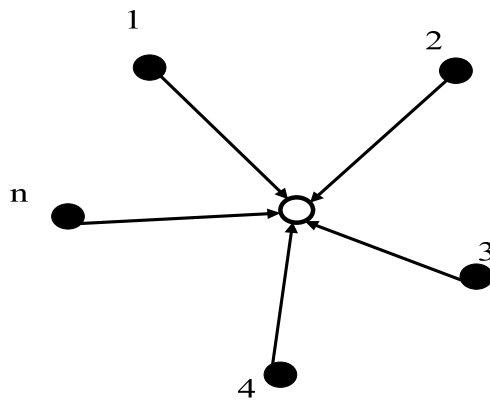


图 4.1 最小二乘法



$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = d_2^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (4.3.1)$$

从第一个方程开始分别减去最后一个方程，即可得到线性方程组：

$$AX = b \quad (4.3.2)$$

其中：

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \quad (4.3.3)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4.3.4)$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix} \quad (4.3.5)$$

使用标准的最小二乘法可以得到未知节点的坐标为：

$$x_{ls} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4.3.6)$$

### 4.3.2 BFGS 算法

#### (1) 算法原理

假设无约束极值问题是  $f(x)$  二阶连续可微函数，设  $x_k$  是其极小点  $x^*$  的一个近似，将  $f(x)$  在  $x_k$  附近做 Taylor 展开，有

$$f(x) = f_k + g_k^T (x - x_k) + \frac{1}{2} (x - x_k)^T H_k (x - x_k) \quad (4.3.7)$$

其中  $f_k = f(x_k)$ ， $g_k = g(x_k) = \nabla f(x_k)$ ， $H_k = H(x_k) = \nabla^2 f(x_k)$ 。式(4.3.7)的近似梯度可以表示为

$$g \approx g_k + H_k (x - x_k) \quad (4.3.8)$$

该近似函数的极小点需要满足

$$g_k + H_k (x - x_k) = 0 \quad (4.3.9)$$

$$x = x_k - H_k^{-1} g_k \quad (4.3.10)$$

当  $f(x)$  是二次函数,  $H$  是常数阵时, 从任一点  $x_k$  出发, 用(4.3.10)式只要一步就可以计算出  $f(x)$  的极小值  $x^*$ 。

当  $f(x)$  不是二次函数时, 式(4.3.7)仅是在极小点  $x_k$  附近的近似表达。这时按(4.3.7)式求得的极小点, 也只是  $f(x)$  的极小点  $x^*$  的一个近似值。在这种情况下。这时我们常取  $-H_k^{-1}g_k$  为搜索方向, 即

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k - \alpha_k H_k^{-1} g_k \\ \alpha_k : \min_{\alpha} f(x_k - \alpha_k H_k^{-1} g_k) \end{cases} \quad (4.3.11)$$

按照(4.3.11)式求函数  $f(x)$  的极小点的方法称为 Newton 法, 这里所确定的搜索方向  $-H_k^{-1}g_k$  为  $f(x)$  在  $x_k$  点的 Newton 方向。Newton 方向是最好的搜索方向, Newton 法是迭代次数最少的无约束算法, 具有二次收敛速度。但是由于 Newton 方向的构成需要计算目标函数的二阶导数矩阵及其逆矩阵, 不仅计算量巨大, 而且存在不可避免的计算误差, 从而导致 Newton 法无法实际应用。拟 Newton 法的基本思想是设法构造一个矩阵  $H_k^{\%}$ , 用它来逼近二阶导数矩阵  $H_k^{-1}$ 。

1959 年 Davidon 提出的, 后来经 Fletcher 和 Powell 做了改进, 形成了 Davidon-Fletcher-Powell 算法, 简称 DFP 算法。该算法的修正公式为

$$H_{k+1}^{\%} = H_k + E_k = H_k - \frac{H_k y_k y_k^T H_k}{y_k^T H_k y_k} + \frac{s_k s_k^T}{y_k^T s_k} \quad (4.3.12)$$

其中  $s_k = x_{k+1} - x_k$ ,  $y_k = g_{k+1} - g_k$ 。而 DFP 方法, 由于一维搜索的不精确和计算误差的积累可能导致某一次迭代中  $H_k$  的奇异。于是, 1970 年由 Broyden、Fletcher、Goldfarb 和 Shanno 各自从不同的角度出发, 得到改进 DFP 方法不足的修正公式(4.3.13), 即是著名的 BFGS 算法。由于 BFGS 法对一维搜索的精度要求不高, 并且由它产生的  $H_k$  不易变为奇异矩阵, 因此 BFGS 法比 DFP 法具有更好的数值稳定性, 更具有使用性。

$$H_{k+1}^{\%} = H_k - E_k = H_k - \frac{H_k y_k y_k^T H_k}{y_k^T H_k y_k} + \frac{s_k s_k^T}{y_k^T s_k} + w_k w_k^T \quad (4.3.13)$$

其中  $w_k = (y_k^T H_k y_k)^{1/2} \left( \frac{s_k}{y_k^T s_k} - \frac{H_k y_k}{y_k^T H_k y_k} \right)$ 。

由上面的算法分析我们知道, 我们需要把定位问题表述为最优化问题, 由于测距误差的

存在，现实的测距模型为  $AX + N = b$ ，我们要求误差尽可能的小，那么  $\min N = \min(b - AX)$ ，我们定义优化模型为：

$$\min F(x, y) = \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i, y_i) \quad (4.3.14)$$

其中  $f(x_i, y_i) = \left| d_n^2 - d_i^2 + x_i^2 - 2x(x_i - x_n) - x_n^2 + y_i^2 - 2y(y_i - y_n) - y_n^2 \right|^2$ ， $i = 1, 2, \dots, n-1$ 。下面我们给出如何使用BFGS算法进行定位。

#### (2) BFGS算法步骤

Step 1, 给定初始点  $x_0$ ，初始矩阵  $H_0$ ，控制误差  $\varepsilon$ ，计算  $g_0$ ，令  $k = 0$ 。

Step 2, 令  $p_k = -H_k g_k$ 。

Step 3, 由精确一维搜索确定步长  $\alpha_k$ ， $f(x_k + \alpha_k p_k) = \min_{\alpha \geq 0} f(x_k + \alpha p_k)$ 。

Step 4, 若  $\|g_{k+1}\| \leq \varepsilon$ ，则说明本次迭代计算得到的  $x_{k+1}$  已经达到了控制误差的要求，说明

我们找到了近似解  $x^* = x_{k+1}$ ，停止迭代，输出计算结果；否则令  $s_k = x_{k+1} - x_k$ ，

$y_k = g_{k+1} - g_k$ ，计算  $w_k$ 。

Step 5, 根据BFGS修正公式计算  $H_{k+1}^{\%}$ ，令  $H_{k+1} = H_{k+1}^{\%}$ ， $k = k + 1$ ，转step2。

### 4.4 仿真结果及分析

本文采用 Matlab 对算法在二维区域内进行无线传感器网络节点定位仿真，并使用平均误差和最大误差 2 个量来衡量算法的性能。我们在  $100m \times 100m$  的平面区域内进行了测试，该区域左下角坐标为  $(-50, -50)$ ，右上角坐标为  $(50, 50)$ 。未知节点位于  $(0, 0)$  点，锚节点随机分布在区域内。所有锚节点具有相同的功能和性能，不存在通信干扰，采用理想的无线传播模型。锚节点数目分别为 4, 6, 8, 10, ..., 18, 20 时，每个仿真实验运行 100 次，所有仿真结果分别取 100 次仿真的平均值和最大值，仿真结果如下图(4.1)、图(4.2)所示。

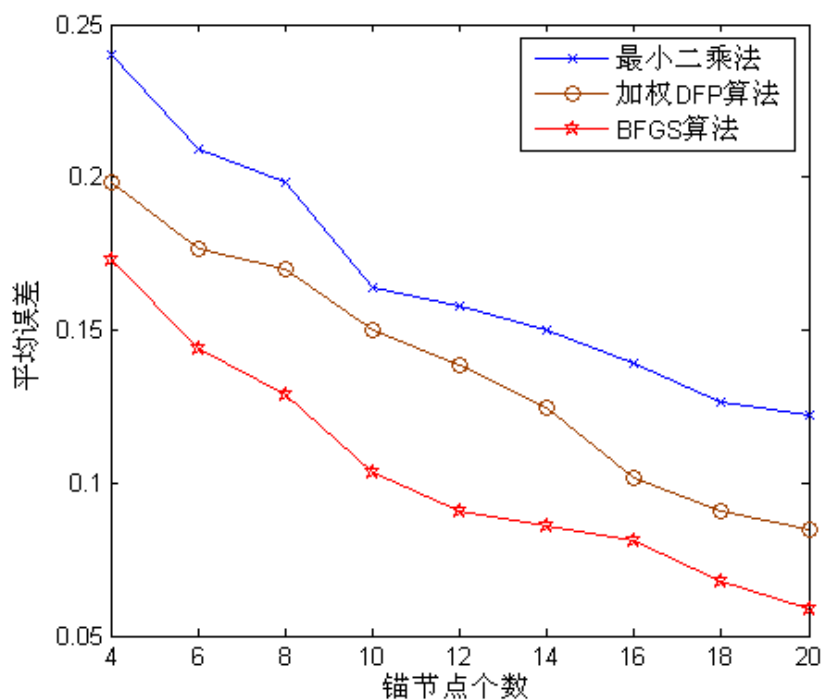


图 4.1 当锚节点从 4 到 20 变化时的平均误差

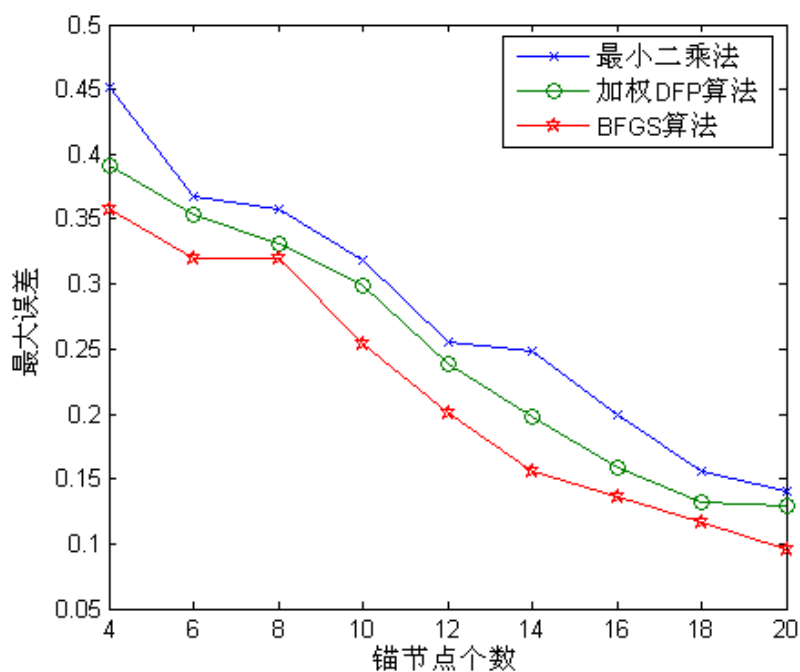


图 4.2 当锚节点从 4 到 20 变化时的最大误差

由图(4.1)和图(4.2)可以看到,随着锚节点的增多,最小二乘算法、DFP算法和BFGS算法的定位平均误差和最大误差都在减小,其中DFP算法的平均误差和最大误差均小于最小二乘算法的误差,我们提出的基于BFGS算法的无线传感器网络定位的平均定位误差和最大误差均小于上述两种方法的。这充分说明了我们所提方法的在传感器网络定位中的稳定性和有效性。

## 4.5 本章小结

本章重点介绍了工程数学中拟牛顿法在无线传感器定位技术中的应用，比较了最小二乘法和加权变尺度法、BFGS 算法的定位特性，最小二乘法的定位精度较低，但计算速度较快，适合定位精度要求较低的应用领域；加权变尺度法定位精度较高，在锚节点均匀分布的情况下，能在一定程度上提高系统的定位精度，表现出较好的性能。本文提出基于 BFGS 算法的无线传感器网络定位。BFGS 算法跟 DFP 算法同样具有二次终止性，同时 BFGS 算法还具有超线性收敛性。对于 DFP 算法，由于一维搜索的不精确和计算误差的积累可能导致迭代矩阵奇异，而 BFGS 算法对一维搜索的精度要求不高，并且由它产生的迭代矩阵也不易奇异。因此 BFGS 算法比 DFP 算法具有更好的数值稳定性，更适合于无线传感器网络定位。

从仿真结果可以看出锚节点变化一致均匀分布的情况下，BFGS 算法的定位精度最高，能够表现出较好的定位性能。

## 第五章 基于 Shadowing 模型的改进无线传感器网络定位

### 5.1 概述

无线信号从选定设备发射端发出之后,在其到达接收端之前所经过的所有路径,统称为无线信号传输信道。无线信号传输信道的优劣对于传送中的信号有很大影响,是无线信号传播模型设计时需要重点考虑的问题。通常,发射端和接收端之间的传播路径非常复杂,可能为没有障碍物的简单的视距传播,也可能会遇到很复杂的地物地形,例如信号可能会经过墙壁,山丘,甚至树木等造成一定的衰减。因此,无线信号传输信道的特性是设计无线信号传播模型时首先考虑的关键问题。

引起无线信号不规则的因素主要有两个:硬件设备因素和传输媒介因素。硬件设备因素包括发射功率、天线增益、天线类型、接收判决门限、接收机灵敏度以及信噪比等;传输媒介因素包括背景噪声、媒介类型以及其他一些环境因素,比如传输过程中的障碍物、温度、湿度等等。一般来说,无线传输不规则性是由硬件设备的异质性和传输媒介的非各向同性特性引起的。

现有的经验模型按其来源来划分,可以分为确定性模型、经验模型、半确定性半经验模型三类。其中,确定性模型是对具体的现场环境应用电磁理论计算的方法;经验模型是通过对大量测量数据的统计分析得到的数学模型,不需要环境的详细信息;半确定性半经验模型是基于把确定性方法用于一般的市区或室内环境中导出的公式。确定性模型应用电磁波传播原理来推导信号传播的数学模型,可靠性高,因而越来越受到学术界关注,但是其计算量很大,目前只适用于微蜂窝或微微蜂窝的模型预测。经验模型所得到的结果来源于大量的实际测量结果,可靠性也很强,因此经验模型是当前使用较为广泛的传播模型但是由于使用经验模型通常需要提前采集数据样本以便建模,对环境以及测试设备要求较高,导致该方法的局限性。在文献中,研究人员们常常结合两种方法,即使用半经验半确定性模型简单的预测模型。

在对无线传感器网络的覆盖以及无线传感器节点定位的相关研究中,大多数时候用到的是传播路径损耗模型,这里,我们主要讨论文献里以及现在科学研究中常用到的几种信道模型:自由空间传播模型(Free Space Propagation Model), Two-Ray Ground Reflection Model, COST231-Hata 模型,以及 Okumura-Hata 模型。

#### (1) 自由空间传播模型<sup>[52]</sup> (Free Space Propagation Model)

自由空间传播模型用来预测接收端和发射端间没有任何障碍物的视距(Line of Sight, LOS)信道时的接收信号强度。在此种无线信道传播模式下,接收端接收到的信号强度与距离的平方成反比。自由空间中,当接收端和发射端的距离为  $d$  时,接收信号的平均功率  $P_r(d)$  通常由 Friis 自由空间公式(Friis Free Space Equation)给出:

$$P_r(d) = \frac{P G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (5.1.1)$$

其中,  $P$  为发射功率;  $G_t$  为发射端天线的增益;  $G_r$  为接收端天线的增益;  $L$  是与传播无关的系统损耗因子;  $\lambda$  为波长,单位为米(m);  $d$  为发射端与接收端之间的距离,单位为米(m)。一般情况下,我们取  $G_t = G_r = 1$ ,  $L = 1$ 。

由式(5.1.1)可以看出,  $d=0$  时接收功率是无法定义且没有意义的,因此,模型引入近地距离  $d_0$  (reference distance)作为参考距离,在  $d_0$  处接收的功率则为参考功率。当  $d > d_0$  时,接收功率  $P_r(d)$  与在  $d_0$  处的接收功率  $P_r(d_0)$  相关。这样,公式(5.1.1)可由公式(5.1.2)表示如下:

$$P_r(d) = \frac{P G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} = \frac{P G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2 L} \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad (5.1.2)$$

通常情况下,我们取  $d_0 = 1$ 。

自由空间模型是一种在理想环境下的信号传输模型,它认为发送者和接受者之间只存在一条信号传输路径。但是因为 Free Space Propagation Model 只考虑了信号只在发送节点和接收节点之间的直线传输,没有考虑信号会碰到障碍物出现反射的情况等,是的这种传输模型在实际应用中有很大的局限性。

## (2) Two-Ray Ground Reflection Model

针对 Free Space Model 的这种不足,有人又提出了 Two-Ray Ground Reflection Model。它的计算公式为:

$$P_r(d) = \frac{P G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \quad (5.1.3)$$

它增加了两个参数  $h_t$  和  $h_r$ , 分别表示发送节点的天线高度和接收节点的天线高度。而且 Two-Ray Ground Reflection Model 中接收信号强度拥有距离的四次方成比例关系的衰减,这使得 Two-Ray Ground Reflection Model 比 Free Space Model 的衰减快的多。所以在实际应用中,对于距离值较大的情况 Two-Ray Ground Reflection Model 的预测较好,而对于距离较小的情况 Free Space Model 的预测较准,所以可以根据不同的应用选择不同的合适模型。

### (3) Okumura-Hata模型<sup>[53]</sup>

Okumura模型是预测城区内信号时使用最广泛的模型<sup>[53]</sup>，它是由日本的Okumura在大量测试数据基础上统计出来的以曲线图表示的传播模型。但它适用范围窄，应用不太方便。在此基础上，Hata 用数学回归分析的方法拟合出便于计算机计算的经验公式，称之为Okumura-Hata 公式。该模型以城区无线传播损耗为标准，其它地区若要应用此模型需要在此基础上加以修正。

Okumura-Hata 模型的适用频率范围在 150MHz~1500MHz,如 GSM900。该模型如下公式所述：

$$L_{50}(\text{市区})(\text{dB})=69.55+26.16\log(f_c)-13.82\log(h_{te})-a(h_{re}) \\ + (44.9-6.55\log(h_{te}))\log(d) \quad (5.1.4)$$

其中， $f_c$  为载波频率，范围从 150MHz； $h_{te}$  为有效的发射端天线高度，范围从 30m 到 200m； $h_{re}$  为有效的接收端天线的高度，范围从 1m 到 10m； $d$  为接收端到发射端之间的距离(km)； $a(h_{re})$  为有效移动天线修正因子，是覆盖区域大小的一个函数，也是接收端有效天线高度的函数。 $a(h_{re})$  可以表示为：

$$a(h_{re}) = \begin{cases} \text{中小城市 } (1.1\log(f_c) - 0.7)h_{re} - (1.56\log(f_c) - 0.8) \text{ dB} \\ \text{大城市 } \begin{cases} 8.29(\log(1.54)h_{re})^2 - 1.1 \text{ dB} & f_c \leq 300\text{MHz} \\ 3.2(\log(11.75h_{re}))^2 - 4.97 \text{ dB} & f_c \geq 300\text{MHz} \end{cases} \end{cases} \quad (5.1.5)$$

### (4) COST231-Hata 模型

COST231-Hata 模型是科学和技术研究欧洲协会(EURO-COST)组成的 COST 工作委员开发的 Hata 模型的扩展版本。由于 DSC1800 的出现，以及 3G 的工作频率都在 2GHz 左右，原来的 Okumura-Hata 公式已经不再适用，于是 COST231-Hata 将 Okumura-Hata 模型的频率范围扩展到 2GHz，其公式如下所示：

$$L_{50}(\text{市区})(\text{dB})=46.3+33.9\log(f_c)-13.82\log(h_{te})-a(h_{re}) \\ + (44.9-6.55\log(h_{te}))\log(d)+C_M \quad (5.1.6)$$

其中， $f_c$  范围从 1500MHz 到 2000MHz； $h_{te}$  范围从 30m 到 200m； $h_{re}$  范围从 1m 到 10m； $d$  的范围从 1km 到 20km； $a(h_{re})$  的定义如公式(5.1.5)所示； $C_M$  为大城市中心校正因子。

$$C_M = \begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{中等城市和郊区} \\ 3 \text{ dB} & \text{大城市中心} \end{cases} \quad (5.1.7)$$

但是 Hata 模型是在大量测试基础上得到的经验模型，可扩展性不高，而且不同的环境对



信号传播的影响也不同,比如军事应用中没有条件进行预先的采样和数据分析等,这样就没有办法利用这种基于经验值的方法。而且所选信号频率范围具有一定的局限性,随着科技的不断发展,此类传播模型也需要不断的修改完善。

## 5.2 遮蔽(Shadowing Model)信号模型

从公式(5.1.1)、(5.1.2)和(5.1.3)中我们可以看到,接收信号强度和距离之间的关系都是一个确定的函数,因此信号传输在空间中呈现出一个理想的圆形。但是在实际环境下,由于多径发射、障碍物的阻碍等情况,实际的信号中会存在一些噪声,并且呈现各向异性的特点。为了体现各向异性的特点,Shadowing Model 中考虑了噪声对于信号强度的影响。Shadowing Model 主要有两部分组成:

第一部分是路径衰减模型,其表达式如公式(5.2.1)所示:

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\beta \quad (5.2.1)$$

其中  $d_0$  和  $P_r(d_0)$  分别为参考距离和参考距离下的接收信号能量,  $\beta$  是路径损耗系数(Path loss exponent),路径损耗系数  $\beta$  和环境有很大关系,在不同的环境之下其值也各有不同,通常介于 2~6 之内,下表(5-1)给出通常采用的一些  $\beta$  值。

表 5-1 路径衰减系数经验值

环境		$\beta$
户外	自由空间	2
	城市	2.7-5
大楼内	可视距	1.6-1.8
	障碍物	4-6

$\beta$  越大意味着环境中存在着越多的障碍物,这样信号随着距离的衰减就会非常快。通常,可以将上述公式转化为以分贝(dB)的形式表示,这样可以表述为以下(5.2.2)式:

$$\left[ \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (5.2.2)$$

模型第二部分就是需要考虑的环境中存在的噪声干扰,在公式中是以随机数  $X_{dB}$  来表示,

$X_{dB}$  是一个以 0 为平均值以  $\sigma_{dB}$  为方差的高斯分布的随机数,  $\sigma_{dB}$  称为遮蔽方差(Shadowing deviation), 它的值是通过环境测试确定的, 表(5-2)给出了一些常见环境中的  $\sigma_{dB}$  值。将上述两部分综合起来, 便是整个 Shadowing Model 模型的公式(5.2.3):

$$\left[ \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (5.2.3)$$

从公式(5.2.3)中我们可以看出, 由于 Shadowing Model 引入了随机数作为传输的噪声, 这就使得信号的传输不再是一个理想的圆形, 更加符合现实中的信号传输情况, 因为应用的最为广泛。

但是我们可以看出, 虽然在上述的 Shadowing Model 中考虑了环境中噪声的影响, 但是由于其模型公式中的参数  $\beta$ ,  $X_{dB}$  都依赖于对环境的测试。而且同一环境中由于障碍物之类的阻碍其值的变化也很大, 这使得在实际系统中利用 RSSI 直接计算距离并不精确。所以有些算法并不利用 RSSI 信息直接计算距离, 比如 APIT 和 SBL 算法中, 而仅仅根据 RSSI 值的大小来判断相互节点之间距离的大小。因为通常在同一方向上, 信号强度基本上能够满足随距离的增加而单调递减的规律, 这样可以有效降低由于模型不准确带来的误差。但是这种方法由于只是判断 2 个节点距离之间的远近, 并不计算实际距离, 所以就需要更多的锚节点才能得到足够好的定位精度。

表 5-2 环境噪声经验值

环境	$\sigma_{dB}$
户外	4-12
室内障碍物较少	7
室内障碍物较多	9.6
工厂可视距	3-6
工厂有障碍物	6.8

### 5.3 改进的质心定位算法

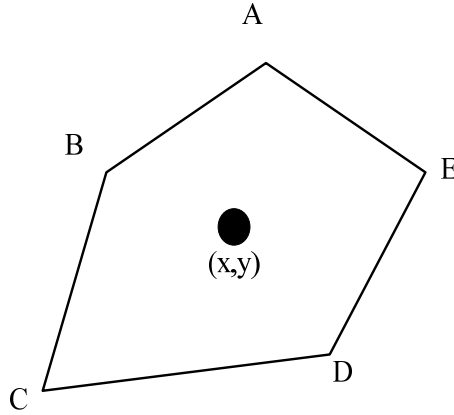


图 5.1 质心定位算法图示

多边形的几何中心称为质心，多边形顶点坐标的平均值就是质心节点的坐标。如图(5.1)所示，多边形  $ABCDE$  的顶点坐标分别为  $A(x_1, y_1)$ ， $B(x_2, y_2)$ ， $C(x_3, y_3)$ ， $D(x_4, y_4)$ ， $E(x_5, y_5)$ ，其质心坐标为：

$$(x, y) = \left( \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}, \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5}{5} \right) \quad (5.3.1)$$

质心定位算法首先确定包含未知节点的区域，计算这个区域的质心，并将其作为未知节点的位置。

根据质心定位算法，未知节点的坐标可以直接由通信半径范围内的所有锚节点坐标，通过公式(5.3.1)计算得到。但是直接根据该公式计算得到的未知节点坐标误差较大，为了提高定位精度，减小定位误差，赵<sup>[54]</sup>提出了对质心定位算法的改进，该算法能够有效降低误差，但是对于积累误差不能较好的减小，另外在使用Shadowing信号传输模型进行距离计算时，其只是求取了多个参考节点的平均值，并使用此平均值作为筛选优选节点的依据。由于不同的参考锚节点之间的距离不同，最终以此参考距离计算出的未知节点与锚节点直接的距离也会有较大的不同，如果全部取距离平均值作为最终的筛选依据，这将不能有效筛选最优表达意义的节点。为此我们提出了基于Shadowing信号模型的改进质心定位算法。

三边测量法如图(5.2)所示，已知  $A, B, C$  三个节点的坐标分别为  $(x_1, y_1)$ ， $(x_2, y_2)$ ， $(x_3, y_3)$ ，以及他们到未知节点  $D$  的距离分别为  $d_1$ ， $d_2$ ， $d_3$ ，我们假设未知节点为  $S$ ，其坐标为  $(x, y)$ 。

那么存在如下公式：

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}=d_1 \\ \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}=d_2 \\ \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}=d_3 \end{cases} \quad (5.3.2)$$

理想情况下，分别以每个锚节点到未知节点的距离为半径做圆，那么三个圆的交点就是未知节点的位置，也就是我们在定位中需要得到的未知节点坐标，如图(5.2)。

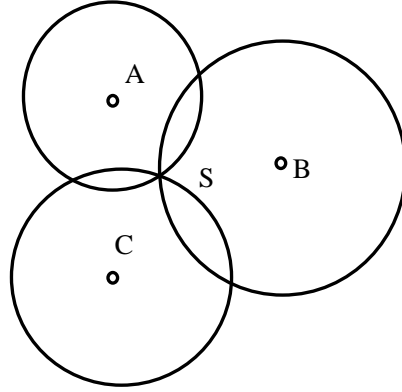


图 5.2 理想测量示意图

但是现实中，由于信号传播过程中，存在路径损耗等各种误差的影响，我们得到的测量结果如下图(5.3)所示。式(5.3.2)两边分别取平方，就分别表示三条直线  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$ 。 $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  三条直线的交点就是现实测量中得到的未知节点的坐标。

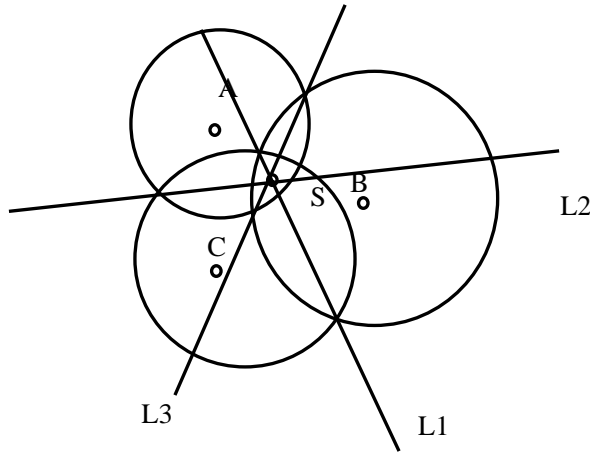


图 5.3 实际测量示意图

### 5.3.1 改进的质心定位算法

无线传感器路径损耗对于 RSSI 定位算法的定位精度有很大的影响，在实际环境中，由于多径、绕射、障碍物等原因，无线电传播的路径损耗对测距误差有着不小的影响。通常的三

边定位法没有反映出锚节点对未知节点位置的影响力大小，影响了定位精度。为了提高质心算法的定位精度，我们选择具有较好代表性的节点作为质心定位的参考锚节点。

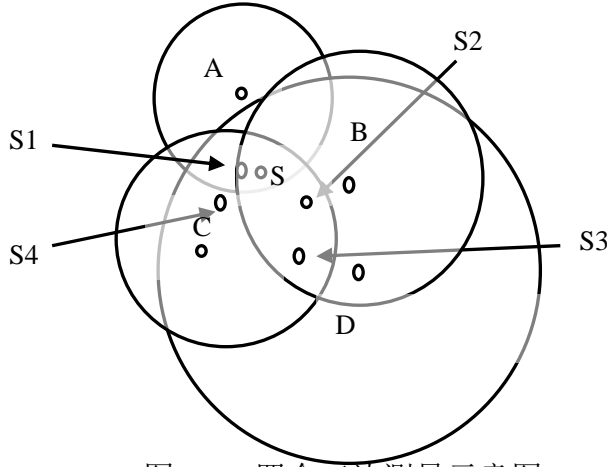


图 5.4 四个三边测量示意图

参考锚节点的筛选原则是：先计算未知节点与锚节点之间的距离  $d$ ，并对  $d$  从大到小进行排序，取前面 4 个锚节点作为参考锚节点，每三个节点一组，两两组合，每个组合均使用三边测量法对未知节点进行做估计。4 个组合可以估计出未知节点的 4 个坐标值， $S_1(x_1, y_1)$ ， $S_2(x_2, y_2)$ ， $S_3(x_3, y_3)$  和  $S_4(x_4, y_4)$ ，如图(5.4)所示，由未知节点的 4 个估计位置，我们在使用质心算法进行定位，可以得到未知节点坐标为：

$$\begin{cases} x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4} \\ y = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \end{cases} \quad (5.3.3)$$

由图(5.4)我们可以看到，在 4 个锚节点中距离未知节点的距离大小依次为  $d_A < d_C < d_B < d_D$ ，如果直接使用前面是所述三边测量进行估计方法，并使用公式(5.3.3)使用质心算法对未知节点进行定位，则显得不准确，不能够有效的进行定位。为了提高节点的定位精度，我们对未知节点的四个估计位置进行加权方法实现精确定位。由于现实信号传播过程中存在路径损耗，因此距离未知节点越近，越能有效的用于对未知节点的估计。为了表示这种对于较近的估计点对最终的定位起到较大的权重，而对于较远的点起到较小的权重，从而实现更精确的定位，我们对上式(5.3.3)作如下加权：

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{\exp[-(d_A + d_B + d_C)]x_1 + \exp[-(d_A + d_B + d_D)]x_2 + \exp[-(d_B + d_C + d_D)]x_3 + \exp[-(d_A + d_C + d_D)]x_4}{\exp[-(d_A + d_B + d_C)] + \exp[-(d_A + d_B + d_D)] + \exp[-(d_B + d_C + d_D)] + \exp[-(d_A + d_C + d_D)]} \\ y = \frac{\exp[-(d_A + d_B + d_C)]y_1 + \exp[-(d_A + d_B + d_D)]y_2 + \exp[-(d_B + d_C + d_D)]y_3 + \exp[-(d_A + d_C + d_D)]y_4}{\exp[-(d_A + d_B + d_C)] + \exp[-(d_A + d_B + d_D)] + \exp[-(d_B + d_C + d_D)] + \exp[-(d_A + d_C + d_D)]} \end{array} \right. \quad (5.3.4)$$

### 5.3.2 对 RSSI 测距值的校正

在实际环境中，同一个 RSSI 值，在不同的测距点，代表的距离具有较大的差别。如果计算未知节点的位置时，仅仅使用 RSSI 值进行计算，则计算结果就会存在一定的定位误差。为了减小计算误差，我们考虑在所述方法的基础上把锚节点之间的距离和信号强度同时作为参数用来校正 RSSI 的测距值。

$RSSI_i$  表示未知节点接收到锚节点  $B_i$  信号的 RSSI 平均值(单位:  $dBm$ )， $P_i$  表示未知节点接收到锚节点  $B_i$  的信号强度平均值(单位:  $mw$ )，那么两者的转换关系:

$$P_i = 10^{RSSI_i/10} \quad (5.3.5)$$

$RSSI_{ij}$  表示锚节点  $B_i$  接收到锚节点  $B_j$  信号 RSSI 平均值(单位:  $dBm$ )， $P_{ij}$  表示锚节点  $B_i$  接收到锚节点  $B_j$  的信号强度平均值(单位:  $mw$ )，则同理有:

$$P_{ij} = 10^{RSSI_{ij}/10} \quad (5.3.6)$$

$Bd_{ij}$  表示锚节点  $B_i$  和  $B_j$  之间的距离。 $d_i^j$  表示以锚节点对  $B_i$  和  $B_j$  为参考时代入式(5.3.7)计算得到的从未知节点到锚节点  $B_i$  的距离:

$$\frac{P_{ij}}{P_i} = \left( \frac{d_i^j}{Bd_{ij}} \right)^\beta \quad (5.3.7)$$

从而得到:

$$d_i^j = \frac{P_{ij}^{\frac{1}{\beta}} \times Bd_{ij}}{P_i^{\frac{1}{\beta}}} \quad (5.3.8)$$

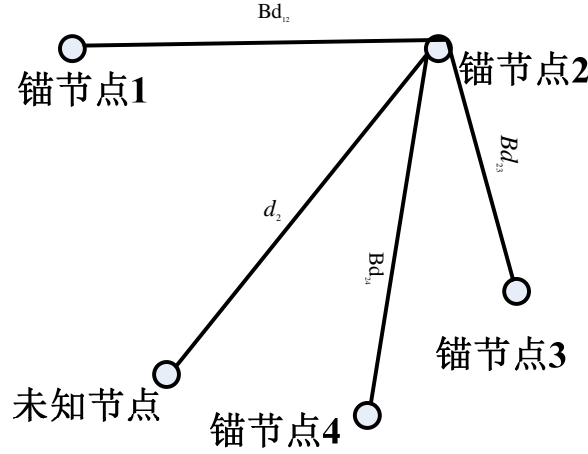


图 5.5 RSSI 测距模型

如图(5.5)所示，在现实生活中，由于信号传播有损耗，因此传播的距离越远，损耗越严重。那么与锚节点 2 距离较远的锚节点 1、锚节点 4 计算得到的锚节点之间的距离  $Bd_{12}$ 、 $Bd_{24}$  肯定存在较大误差，而锚节点 2 与锚节点 3 直接计算得到的距离  $Bd_{23}$  相对来说误差就会较小。为了减小由于大误差引入的定位不准确因素，让距离较近的节点起到较大的作用，而让距离较远的点起到较小的作用，我们引入一种基于距离的加权方法，如下：

$$d_i = \frac{\sum_j \frac{1}{Bd_{ij}} d_i^j}{\sum_j \frac{1}{Bd_{ij}}} \quad (5.3.9)$$

### 5.3.3 算法流程

步骤 1：锚节点  $B_i$  以相同的功率周期性发送自身节点信息，包括节点的 ID，节点的坐标信息，同时节点  $B_i$  会接受其他锚节点  $B_j$  发送的位置信息，并对收到的  $B_j$  的多个  $RSSI_{ij}$  求平均，把此值做为  $B_i$  和  $B_j$  之间的  $RSSI$  值，并根据  $P_{ij} = 10^{RSSI_{ij}/10}$  计算出  $P_{ij}$ ，根据  $B_i$  和  $B_j$  的坐标信息计算  $Bd_{ij}$ ，并将  $P_{ij}$  和  $Bd_{ij}$  广播出去。

步骤 2：未知节点先收集各个锚节点的信息，并记录同一个锚节点的  $RSSI$  均值。并根据

$$\text{据公式： } P_i = 10^{RSSI_i/10}, \quad d_i^j = \frac{P_{ij}^{\frac{1}{\beta}} \times Bd_{ij}}{P_i^{\frac{1}{\beta}}}, \quad d_i = \frac{\sum_j \frac{1}{Bd_{ij}} d_i^j}{\sum_j \frac{1}{Bd_{ij}}}, \text{ 计算出 } d_i。$$

步骤 3: 把步骤 2 中计算出的未知节点到锚节点的距离  $d_i$  进行排序, 选择选择前  $n$  个最小的  $d_i$  对应的锚节点作为参考节点, 未知节点到锚节点距离集合:

$$Dis\_set = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\},$$

锚节点及其位置信息集合:  $Bea\_Pos\_set = \{B_1(x_1, y_1), B_2(x_2, y_2), \dots, B_n(x_n, y_n)\}$

步骤 4: 我们选取距离  $d_i$  最小的 4 个锚节点,

$Sel\_Bea\_Pos\_set = \{B_1(x_1, y_1), B_2(x_2, y_2), B_3(x_3, y_3), B_4(x_4, y_4)\}$ , 把  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  和  $B_4$  两两组合, 建立三边测量集合:

$$Tri\_set = \{(B_1, B_2, B_3), (B_1, B_2, B_4), (B_1, B_3, B_4), (B_2, B_3, B_4)\}。$$

把每组测量集合代入公式(5.3.2)并两两相减, 检验是否有解。如果没有解则用  $B_5$  代替  $B_4$ , 如果还是没有解的话, 则使用  $B_6$  代替  $B_5$ , 直到方程组有解。

步骤 5: 使用步骤 4 中的三边测量集合对未知节点进行估计, 估计坐标为  $S_1(x_1, y_1)$ ,  $S_2(x_2, y_2)$ ,  $S_3(x_3, y_3)$  和  $S_4(x_4, y_4)$ 。

步骤 6: 把步骤 5 得到的未知节点估计带入公式(5.3.3), 得到校正的质心定位算法定位坐标值  $S(x, y)$ 。

步骤 7: 把步骤 5 得到的未知节点估计带入公式(5.3.4), 得到校正的加权质心定位算法定位坐标值  $S(x, y)$ 。

## 5.4 算法仿真

使用MATLAB进算法仿真, 在  $100m \times 100m$  的区域内进行, 仿真区域的四个边缘点的坐标为  $(-50, -50)$ ,  $(-50, 50)$ ,  $(50, 50)$ ,  $(50, -50)$ , 未知节点坐标为  $(0, 0)$ , 锚节点随机分布在该区域内。所有锚节点具有相同的功能和性能, 采用Shadowing传播模型。仿真实验的比较对象为传统的基于RSSI的质心定位算法, 均值加权校正RSSI的质心定位算法<sup>[54]</sup>。

为了验证算法的有效性, 我们进行了如下实验, 首先调节节点的通信半径, 观察通信半径对定位精度的影响; 其次调节锚节点数量, 观察锚节点数量由少到多变化时, 锚节点密度对定位精度的影响; 最后调节路径损耗系数变化时, 对定位精度的影响。仿真中, 锚节点数



目分别为 4,6,8,10,...,18,20 时, 每个仿真实验运行 100 次, 单次的仿真结果如下图(5.6)、(5.7)所示, 分别取锚节点为 5、10 个。所有仿真结果分别取 100 次仿真的平均值和最大值, 仿真结果如下图(5.8)、(5.9)、(5.10)。

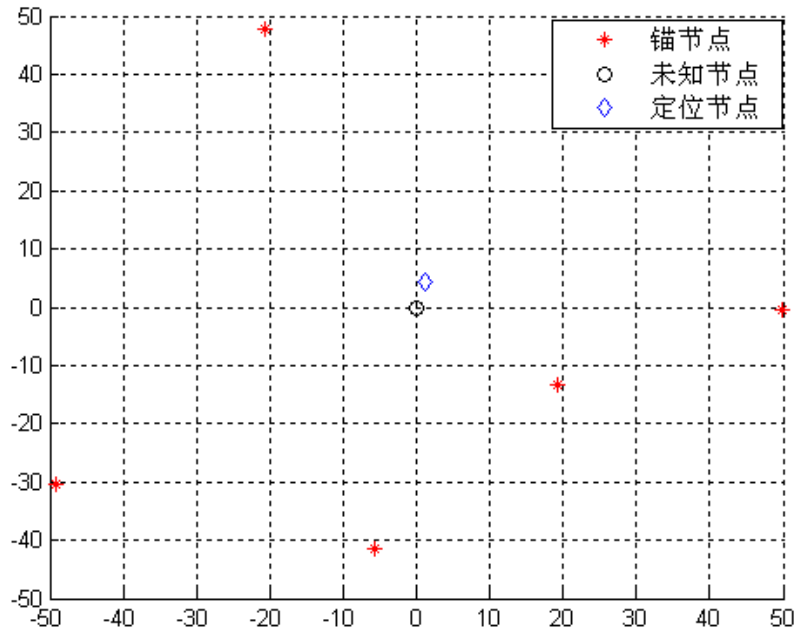


图 5.6 锚节点个数为 5 时加权质心定位算法 MATLAB 仿真结果

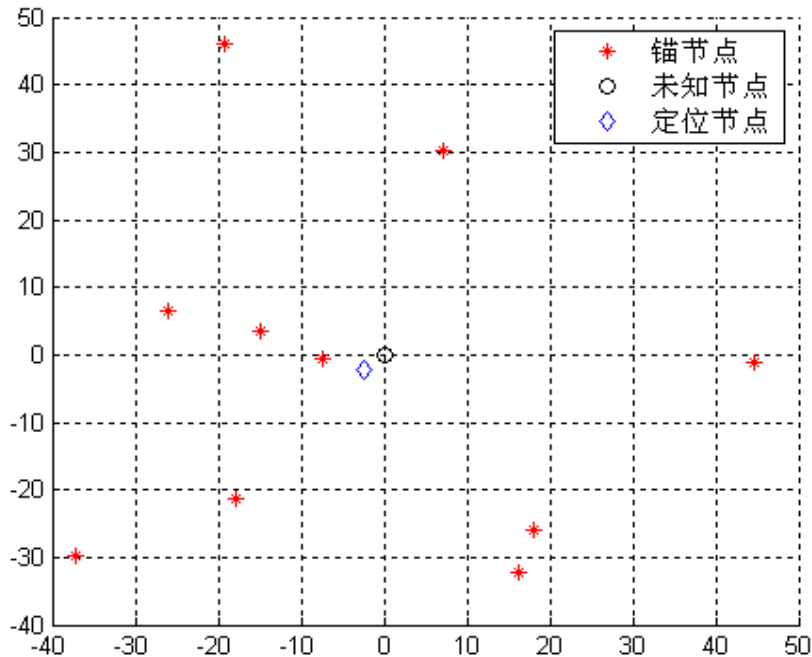


图 5.7 锚节点个数为 10 时加权质心定位算法 MATLAB 仿真结果

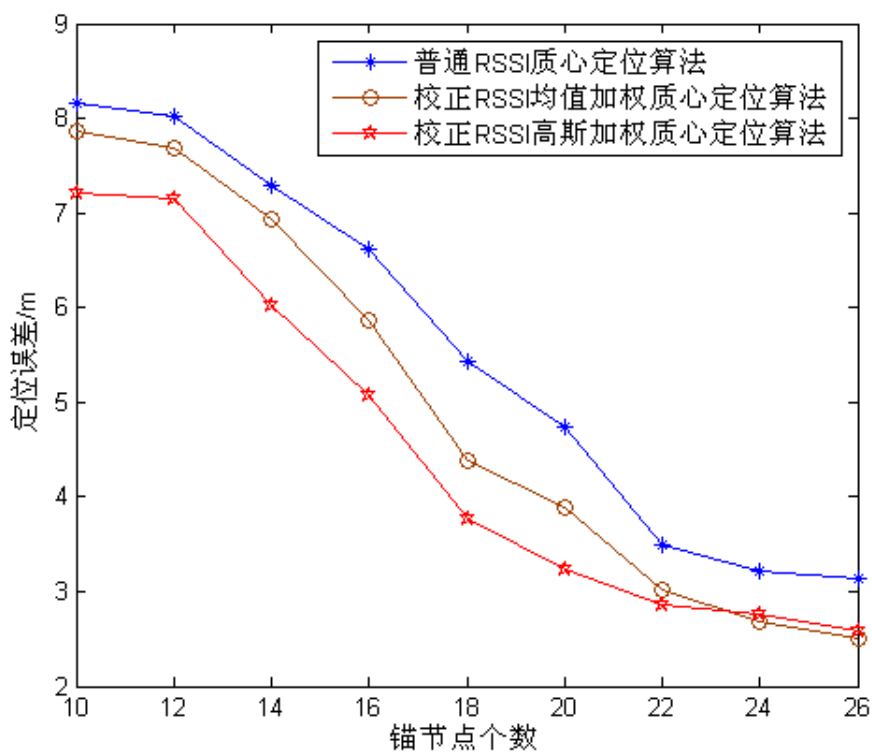


图 5.8 锚节点变化对定位误差的影响

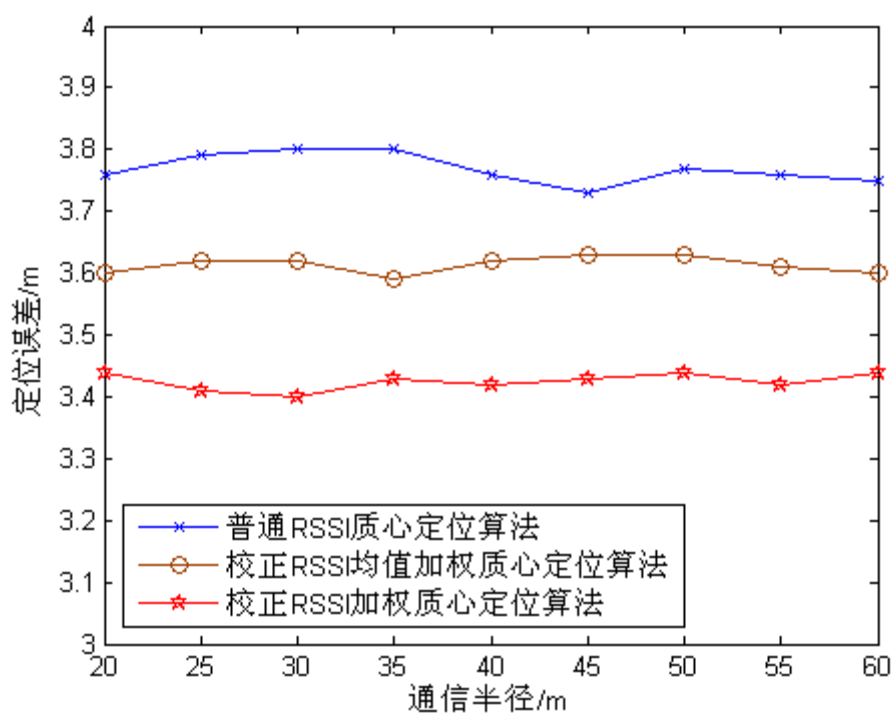


图 5.9 节点通信半径对定位误差的影响

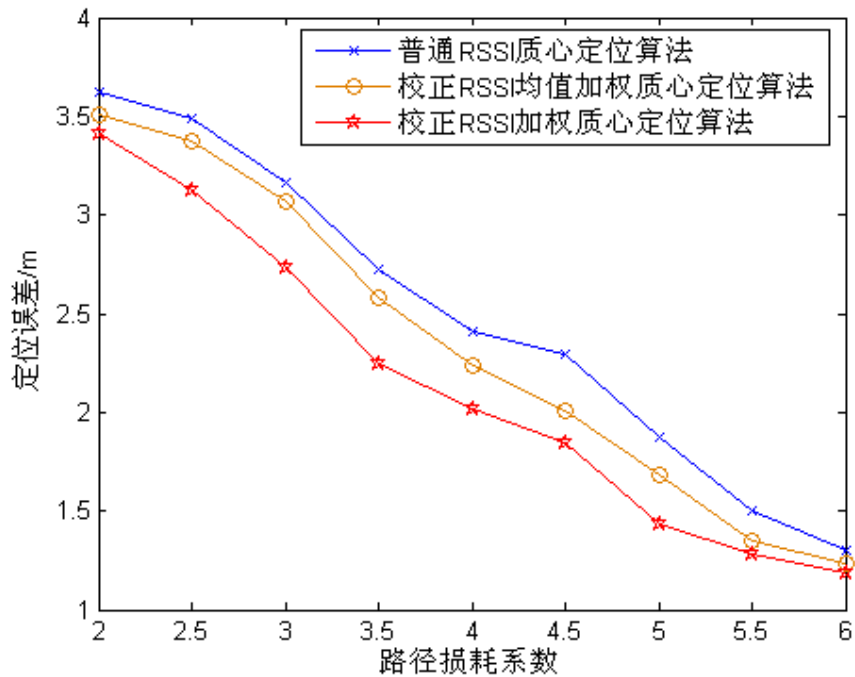


图 5.10 路径损耗系数对定位误差影响

通过本章仿真，由图(5.6)、(5.7)所示，定位系统中随着锚节点的增加，总体来说，未知节点的定位误差有逐步减小的趋势，定位精度也在不断提高。

仿真首先研究锚节点个数变化时对定位误差的影响，即锚节点密度对定位精度的影响。此时设定路径损耗系数为 2，节点通信半径为 50m，锚节点数量从 4 增加到 20 个，每次增加两个锚节点，定位误差如图(5.8)所示。由图可以看到，随着锚节点数量的增加，三种定位方法的定位误差均随之下降。与其他定位算法相比，我们使用的校正 RSSI 加权质心定位算法定位误差最小。

我们在研究通信半径对定位误差的影响，此时路径损耗系数设定为 2，锚节点个数为 6，通信半径从 20m 按照步长为 5m，增加到 60m，定位误差曲线如图(5.9)所示，随着节点通信半径的增加，定位误差曲线并没有太大的变化。从曲线图可以看到，本文提出的定位算法误差均小于比较算法。

最后我们研究路径损耗系数对定位精度的影响，此时设定为 6 个锚节点，通信半径为 50m，路径损耗系数从 2 开始，按照步长为 0.5，路径损耗系数逐渐变化到 6，定位误差如图(5.10)所示，随着路径损耗系数增加，三种定位算法的定位误差均随之减小，本文提出定位算法的误差最小。从定位误差曲线图(5.10)，我们可以看到，路径损耗系数较小时，三种定位算法的定位误差相差较大，随着路径损耗系数增大，三种定位算法的定位误差逐渐靠近，是否因为路径损耗系统增大，三种定位算法的定位误差会趋于相同，这个还有待于后续研究。

## 5.5 本章小结

本章重点介绍了基于 Shadowing 模型的改进无线传感器网络定位算法，此研究定位系统中，基本定位算法为质心算法，传统定位算法中质心算法为与距离无关的算法，完全基于网络连通性，无需锚节点和位置节点之间的协调，因此相对来说比较简单且易于实现。本文中我们将质心算法应用于基于 RSSI 定位中，首先基于 RSSI 计算出未知节点到锚节点之间的距离，选取出离未知节点最近的锚节点的组合，由于离未知节点越近的锚节点对未知节点的决定权越大因此接下来对选出来的各锚节点  $(x_i, y_i)$  进行加权，使其满足以上关系。然后对于加权后的各锚节点求其质心，便为未知节点的估计值，此算法可以大大减小质心算法定位误差大的问题，提高定位精度。通过 MATLAB 仿真也可以得出在节点半径、锚节点个数、路径损耗相等的前提下，基于 RSSI 加权定位算法比起其它算法有很大的优越性。

## 第六章 总结展望

### 6.1 本文主要工作总结

针对现有的无线传感器网络定位算法和系统，本文对其进行了阐述，对已有算法进行了分析、研究和比较，在此基础上提出了自己的定位方法以及辅助信号传播模型等，主要工作总结如下：

(1) 基于测距的定位系统中基于 **RSSI** 的定位算法是研究的热点，因为它不需要额外的硬件设备，易于操作，但是缺点在于定位精度不高。最小二乘法为测距中基本算法，针对此算法定位精度不够，中科大孔军、季海波等将工程控制优化中常用的变尺度法 (**DFP** 算法) 应用到无线传感器网络定位问题中。该算法避免了计算二阶导数矩阵及其求逆计算，特别是对高维问题具有一定的优越性，从而实现了节点定位算法。本文提出了一种基于 **BFGS** 算法的无线传感器网络定位，它把无线传感器网络节点的定位问题转化为无约束的最优化问题，不需要计算二阶导数矩阵及其逆矩阵，同时解决了 **DFP** 算法中由于一维搜索不精确和误差积累造成的迭代奇异问题，并且有较好的数值稳定性。仿真结果表明，该算法比基于最小二乘的无线传感器网络定位和基于变尺度的无线传感器网络定位具有更好的定位精度。

(2) 基于 **RSSI** 测距的定位系统的一个关键问题是对信号传播模型进行建模，传统离散数据库模型必须进行大量测试，且容易受环境、节点变化等影响，**RSSI** 传播模型必须更好地反应出距离和传播能量损耗之间的对应关系，它直接关系到定位的精确性。本文中采用 **Shadowing** 经验模型并在此基础上进行改进优化，最后对测距结果进行优选。经过大量仿真实验比较后，发现此信号传播模型在基于质心的定位算法可以更好地模拟距离与信号能量之间的对应关系，提高定位精度，减小定位误差。

### 6.2 进一步研究方向展望

虽然在实验环境中 **RSSI** 可以表现出良好的特性，通过改进定位算法和信号传播模型来减小定位误差提高定位精度，但是在现实环境中，温度、障碍物、传播模式等条件往往都是变化的，使得该技术在实际应用中仍然存在困难，有待进一步研究。另外有以下几个方面的问题有待我们深入研究：

(1) 锚节点需要自身配备 **GPS** 定位装置，费用较高，因此整个定位系统中应尽量减少锚节点的数量，移动锚节点的情况有待以后的研究。

- (2) 本文研究的算法是处于节点部署较规则的网络中，以后的研究需要考虑不规则的网络部署环境。
- (3) 本文研究的定位算法，未知节点是静态的，下一步需要研究动态的未知节点在无线传感器网络中的节点自身定位技术。
- (4) 由于节点能耗有限，改进算法如何在提高定位精度降低定位误差的情况下降低节点能耗也是一个待研究的问题。

## 致谢

本研究及学位论文是在我的导师陈小惠教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。他严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我。从课题的选择到论文的最终完成，陈老师都始终给予我细心的指导和不懈的支持。两年多来，陈教授不仅在学业上给我以精心指导，同时还在思想、生活上给我以无微不至的关怀，在此谨向陈老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。我还要感谢在一起愉快的度过研究生生涯的主楼 1310 的各位同窗季伟波、杨凤伟、姬雷、刘银锋、焦红平、刘晖等，感谢你们的善良和朴实让我时刻感觉到温暖，正是由于你们的帮助和支持，我才能克服一个一个的困难和疑惑，直至本文的顺利完成。还有师弟师妹林雪琴、赵丽、林圣东、吴伟、张国强、华帅、赵瑞卿、李湘林等，感谢你们给我们这个大家庭带来的欢乐和朝气，感谢你们对于专业知识孜孜不倦的追求和对生活的热情，希望你们都有一个更加美好的未来。在这里我还要感谢我的父母，感谢父母对我 20 年的养育之恩以及对我追求学业的支持，步入社会之后，我将以更加饱满的热情来投身于工作当中，回报所有帮助过我的人。

谢谢大家，祝大家以后的生活幸福、安康。

## 参考文献

- [1]孙利民, 李建中, 陈渝等. 无线传感器网络[M].北京: 清华大学出版社. 2005, 3-25, 135-155, 277-390.
- [2]Brett Warneke, Matt Last, Brian Liebowitz, and Kristofer S. J. Prister.Smart dust Communcating with a cubic-millimeter computer 2001.
- [3][http://www.gov.cn/jrzg/2006-02/09/content\\_183787.htm](http://www.gov.cn/jrzg/2006-02/09/content_183787.htm)
- [4]Want R, Hopper A, Falcao V, et al. The active badge location system [J]. ACM Transactions on Information Systems. 1992, 10(1), 91-102
- [5]Hightower J, Boriello G, Want R. SpotON: An indoor 3D location sensing techonology based on RF signal strength[R]. Technical Report UW CSE 2000-02-02, University of Washington, 2000.
- [6]Priyantha NB, Chakraborty A, Blalkrishnan H. The cricket location support system[C]. In: Proc. of the 6th Annual Int'l Conf. On Mobile Computing and Networking(ACM MOBICOM). Boston,MA,USA: ACM Press. 2000. 32-43.
- [7]孟祥忠, 宋保业.无线传感器网络 HWC 定位算法[J].计算机工程, 2009,35(7):104-106.
- [8]胡荣春.无线传感器网络中的节点定位方法研究[D].合肥:中国科技大学, 2007.
- [9]陈红阳, 基于测距技术的无线传感器网络定位技术研究, 硕士论文, 西安交通大学, 2006.
- [10]W.G.Figel,N.H.Shepherd,and W.F.Trammel,"Vehicle location by a signal attenuation method,"IEEE Trans.Veh.Technol. Nov. 1969 ,18(3), 105-109.
- [11]K.Martinez,J.K.Hart,and R.Ong,"Environmental sensor networks",Computer. Aug 2004, 50-56. 2004.
- [12]黄天祥.无线传感器网络节点自定位技术研究[D].南京: 南京航天航空大学, 2008.
- [13]宋玉梅.无线传感器网络节点定位技术研究与实现[D].成都: 电子科技大学, 2008.
- [14]John A Stankovic.Wireless Sensor Networks[R]. Department of Computer Science University of Virginia. June 19, 2006.
- [15]马祖长, 孙怡宁, 梅涛.无线传感器网络综述.通信学报. 2004, 25(4), 114-124.
- [16]S. Yi,P.Naldurg, R .Kravets. Security-aware ad hoc routing for wireless networks[C]. Proc. of 2001 ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and



- Computing. 2001, 299-302.
- [17]D.E.Bell,L.J.Lapadula.Secure computer systems:mathematical foundations and mode  
[R]. Technical Report M74-244,Mitre Corporation,1975.
- [18]Sasikanth Avancha,Je.rey Underco.er,Anupam Joshi,John Pinkston.Secure sensor  
networks for perimeter protection[M].
- [19]W.R.Heinzelman,J.Kulic,H.Balakrishnam.Adaptive protocols for information  
dissemination in wireless sensor networks[C].Proceedings of the Fifth Annual ACM/  
IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom\_99),  
Seattle,WA. August 1999,174-185.
- [20]J.Li,J.Jannotti,D,Couto,D.Karger.R.Morris,A scalable location service for geographic ad  
hoc routing[C].ACM Mobicom,2000.
- [21]Koen Langendoen,Niels Reijers.Distributed localization in wireless sensor networks: a  
quantitative comparison[J].Computer Networks. 2003,43, 499-518.
- [22]Hongwei Zhang,Anish Arora. GS3: scalable self-configuration and self-healing in  
wireless sensor networks[J].Computer Networks. 2003, 43, 459-480.
- [23]黄进宏, 左菲, 曾明.一种基于能量优化的无线上传感器网络自适应组织结构和协  
议[J].电讯技术 Telecommunication Engineering. 2002 年, 42(6), 25-28.
- [24] Arora,Dutta P,Bapat S, Kulathumani V,Zhang H,Naik V,Mittal V,Cao H,Gouda M,Choi  
Y,Herman T.A line in the sand: A wireless sensor network for target detection,  
classification, and tracking Computer Net-works Journal, Oct2004.
- [25]<http://www.cs.berkeley.edu/~binetude/ggb/>
- [26]Coleri S, Cheung S Y and Varaiya P. Sensor networks form monitoring traffic In Forty-  
Second Annual Allerton Conference on Communication,Control and Computing, Univ  
of Minois, Sept.2004.
- [27]<http://www.xbow.com/>
- [28]Tian He. Chengdu Huang, Brian M.Blum,John A.Stankovic, Tarek Abdelzaher Range-  
Free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks. In Proceedings of the 9th  
annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom),  
San Diego, Califonia,USA:ACM Press. 2(1039, 81-95).
- [29]Spec:Smartdust chip with integrated RF communications.2001.

- [http://www.jhllabs.com/jhill\\_cs/spec/](http://www.jhllabs.com/jhill_cs/spec/)
- [30]Nicolescu D,Nath B.Ad-Hoc positioning system(APS).In:Proc.of the 2001 IEEE Global Telecommunications Conf.Vol.5,San Antonio:IEEE Communications Society, 2001. 2926-2931.
- <http://paul.rutgers.edu/~dnicules/research/aps/aoa-infocom.pdf>
- [31]Niculescu D,Nath B.DV based positioning in ad hoc networks.Journal of Telecommunication Systems. 2003, 22(1/4). 267-280.
- [32]Bulusu N,Estrin D,Heidemann J.Tradeoffs in location support systems:The case for quality-expressive location models for applications.In:Proc.of the Ubicomp 2001 Workshop on Location Modeling for Applications.Atlanta,2001.7.12.
- <http://lecs.cs.ucla.edu/~bulusu/papers/Bulusu01d.pdf>
- [33]L.Girod.V.Bvchovskiy,I.Elson.and D.Estrm.Locating tiny sensors in lime and space:a case study In:Proceedings el 2002 IEEE International Conference on Computer Design. VLSI in Computers and Processors(ICCD'0.)Freiburg,Germany IEEE Computer Society. 2002,9,214-217.
- [34]A Fidner,A.Hopper.P.Steggles.A.Word.P.Webster The anatomy of a context-aware application.In Proceedings of Mobile Composing and Networking (MOSICOM-99). Seattle.Washington,USA.ACM Press. 1999, 59-68.
- [35]PinPoint Corporation.Website,2001.<http://www.pinpointco.com/>
- [36]Lewis Girod and Deborah Estrin. Robust Range Estimation using Acoustic and Multimodal Sensing. In: Proceedings of IEEEERSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS'01), Maui,Hawaii,USA-IEEE Computer Society 2001.2010,3, 1312-1320.
- [37]Jeffrey Hightower,Gaetanu Boriefo.Rov Want SpotON:An indoor 3D Location Sensing Technology Based on BF Signal Strength.Technical Report UW CSE00-02-02, University of Washington,Department of Computer Science and Engineering, Seattle. WA,USA2000.2.
- [38]Andrews Savvides, Chih-Chieh Han,Man, B.Srivastava. Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors in:Proccedings of Mobile Computing and Networking (MOBICOM'01),Rome,Italy,ACM Press. 2001.7, 166-179.

- [39]Dragos Niculescu and Bedri Nath. Ad Hoc Positioning System (APS) using AoA. In: Proceedings of The 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies INFOCOM 2003, San Francisco, CA, USA IEEE Computer and Communications Societies. 2003, 3, 1734-1743.
- [40]Asis Nasipurn and Kai Li. A directionality based location discovery scheme for wireless sensor networks. In: Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Application (WSNA'02), Atlanta, Georgia, USA' ACM Press. 2002, 9, 105-111.
- [41]Priyantha N B, Balakrishnam H, Demaine E, Teller S. Anchor-free distributed localization in sensor networks. Technical Report MIT-LCS-TR-892, MIT Lab for Computer Science, April 2003.
- [42]Bahl P, Padmanabhan VN. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2000. Vol. 2, Tel Aviv: IEEE Computer and Communications Societies. 2000. 775-784.  
<http://research.microsoft.com/~padmanab/papers/infocom2000.pdf>
- [43]Girod L, Estrin D. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing. In: Proc IEEE/RSJ Int'l Conf Intelligent Robot and Systems (IROS'01), Vol. 3, Maui, Hawaii, USA. 2001. 1312-1320.
- [44]G. Han, Deokjai Choi, Wontaek Lim. Reference Node Placement and Selection Algorithm Based on Trilateration for Indoor Sensor Networks. Wireless Communications and Mobile Computing. 2009, 9(8), 1017-1027.
- [45]G. Mao, B. Fidan, B. D. Anderson. Wireless Sensor Network Localization Techniques. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking. 2007, 51(10): 2529-2553.
- [46]Yi. Shang, Wheeler. Ruml, Ying. Zhang, and Markus P. J. Fromherz, Localization from mere connectivity[C], In: ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiHoc'03). June 2003, 201-212.
- [47]L. Doherty, K. Pister and L. El Ghaoui. Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2001). April 2001, 3, 1655-1663.

- [48]孔军, 季海波.基于加权变尺度法的无线传感器网络[J].计算机工程.2009, 35(21), 108-110.
- [49]谢政, 李建平, 汤泽滢. 非线性最优化[M]. 湖南长沙, 国防科技大学出版社, 2003.
- [50]Hongyang CHEN,Kaoru SEZAKI,PingDENG and Hing Cheung SO. An Improved DV-Hop Localization Algorithm with Reduced Node location Error for Wireless Sensor Networks[J]. Communications and Computer Sciences,2008, 91(8), 2232-2236.
- [51]Chong Liu,Kui Wu,Tian He,Sensor Localization with Ring Overlapping Based on Comparison of Received Signal Strength Indicator[C],2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems.
- [52](美)拉帕波特(Rappaport,T.S.)著, 周文安等译.无线通信原理与应用[M].电子工业出版社, 第二版,2006.
- [53]杜巧玲.无线传感器网络三维节点定位问题的研究[D].长春:吉林大学, 通信工程学院,2009.
- [54]赵昭, 陈小惠.无线传感器网络中基于 RSSI 的改进定位算法[J].传感技术学报, 2009, 22(3), 391-394.

## 攻读硕士学位期间发表的论文

[1] 赵飞, 陈小惠. 基于 BFGS 算法的无线传感器网络定位[J]. 计算机技术与发展, 2010.