

硕士学位论文

面向机场环境监测的 WSN 组网技术的研究

**RESEARCH ON WSN NETWORKING
TECHNOLOGY FOR AIRPORT
ENVIRONMENTAL MONITORING**

董梦梦

哈尔滨工业大学
2016 年 6 月

国内图书分类号: TP393.2

学校代码: 10213

国际图书分类号: 681.14

密级: 公开

工学硕士学位论文

面向机场环境监测的 WSN 组网技术的研究

硕士研究生: 董梦梦

导师: 王翥 教授

申请学位: 工学硕士

学科、专业: 仪器科学与技术

所在单位: 信息与电气工程学院

答辩日期: 2016 年 6 月

授予学位单位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: TP393. 2

U.D.C: 681.14

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**RESEARCH ON WSN NETWORKING
TECHNOLOGY FOR AIRPORT ENVIRONMENTAL
MONITORING**

Candidate:	Dong Mengmeng
Supervisor:	Prof. Wang Zhu
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Specialty:	Instrument Science and technology
Affiliation:	School of Information and Electrical Engineering
Date of Defense:	June, 2016
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

机场环境监测存在以目视监测管理为主，监测对象单一独立等问题，缺少一种各个指标综合监测的、多方位一体化的组网方式。本文基于 WSN 技术背景，结合机场环境考虑布局的限制条件，兼顾执行效率、节点数目、能耗及负载均衡等方面进行机场环境监测网络的组网。将机场噪声监测、围界入侵警报和温湿度监测多种监测方向整合到一起时，针对节点浪费和各路径使用不均衡等问题，提出了可以实现监测网络组网布局的 MP-NGC 算法。从网络节点最优布局、通信路径合理分配和负载均衡三大角度来分析如何在延长网络整体工作寿命的同时，确保可以完成实时可靠的数据传输。主要内容如下：

1. 根据机场噪声监测、围界入侵警报和温湿度这三种不同监测对象的数据特点和布设需求，建立机场布局模型以供监测节点初步布设。在完成监测节点初步布设后，利用 NGC 算法进行中继节点布设和组网布局的仿真实验。
2. 针对 NGC 算法仿真中节点浪费和路径使用不均衡等问题对算法进行改进，设计了基于 MP-NGC 算法的一体化组网方式。这种方式以最近贪婪准则为启发式条件，采用轮换传输的多路径数据传输方式，每次发送数据之前判断选定 k 条路径中优先级最高的一条作为本次的工作路径。工作过程主要包括建立通信路由表、确定路径数目和利用 MP-NGC 算法进行节点布局三大部分。
3. 为了进一步延长监测网络寿命，对算法从实现负载均衡的角度进行了优化，通过仿真实验确定了最优均衡因子。完成全部优化工作后，从节点数目、能耗、剩余能量与时间的关系等多个角度对算法进行性能评价与对比。

理论分析和仿真实验结果表明，所提出的基于 MP-NGC 算法的组网方式能实现针对机场监测对象特点的网络构建，在耗费更少节点的同时降低网络传输的总能耗，减少网络的构建成本。同时，通信路径的均衡使用和负载均衡的实现可以显著延长监测网络的有效工作周期。

关键词：无线传感器网络；机场环境监测；一体化组网；MP-NGC 算法；负载均衡

Abstract

Airport environmental monitoring is mainly based on visual monitoring and management at present, also monitoring indicators are very independent. Need a comprehensive monitoring way, and an integrated networking method. This paper based on the WSN technology background, combination of airport environmental layout restrictions. Taking the efficiency of the implementation, the number of nodes, energy consumption and load balance into account. Integrating multiple monitoring directions include the airport noise monitoring, perimeter intrusion alert and the temperature and humidity monitoring together. In order to solve the problem of node wasting and path imbalance, the MP-NGC algorithm which can realize the layout of monitoring network is proposed. Analysis how to extend life of the network from three angles, include the optimal layout of the network nodes, the reasonable distribution of the communication path and the load balance. Meanwhile, make sure the real-time and reliable data transmission can be achieved. The main contents are as follows:

1. Set up the airport layout model according to the data characteristics and requirements of the three kinds of monitoring indicators, which are the airport noise monitoring, perimeter intrusion alert and the temperature and humidity. Set the location of the monitoring node at first, and then use NGC algorithm to conduct simulation experiments of relay node placement and network layout.
2. Improve NGC algorithm aiming at the problem that the node is wasted and the path is imbalanced. Design an integrated network mode based on MP-NGC algorithm. This mode based on the nearest greedy criterion, adopt a multi path data rotation transmission method. Each time before sending data, the node choice a path which has the highest priority as the work path. The whole work process of the layout method mainly divided into three parts. Include the establishment of communication routing table, the number of paths to determine and the use of MP-NGC algorithm for node layout.
3. In order to further extend the life of the monitoring network, optimized MP-NGC algorithm by perform load balancing. The optimal equilibrium factor is determined by the simulation experiment. After completing all the optimization work, evaluate and compare the performance of the algorithm from multiple perspectives, such as the number of nodes, energy consumption, the relationship between residual energy and time and so on.

Theoretical analysis and experimental results show that, the proposed network mode which is based on MP-NGC algorithm can realize the construction of the monitoring network. Reducing the total energy consumption while consuming less

nodes. At the same time, the balanced use of the communication path and the realization of load balancing can significantly extend the life of the monitoring network.

Keywords: airport monitoring, wireless sensor networks, integrated network, MP-NGC algorithm, load balancing

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题背景及研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状及分析	3
1.2.1 国外研究现状	3
1.2.2 国内研究现状	4
1.2.3 国内外文献综述的简析	4
1.3 主要研究内容	5
第 2 章 监测网络组网算法相关研究	7
2.1 WSN 理论知识	7
2.1.1 WSN 系统结构	7
2.1.2 WSN 的特点及应用	7
2.1.3 监测节点功能结构	9
2.1.4 通信能耗模型	9
2.2 机场监测组网的常用算法	11
2.2.1 DD 算法	11
2.2.2 PEGASIS 算法	12
2.2.3 遗传算法	13
2.2.4 greedy 算法	13
2.3 本章小结	14
第 3 章 一体化组网布局	15
3.1 监测网络布局的初步构建	15
3.1.1 监测数据特点分析	15
3.1.2 机场布局建模	16
3.1.3 输入参数的选取	16
3.2 基于 NGC 算法的组网	18
3.2.1 节点布局的限制条件	18
3.2.2 监测区域网格划分	21
3.2.3 NGC 算法的设计	23
3.2.4 NGC 算法实验仿真	24

3.2.5 算法的改进	28
3.3 基于 MP-NGC 算法的一体化组网	29
3.3.1 通信路由表的建立	30
3.3.2 路径数目的确定	31
3.3.3 基于 MP-NGC 算法的节点布局	31
3.3.4 MP-NGC 算法实验仿真	33
3.4 本章小结	34
第 4 章 算法优化与性能评价	35
4.1 算法的负载均衡优化	35
4.1.1 基于通信容量的负载均衡	35
4.1.2 方法描述与仿真实验	35
4.2 改进后算法的评价分析	37
4.2.1 节点数目成本	37
4.2.2 通信能耗的对比	38
4.2.3 网络总能耗评价指标	39
4.2.4 剩余能量的对比	40
4.2.5 能耗均衡率	41
4.3 本章小结	42
结 论	43
参考文献	45
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	50
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明及使用授权说明	51
致 谢	52

第 1 章 绪 论

1.1 课题背景及研究目的和意义

无线传感器网络（Wireless Sensor Network，WSN）是由部署在监测区域内大量传感器节点相互通信形成的多跳自组织网络系统。它的研究和应用涉及到了传感器感知监测技术、嵌入式技术和无线通信技术等多个研究领域。随着无线通信、传感器技术、嵌入式应用和微电子技术的日趋成熟，WSN 可以在任何时间、任何地点、任何环境条件下获取所需信息^[1]。哈工大的李建中教授^[2]对 WSN 的概念进行了精确定义^[3]：在无线传感器网络中，节点相互协作来实时感知、收集和處理网络内的各种信息以达到实时监测的目的。WSN 的部署敏捷、隐蔽性强和容错性高等优势决定了它很适合运用在军事方面的敌方目标定位、医疗方面的生命特征数据采集以及环境保护方面的森林防火系统等众多应用领域^[4]。

“十二五”期间我国民航发展迅速，我国机场面临大量的改建扩建和迁建工作。据中国民航总局统计，目前我国投入运营工作的民用机场共计 202 个，计划在未来五年内运营机场总数将会超过 220 个。图 1-1 反映了我国民用航空通航机场数量的变化趋势，从图中可以看出，从 2011 年到 2015 年的五年间投入运营工作的机场数目在逐年增加，而且在未来的四年会有一个更大的增长幅度。除了在运营机场数目不断增长以外，2011 年至 2015 年的五年间机场旅客以及货物邮品的运输量每年也会有 10% 以上的增长量。

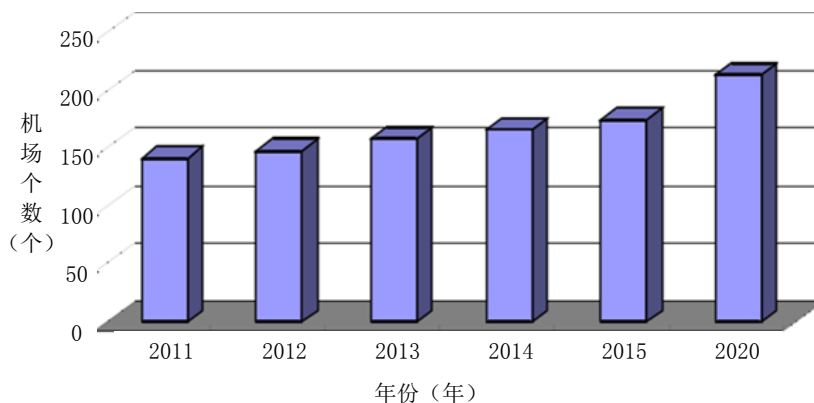


图 1-1 民用机场投入运营的数目

随着我国改革开放的不断深入和世界经济一体化的进一步加深，民航运输在国家综合交通运输体系所占比重不断提升，有利于推动我国经济的发展和社会的繁荣。从上文数据可知，民航运输量年均增长速度在 10% 以上，但 2011 年到 2015 年的五年间民航航线总飞行距离每年的增长量仅为 2.6%^[5]。因此，未来几年民航

机场势必要迎来一个新的改建扩建和迁建高峰,这也是改革机场环境监测方式一个很好的契机。面对庞大的机场安全监控工作,建立有效的管理机制,优化安全防范体系,成为现阶段机场建设需要面对的重要问题之一。

图 1-2 反映了近五年国内十大枢纽型大型机场的日均起降飞机个数的变化,从图中可以看出,各大机场的日均飞机起降数量都在不断增长,其中北京、成都和西安等城市的机场涨幅最大。

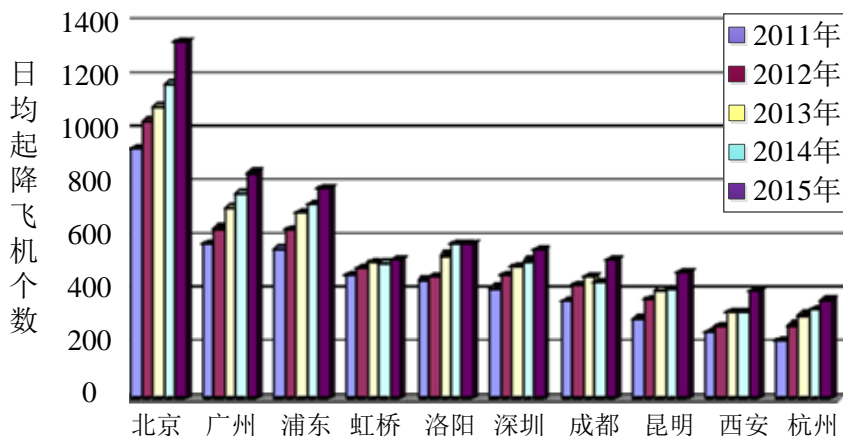


图 1-2 十大机场飞机日均起降数量统计

我国民航事业的迅猛发展和民航航空运输量的不断增长,随之而来的安全监测问题以及环境污染问题也日见端倪。资料显示,自 2006 至 2016 年,我国民航机场共发生了 164 起机场安全问题导致的事件。其中比较典型的是大连机场在 2008 年发生的一起飞机相撞事件,起因是一架飞机误入正在进行滑行起飞的跑道造成两架飞机在地面发生冲突。今年国家审计总局对数十个省的三十一个机场的周边环境情况进行了调查,调查结果显示^[6],共计二十个机场周边噪声分贝数不达标,有噪声环境污染的问题。由此可见,想要保证我国民航航空事业的安全、绿色可持续发展,必须要从源头监测做起,防患于未然。对国内大多数机场来说,机场现场运行指挥依靠简单地人工排查安全隐患、定期查看温湿度等监测指标。对于飞机流动量大的枢纽型机场,这种以目视监测和指挥为主的管理手段效率低下且存在安全漏洞,可能会导致机场安全事故的发生。并且无法实时收集监测机场的噪声、温湿度等重要参考信息。

目前,北京、上海的大型机场主要靠安装监视雷达(Monitoring Radar)、多点定位等系统来实现机场环境监测。这些系统价格昂贵,均高达数千万元,而且对于正在使用的机场,需要对现有设备进行改造,二次安装困难,其应用受到了极大限制。这两种监测系统都有一定的缺陷,例如监视雷达能否正常运行和建筑物阻挡、外界信号干扰、气候影响等因素密切相关^[7]。中小型机场主要通过管制

人员控制助航灯光的方式来指挥管理现场秩序,这种方式因为受人为因素影响过大而难以保证机场安全监测。无线传感器网络作为一种新兴的信息采集处理技术,非常适用于机场环境监测,以分布式网络的形式从待监测区域中获取到所需信息,具有功耗低、成本低、网络自组织、分布式数据管理和网内信息融合等一系列特点广泛的应用于军事情报收集、危险或空旷环境监测等诸多和机场环境特点近似的领域^[8-9]。同时无线传感器网络中的监测节点成本较低,布设难度低,探测精度高,并可通过网内信息融合去除通信中的冗余和降低通信量。

本文利用前期关于无线传感器网络中继节点布局系统的研究^[10],结合机场环境监测的实际背景,进行全方位、低能耗的安全监测网络的布局。在机场环境监测背景下通过无线传感器网络技术来构建一个监测网络,由此产生了实现智能化“无人值守和巡检”的想法。根据民用机场运行安全管理规定^[11]显示,机场环境监测主要关注的安全监测项目有飞行区管理(包括跑道应力、摩擦系数测试)、目视助航设施管理、围界入侵警报、机场噪声监测及机坪车辆定位等多个方面。基于无线传感器网络技术相关算法,研究出一种适合国内机场的、高效低成本的环境监测网络布局,使监测网络在任何复杂条件和异常环境下,都能实现所需监测指标实时、准确的数据上报,这对于机场的环保保证、有序维护和安全监测都具有重要的意义。

1.2 国内外研究现状及分析

由于无线传感器网络具有不可替代的应用优势,许多国家已经投入大量资金对传感器网络进行应用推广研究,美国、英国和日本等一些技术发达国家陆续开展了对无线传感器网络及其应用的研究工作。国内研究工作的起步略晚于国外,目前国内关于无线传感器网络及其应用的研究工作主要在高等院校与研究机构展开,一些高科技公司的研究机构也尝试应用无线传感器网络技术来丰富产品的功能结构。关于机场环境监测在国内外的研究现状在下文中详细展开。

1.2.1 国外研究现状

目前国外机场环境监测的整体研究趋势是环境监测方法逐步和高科技进行结合,许多研究者致力于机场环境监测以取得一定成果^[12-17]。超声波环境监测、激光环境监测和无线传感器环境监测等也正在投往机场环境监测工作中。各国对无线传感器网络的研究工作开始于在 20 世纪 90 年代末期,无线传感器网络的应用起先于军事^[18-19]。

在美国,机场环境的监测主要集中在减少围界入侵安全事件等方面,由 FAA 组织制定的 RIRP 计划(Runway Incursion Reduction Program),其中的重要组成部分是空域安全监测系统。该系统由飞行调度指挥系统、围界入侵警报以及显示终端等部分组成,可以提供给相关工作人员以及监控中心等实时可靠的机场状态

情况^[20]。空域安全监测系统的针对国内机场环境监测的缺陷主要在于其设备安装和运行的成本很高,且需要对现有的机场设备设施进行大量的改造工作^[21],这对国内大多数机场来说是一个很主要的限制因素。因此目前来看实现该系统的大范围推广和应用是不现实的。相比之下,WSN组网所需的节点硬件设备不需要改造航空器机舱,且耗费资金较低,具有不可替代的优势。Wang等^[22]在监测网络中设置移动的中继节点以频繁更换中继节点为代价来延长网络寿命。Vasyl^[23-24]等利用三维空间寻优准则对机场围界入侵开发了监测系统。Rolf^[25]提出了利用助航灯光控制来进行机场跑道入侵监测与警报的方法。在机场监测与警报方面,利用助航灯光发出警报信号是一种常见的检测方式,Granado等^[26]研究了助航灯光系统在机场场面监测上的应用。Vaibhav等^[27]对入侵监测采用了多传感器感知方式,重点研究了对多种传感器信息进行数据融合的技术。在WSN节点组网算法研究方面,Misra等^[28-29]提出了时间 t 逼近算法来达到减少监测网络中节点数目成本的目的。Pan^[30]提出了有利于实现提高网络的稳定性,延长网络的工作周期的异构式无线传感器网络结构的概念。Zhang等^[31]提出了使用分布式多路径数据传输方式来提高监测网络容错性的思想。Roh等^[32]在研究工作中使用了移动的中继节点,以增大算法复杂度、延长算法执行时间为代价,提高了监测网络的实时性和可扩展性。

1.2.2 国内研究现状

国内一些高校和研究机构对在无线传感器网络技术背景下进行机场监测这方面也有一定的研究,王丙元等人^[33]借助机场助航灯设施的现有分布条件,提出了基于分簇网络的链式路由协议,并利用定时唤醒的方法来解决降低能耗的问题。郭小琴^[34]利用 ZigBee 技术结合 GIS 技术,实现了机场环境中指挥车、物流车等特种车辆的实时定位、运行状态查看以及终端显示。对于机场监测网络组网可以考虑用到的算法,薛明等^[35]提出了基于最大寿命聚合树的无线传感器网络路由算法,并考虑节约能耗进行算法建模。崔素辉等^[36]设计了基于时间逼近算法的多路径不相交容错性的网络布局方式,有对后续的 MP-NGC 算法的研究和设计工作具有一定的启发作用。张艳维^[37]主要研究了在监测网络中的节点地理位置受限制的环境下,如何利用最少的节点数目成本实现无线传感器网络的正常运行。陆克中等^[38]最先提出了将贪婪算法应用于无线传感器网络节点布局当中的思想,这种算法执行简单高效,便于改进和应用,目前在水下三维布局等方向也有一定的应用研究工作。对于 WSN 的其他监测应用,陈瑜等人^[39]使用路径损耗模型和衰落分布模型确定农田中监测节点的数目和位置,为机场环境的应用提供了参考。

1.2.3 国内外文献综述的简析

目前对于面向机场环境监测的无线传感器网络构建的研究处于初步阶段。对

于组网算法的研究,多数文献单对网络覆盖率、节点数目成本和降低能耗等某一特定方向进行对提高网络性能的研究,没有综合均衡考虑各方面的影响因素。而且对监测数据传输过程中的最大跳数、通信路径的选定依据和节点通信的最优容量等实际限定条件考虑的较少。而对于无线传感器网络在机场环境监测上的应用中,在一些监测节点的监测过程中,机场中的有些位置不能放置中继节点,为解决上述问题,需要研究具有限制条件的机场环境监测网络布局算法。对于机场环境监测这一应用领域,缺少一种各个指标综合监测的多方位、一体化的组网方式。目前面向机场环境监测的 WSN 组网算法研究方面存在的问题:

- (1) 国外现有的监测系统其设备安装和运行的成本很高,并且需要对现有的机场设备设施进行大量的改造工作,因此要在国内的中小型机场中广泛应用并不现实。
- (2) 在将无线传感器网络应用于机场环境监测的文献中,都是面向都一种特定方面的监测,例如围界入侵、助航灯控制、噪声监测等。缺少一种各个指标综合监测的多方位、一体化的组网方式。
- (3) 多数的组网算法都寻求用最少数节点实现最理想覆盖率的方式,或者仅仅追求功耗最小,而忽略中继节点的数目的影响。在减少网络能耗这一方向,大多文献从机场环境监测数据传输过程中实行定时唤醒等方式,很少从中继节点布设的角度来实现网络寿命的延长。

1.3 主要研究内容

面向机场环境监测网络的构建,考虑到机场环境监测的特殊性,为了实现各项安全指标全方位、一体化的实时监测,首先进行了关于无线传感器网络的组网布局方法的研究,再根据机场环境监测组网的特点,本文的文章结构安排如下:

第 1 章的主要内容是介绍课题的来源、国内外的研究现状。调研了无线传感器网络和民航的发展现状,分析了目前常见的机场监测手段和组网布局算法并进行简析。最后列出了各章节的内容安排和整个课题的逻辑结构图。

第 2 章阐述了无线传感器网络的系统结构、特点及应用;介绍了监测节点的功能结构和通信能耗的模型组成。接着又结合机场环境下监测网络的特点,列举了几种在机场环境监测场合使用的无线传感器网络的组网布局算法并进行了简单的分析和对比。

第 3 章对一体化组网布局的整个布设进行设计和仿真实验。首先进行监测网络布局的初步构建,包括机场监测节点的布设和相关参数的选取;其次基于 NGC 算法进行监测网络的组网;然后对该算法进行针对机场环境特点的改进,提出 MP-NGC 算法,并进行监测网络布局的仿真实验。

第 4 章主要对算法进行进一步优化和性能评价。为保证监测网络组网算法的普适性,本章对不同机场规模的监测环境进行了大量的仿真实验。为评价改进后

的 MP-NGC 算法的优势性，又对这些仿真实验结果从总能耗和通信能耗、剩余能量、节点数目等多个角度进行评价分析。

课题研究的逻辑结构如图 1-3 所示。按照工作推进的过程，主要分为了理论分析、算法设计和实验验证这三个部分。

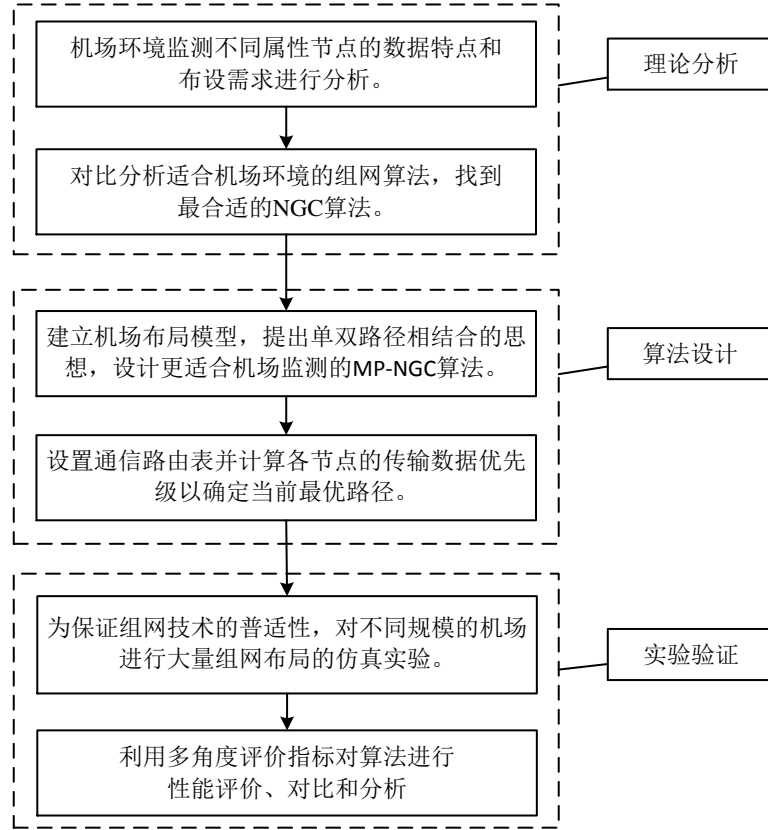


图 1-3 课题逻辑结构图

第 2 章 监测网络组网算法相关研究

2.1 WSN 理论知识

无线传感器网络（Wireless Sensor Networks，简称：WSN）利用无线通信方式，将用于采集监测对象信息的传感器节点连接起来构建网络，来达到“随时（Anytime）”、“随地（Anywhere）”、“任何人（Anyone）”、“任何事情（Anything）”都可以获取信息的目的。将无线传感器网络的组网技术运用于不同场景的环境监测，形成监测网络，是无线传感器网络应用的一个重要方向。

2.1.1 WSN 系统结构

无线传感器网络是由一些采集并处理监测数据的监测节点组成的^[40]，此网络根据具体需求进行对监测区域相关信息的采集和传递。由于监测节点体积小、隐蔽性强，因此在监测区域面积大、监测环境复杂的条件下更加适用。监测节点间首先寻求最优中继节点作为下一跳，在各个监测节点建立好通信路径之后也就完成了无线传感器监测网络的构建。如图 2-1 所示是监测网络的系统结构。

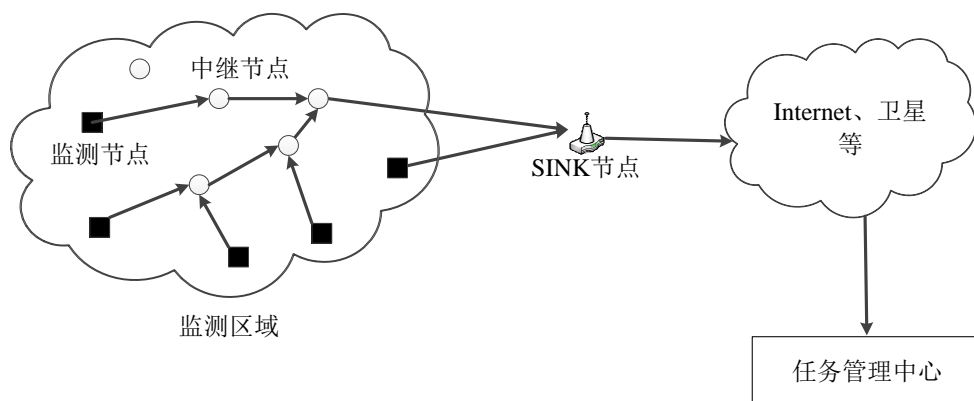


图 2-1 无线传感器网络系统结构

监测网络由监测节点（Monitoring Node）、中继节点（Relay Node）、汇聚节点（SINK Node）三类节点组成。首先由监测节点进行信息感知和数据采集，再由中继节点通过多跳传输将数据发送给 SINK（网关）节点，再通过互联网、卫星等通信手段传至管理中心^[41]。

2.1.2 WSN 的特点及应用

由 2.1.1 中对无线传感器网络系统结构的介绍可以看出无线传感器网络集合了监测、数据传输、无线通信和控制等众多功能于一体，它也具备区别于传统网络的特点和优势：

(1) 携带能量有限

由于监测网络中的监测节点体积小,是由微型电视来提供能量。由于机场监测环境区域较大且操作费时费力,所以利用频繁更换监测节点来维持监测网络的工作寿命是不合理的^[42],因此通过设计合理算法来节约工作能耗、延长网络寿命是监测网络设计关键所在。

(2) 多跳数传机制

为了实现对监测区域的高密度感知、增强监测网络的适应能力,无线传感器网络系统稳定性的提高不依赖于单个节点设备,而是通过大量的监测节点协同作业。由于监测节点通信半径取决于节点的硬件条件,因此每一个监测节点的监测范围是有一定范围的^[43]。因此在某个节点与其通信半径范围以外的其他节点进行数据传输时,需要中继节点以多跳转发的方式实现数据传输。

(3) 路径状态动态变化

为了节约网络能耗,在实际应用中经常将监测节点的工作状态在睡眠与唤醒两种状态之间进行切换。这时监测节点很容易受到环境的干扰,或者某个监测节点能量耗尽而影响到整个网络的正常运行。但是实际监测网络中监测节点数量多、网络结构呈现分布式,使得整个监测网络的可靠性和鲁棒性较好。

(4) 与应用背景相关

针对不同应用背景和应用诉求,所设计的无线传感器网络会有很大差别。这也体现无线传感器网络的普适性及其广阔的应用前景^[44],下面来详细介绍无线传感器网络的主要应用方向及其对在机场环境背景下进行应用的启发。

目前无线传感器网络这一技术的主要应用体现在军事领域^[45]、安全监控^[46]、环保监测^[47]、精细农业^[48]、医疗监护^[49]、智能交通^[50]、工业监控^[51]、物流管理^[52]、智能家居^[53-54]等等众多领域。无线传感器网络的应用最早起源于上个世纪六七十年代,近期美国国防部的“远景计划”研究局投入了大量资金以供高校研究机构进行“Smart Dust”(智能微尘)计划的研究。Smart Dust可以放置在子弹或炮弹当中^[55],在监测区域大量散布以实现布设后的自组网,此网络可以实现定位、收集监测信息和向远程基站传输信息等功能。在监测区域构建一个严密的监视网络,可以实时跟踪监测敌方相关军事行动。无线传感器网络同样在环境、安全监测和及其衍生领域内应用广泛,其中精细农业就是代表之一。浙江农科院研发的远程农作管理决策服务平台可以实现对温室大棚的温湿度、光照等环境信息的实时远程监测。在安全监控的应用方面,中科院计算研究所针对故宫博物院研发出的安全监控系统是国内安防领域的应用典型。

从几个应用实例可以看出,考虑监测工作的实时性兼顾可操作性,无线传感器网络尤其适用于区域开阔且集中的专门工作场合。监测对象包括噪声、温湿度等不同属性,因此无线传感器网络同样与机场环境监测这一应用背景十分契合。

2.1.3 监测节点功能结构

在监测网络中具有感知采集信息功能的传感器节点通常被叫做监测节点，监测节点按照预设所需位置布置在监测环境中，每个监测节点都可以将采集到的监测数据所构建的网络传输至 SINK 节点。

监测节点作为监测网络的核心，可以不仅具有数据采集的功能，还有管理和数据转发的功能。作为数据采集节点时，监测节点将传感器模块采集的模拟信号转变成数字信号，并沿着一定的路径将数据传输给中继节点；在监测节点发挥管理功能时，可以将上一跳节点转发过来的信息与自身信息数据融合，除去冗余数据得到新的数据帧，然后将新得到的数据帧发送给 SINK 节点或基站；有时监测节点还可以充当“数据采集源”和“中继”的双重角色，这时监测节点除了需要完成信息采集任务以外，还要完成信息转发的任务。但是在机场环境监测中，考虑到均衡总体的能耗，设定监测节点只具有感知和采集信息的功能，而并不兼备“中继”角色。为了了解底层网络的大概工作过程，下面对监测节点的功能结构进行介绍和分析，监测节点的功能结构组成如图 2-2 所示。

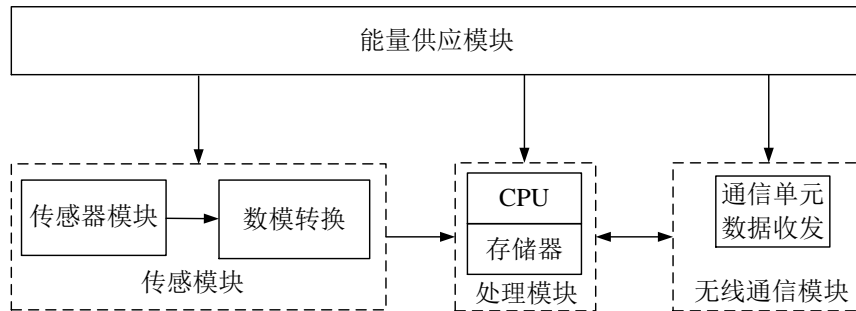


图 2-2 监测节点功能结构

图中，传感模块主要负责采集监测区域内的某些待监测的物理信息（如压力、温度、噪声等），并将模拟信号通过数模转换转变成数字信号，传给处理模块；数据处理模块作为整个监测节点的控制中心，可以用来管理监测节点的定期唤醒，或者进行数据融合；无线通信模块可以实现监测节点之间的通信，主要负责收发监测数据。能量供应模块为各个模块提供维护正常工作的能量，其能量由微型电池来供给。

2.1.4 通信能耗模型

监测网络的整体能量有限，所以通信路径的能耗模型关系到算法优劣的评价。在对改进后的算法进行指标评价的过程中，所用到的通信路径能耗模型如图 2-2 所示。由 2.1.3 节可以看出，从能耗角度分析，节点的能耗的主要来源是信息采集能耗、信息处理模块能耗和节点间无线通信的能耗。其中，数据采集能耗由监测节点的属性决定，信息处理部分的能耗又可以分成 CPU 能耗与存储器能耗两

大部分。无线通信能耗分成功率放大器能耗和发射接收工作所需能耗这两大部分。由于功率放大器布设在发射装置的末端，其能耗在通信能耗中所占的比例比较大，是发射装置的主要能耗来源。功率放大器的主要功能是把调制好的射频信号放大目标功率值，再通过天线发射该信号给接收电路。

比较上述三种能耗，监测节点在收发信息时（即无线通信模块）消耗的能量最多。感知收集信息部分的能耗随着不同的监测节点属性差别较大，而由于信息处理的部分功耗远远小于数据收发工作的能耗。例如在 100m*100m 的监测区域内发送 100bite 的监测数据所需要的能量大致和对三十万条指令进行处理的能耗相当，因此在考虑监测节点能耗时主要关注收发信息时（即无线通信模块）消耗的能量。

首先构建一个通信能耗模型，主要包括发射电路、功率放大器和接收电路这三个部分，如图 2-3 所示。

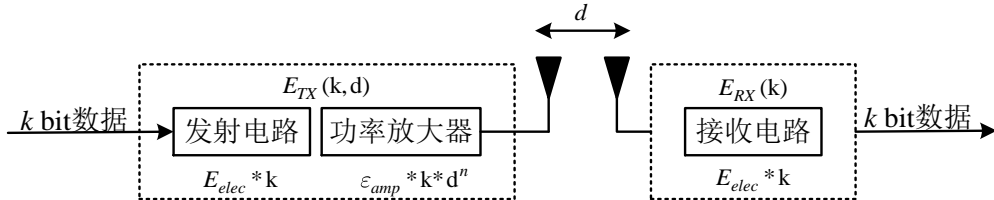


图 2-3 通信能耗模型

根据所建立的通信能耗模型，将 k bits 的监测数据发送至 d m 的距离所需要的能耗如公式(2-1)和(2-2)所示。

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX-E}(k) + E_{TX-W}(k, d) \quad (2-1)$$

$$E_{TX}(k, d) = E_{elec} * k + \varepsilon_{amp} * k * d^n \quad (2-2)$$

接收电路的能耗计算公式如公式(2-3)和(2-4)所示。

$$E_{RX}(k) = E_{RX-E}(k) \quad (2-3)$$

$$E_{RX}(k) = E_{elec} * k \quad (2-4)$$

上述四个公式中的发送、接收电路传输每位数据所消耗的功率以及功率放大器的功率常数的标准参数值如表 2-1 所示。

表 2-1 能耗模型的标准参数值

参数	数值
发送电流 E_{TX-E}	50nJ/bits
接收电流 E_{RX-E}	50nJ/bits
E_{elec}	50nJ/bits
ε_{amp}	10(pJ/bits)/m ²

2.2 机场监测组网的常用算法

机场环境相对开阔，监测区域面积较大，在监测节点布设完成以后，需要确定最优的中继节点位置和数据传输路径，以实现监测网络的组网。构建传输路径并进行组网的算法有很多，根据不同的节点监测属性和布设位置等特性，将适合应用于机场环境监测的算法总结为以下四种。

2.2.1 DD 算法

定向扩散（DD， Directed diffusion）算法是 SINK 节点主动发送查询指令式的算法，按步骤可以分为兴趣信息的扩散、梯度的建立、路径的加强和信息传输这四部分。与传统组网算法不同，DD 算法的只要特点是该算法以数据为中心，由 SINK 节点通过泛洪传播的方法周期发送兴趣查询数据包，以此将它所需的信息类型通知给监测网络中所有监测节点。与此同时，监测节点经由中继节点直至 SINK 节点构建起来了通信路径，与兴趣查询信息相匹配的信息通过加强后的通信路径进行传输。具体工作步骤如图 2-4 所示。

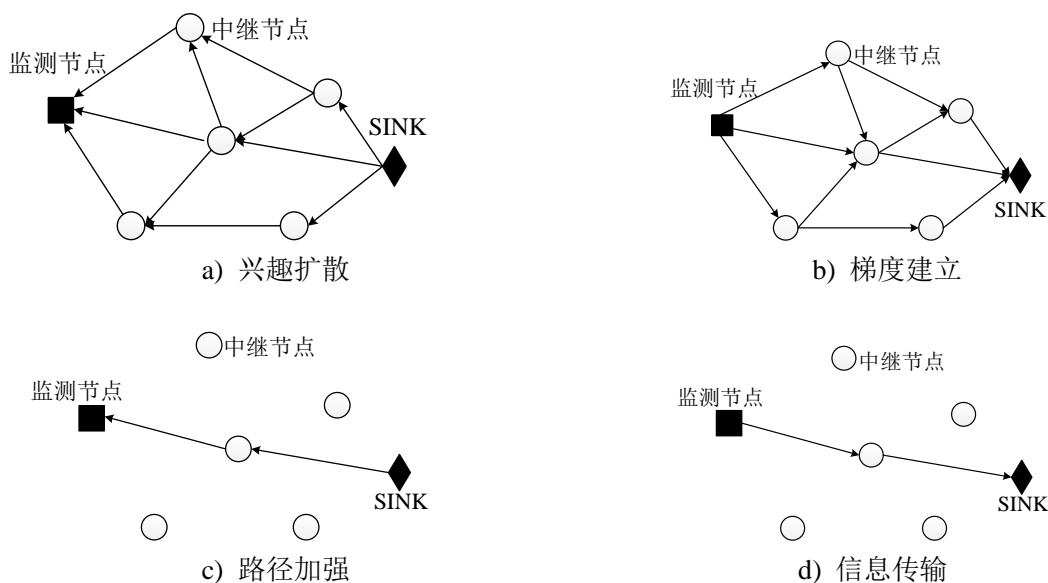


图 2-4 DD 算法的工作过程

- (1) SINK 节点按一定的时间周期，主动发送兴趣信息作为查询命令，将它所需的信息类型通知给监测网络中所有监测节点，兴趣信息在监测网络中进行洪泛。兴趣查询信息包括了监测范围、监测节点属性、比特率等参数。
- (2) 在进行兴趣查询信息洪泛的同时，由监测节点发起，在监测节点上构建一个从信息采集源到 SINK 节点的反向梯度场，若某个监测节点感知收集到与兴趣查询信息对应的信息，则向需要该信息的相邻节点发送信息。收到信息的相邻节点按多跳转发的方式向上传输信息，这样沿不同路径传输的信息传至 SINK 节点。

(3) 接收到这一数据信息之后，由 **SINK** 节点发起，考虑多方面影响因素选出一条最优路径来做最终传输数据的强化路径，所以说 **DD** 算法是一种单路径数据传输的组网算法。

(4) 在单条强化通信路径确定完成之后，感知收集到的监测信息将沿着该条路径进行转发，不再转发给其他相邻节点。

DD 算法简单明了，易于实现，构建的是平面拓扑结构。适用于不需考虑节点高度、布设在平面范围内的监测场合，该算法在机场驱鸟系统上有一定的应用。但是由于该算法在监测网络中盲目向所有的邻居节点发布指令，产生大量重叠冗余的信息，很可能会造成浪费信道资源和邻居节点能量的现象，甚至在网络工作一段时间之后会产生数据内爆和网络瘫痪的情况。

2.2.2 PEGASIS 算法

PEGASIS (Power-Efficient Gathering In Sensor Information System) 算法的主要思想是基于 **greedy** 算法将所有监测节点组成一条链，一条链当中不在两边的所有每个监测节点都可以找到一对距离该监测节点最近的相邻节点。这种算法中的监测节点既具有采集监测信息的功能，也具有转发信息的中继功能。监测节点从一边的相邻节点接收到监测信息之后，向另一侧的相邻节点发送该信息。信息从一个监测节点被传到另一个监测节点，并完成数据融合、去除冗余信息等处理手段，最终将信息传输至这条链中的头节点，再将信息转发给 **SINK** 节点。具体工作步骤如图 2-5 所示。

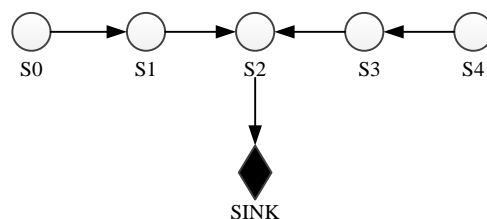


图 2-5 PEGASIS 算法的工作过程

(1) 首先各个监测节点利用射频信号强度 **RSSI** 值来度量自己和所有相邻节点之间的距离，在确定了与相邻节点 S_i 的距离以后，监测节点会调整信号强度 **RSSI** 使得监测网络的节点都在接收范围内。

(2) 在某次组网中，监测节点 **S2** 被选为头节点，并将令牌信号（即头节点标志 **Flag**）广播，收到标志信号的监测节点 **S0** 将监测信息传给监测节点 **S1**。

(3) 监测节点 **S1** 融合 **S0** 与自己产生的信息后传给头节点 **S2**，监测节点 **S4** 也将信息传给 **S3**，监测节点 **S3** 融合监测节点 **S4** 和自身节点信息，然后将融合处理后的数据传给 **S2**。

(4) 节点 **S2** 接收到两个相邻节点发送的监测信息之后，将自己的信息与其合并

与剔除冗余信息，最终转发至 SINK 节点，至此完成了一次网络构建和信息的上报。监测节点与 SINK 节点是通过轮换的方式进行通信，当全部监测节点与 SINK 节点完成了通信后，会进入新一轮的轮换通信。

PEGASIS 算法这种轮换机制可以从一定程度上实现能耗均衡，而且监测网络中各个节点传输信息都寻求的最短距离，可以节约通信收发信息的能耗。但是 PEGASIS 算法所构建的监测网络中的所有节点呈一条链，在机场环境监测中，就节点布置位置而言只适合小范围的助航灯监测。由于其拓扑结构使得该算法在机场监测当中的应用有较大的局限性。

2.2.3 遗传算法

遗传算法（Genetic Algorithm）是一种具有自适应性、全局性的概率搜集检索算法。在监测网络构建的过程中，监测节点作为第一个基因，SINK 节点作为最后一个基因，同一个监测节点不会重复转发监测信息，所以每个监测节点最多只能在路径中完成一次转发任务。

从监测节点到 SINK 节点有多个通信路径，其中存在一条能实现最佳效果的路径。遗传算法的原理就是依据遗传理论中在种群延续不断更新最优个体来寻求最优路径的。具体工作步骤如下：

- (1) 编码，用监测节点的数字代号代表染色体的基因，用节点传输信息时所经由的数字代号来表示监测节点到 SINK 节点的路径，即构成了一条染色体。
- (2) 确定适应度的表达方式及其转变规则，由于染色体映射到解空间的值所对应的差值较大，需要经过转变来提高整体对评估个体优劣的适应能力。
- (3) 设计遗传算子，即设计交叉变异算子。在每一代，根据监测网络中不同监测节点的适应性度量的大小来选定个体，完成交叉变异并产生代表新的最优解的集合种群。

在具体应用过程中，种群逐渐收敛直至实现全局最优解，而这种算法更适合应用于提高监测网络覆盖率这一问题上，因此遗传算法通常被用在追求网络覆盖率的监测节点的组网当中。但是遗传算法复杂度高，且在计算最优路径的时候需要多次迭代才能完成收敛，具有较大的计算量。

2.2.4 greedy 算法

贪婪算法（Greedy Algorithm）的最优布局是以最近贪婪准则为启发式条件，通过通信范围内的中继节点，将数据转发给 SINK 节点。在贪婪准则中，SINK 节点的转送数据区域被分为可行域和不可行域两个部分。因此，在不可行区域内的中继节点被标记为不可行节点在可行区域的节点称为可行节点，可行节点集合的表达式如(2-5)所示。

$$RN_range_feasible = \{r_i, K, r_j\} \quad (2-5)$$

在工作过程中输入监测区域、监测节点集合： $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 、候选中继节点： $\mathcal{R} = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 、SINK 节点 s_0 、网格间距 L 和通信半径 R 等参数。将会得到中继节点的数目和位置。贪婪算法的工作过程如图 2-6 所示。

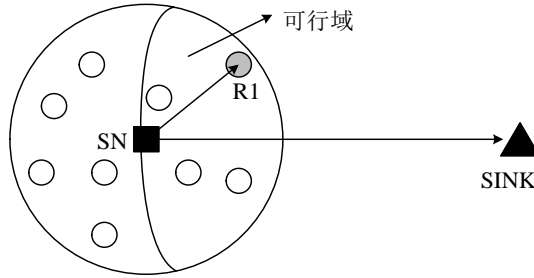


图 2-6 贪婪算法工作过程

根据以上对贪婪算法工作过程的描述，结合机场环境监测的特点，发现有以下几个问题：

- (1) 中继节点的流量过重：前面提到整体网络的构建是通过各个监测节点寻找下一跳直至 SINK 节点而产生的。这种信息传输机制有一个不可避免的弊端，那就是自身所需步数少的节点，虽然距离 SINK 节点很近，但是它要承载很多下级中继节点传来的信息，这些节点的工作寿命会比下几级的中继节点短很多，这种整体网络的短板效应会影响整个网络的有效工作周期。可以通过限制不同位置的通信容量来减轻这种问题对网络有效工作周期的影响。
- (2) 这种算法没有传输方向的限制：监测节点或中继节点只是尽量将信息发送到离 SINK 节点较近的中继节点。所以某个节点传输数据的可行范围是以该节点为圆心，通信距离为半径的圆形，在该圆形范围内存在与 SINK 节点方向反向的一片扇形区域，如果选择了这个区域则会导致多余能耗的产生。

2.3 本章小结

本章结合机场监测环境所用到的基础知识，介绍了无线传感器网络的系统结构体系、特点与优势，分析了目前的主要应用方向以及对在机场环境监测这一应用方向上的启示。接着介绍了几种应用于不同机场监测对象网络构建当中的算法，阐述了这几个算法主要适用的监测对象及其优劣势，为进一步研究机场环境监测网络布局算法做好准备工作。由于所要构建的监测网络中包含几种不同属性的节点，因此通过分析可以看出每种算法都有不同侧重点的优势。在设计算法时，应该充分考虑不同的节点属性的特点，选定和改进综合优势最强的算法。

第3章 一体化组网布局

面向机场环境监测的无线传感器网络的构建,考虑到机场环境监测的特殊性,为了实现各项安全指标多方位、一体化的实时监测,首先进行了关于监测网络中继节点布局方法的研究。与传统算法不同,所提出的方案没有一味寻求以最少节点实现最理想覆盖率或者仅追求功耗最小而忽略中继节点的数目对投入经费的影响,从各方面均衡化的角度来进行算法设计。

3.1 监测网络布局的初步构建

在构建监测网络初期,需要做的工作包括根据主要监测区域建立机场平面模型和对应的不同属性监测节点的位置安排,选取不同规模机场对应的各种参数,完成网络监测节点的布设,为中继节点的布设和网络布局的确定做准备。

3.1.1 监测数据特点分析

根据《民用机场运行安全管理规定》(CCAR-140),兼顾监测对象的按需程度和可操作性,本监测网络采集信息的主要对象确定有噪声监测、温湿度监测和围界入侵警报三种。为了后面的算法设计对于机场环境监测更有针对性,分析这几种监测对象的数据特征。

(1) 机场噪声:机场飞机噪声的主要来源是起飞、下降和滑行过程中产生的,对其附近的生活区域和办公区域影响较大。而机场噪声数据的来源是噪声监测节点长时间对飞行事件的噪声监测记录,所采集到的数据可以作为噪声预测软件的输入值,来预测周围居民区和办公区域的噪声范围以监测机场噪声范围是否达标。机场噪声的监测数据虽然对实时性要求没有太高,可以定时上传,但是其数据量大、对数据传输的稳定性要求较高。

(2) 围界入侵:在机场实际运行过程当中,工作人员误入、空中交通量大和鸟类干扰等都可能引起跑道侵入。围界入侵检测可以使用红外探测的方式对各个关键位置进行监测。采集到监测数据之后,在下位机进行阈值判断,将所监测的数据转换为开关量再上传,这样所需传输的数据量减少,但是围界入侵警报必须保证实时性和可靠性。

(3) 温湿度:温湿度监测主要是通过分布在监测区域内的传感器对机场跑道、滑行道以及机场整体室外空间的温湿度参数进行采集。以供监测中心工作人员在需要应对寒冷冰冻等恶劣天气的情况下做参考,保证机场跑道和滑行道在温湿度上的正常状态。由于机场环境开阔通透,各个区域温湿度差别不大,所以所需布设的节点较少,向监测中心定时上传即可。

综上所述,对于机场环境监测的三大方面,根据数据按需程度,分成主动上

报型和被动查询型两大类型。主动上报型数据有围界入侵警报的数据；被动查询型数据包括机场噪声监测、温湿度监测的数据。主动上报型数据，与机场的安全运行关系最为密切，所监测数据需要实时主动上报，数据量大，对传输实时性要求较高。被动查询型数据，在监控中心发出查询命令时才上报数据，数据量较小。

3.1.2 机场布局建模

基于机场的一般布局构建一个机场平面布局模型见图 3-1。根据不同属性的监测节点所需要布设的区域和间距密度要求来确定它们的合理位置。根据机场平面布局模型中监测节点的位置，并按比例尺计算出各监测节点的坐标。

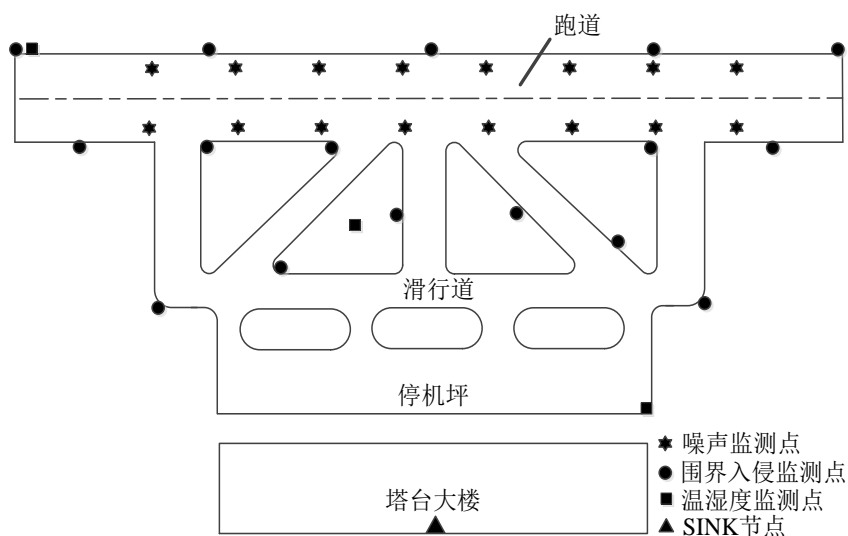


图 3-1 监测节点布局位置图

飞机的起飞和降落时机场噪声的主要来源，因此噪声监测节点沿跑道两侧成排安装，通常安装在有一定高度的金属柱上。在跑道两侧有照明灯，灯杆间距一般小于 60 米，因此可以考虑在灯杆上的合适位置安装噪声监测节点。围界入侵的监测重点区域在跑道的起飞降落区域、滑行道的转弯区域，在这些区域密集均匀布点，实现对飞机活动范围的重点监测。温湿度监测节点不需要密集布设，只在跑道区、滑行区和停机坪区选取关键位置放置。SINK 节点布设在塔台大楼。

3.1.3 输入参数的选取

对不同规模的机场选定标准参数，主要包括监测面积、通信半径、数据转发量、路径损耗指数等，详细介绍各个参数的选取依据。

根据 2008 年由中国民用航空局编制、住房和城乡建设部和国土资源部审批的《民用航空运输机场工程项目建设用地指标》^[57]，一般民航机场一般占地 200 公顷，其中航站楼面积 2-6 公顷，跑道长 3.5 公里，宽 60 米，一般为两条跑道，停机坪 30 公顷，维修 8 公顷，通信 3 公顷，总占地 200 公顷。参考北京首都国

际机场、上海浦东国际机场和广州新白云国际机场以及一些中小型机场的相关面积指标，将仿真实验中的监测区域定为 100-400 公顷，并将这一范围分为五个不同规模等级。监测节点的无线通信模块拟采用 CC2530，因此通信半径取五百米，每个传感器监测节点的通信容量为 200bits，中继节点由于只具有转发数据的功能，其通信容量应当大于监测节点的通信容量，取 600bits。路径损耗指数取 2，下面来详细介绍路径损耗指数的选取过程。

在实际监测环境中，大气层的相对磁导率和相对介电常数都等于 1，在陆地传播环境中，虽然不可能完全还原自由空间的传播条件，但是可以把空间传播模型用在接收装置和发射装置间无阻挡通讯时的场景中^[56]。下面来推导电磁波信号在自由空间条件下的衰减模型。由于发射天线的全向性，在距离发射机 d 米处，功率通量密度可以用天线发出的有效功率在圆球面上单位面积来表示，如公式(3-1)所示：

$$S(d) = \frac{P_t G_t}{(4\pi)d^2} \quad (3-1)$$

公式(3-1)中， P_t 表示发射的功率值， G_t 表示发射天线的增益值。接收天线接收功率的表达式：

$$P_r(d) = S(d) A_r \quad (3-2)$$

公式(3-2)中， A_r 代表接收天线的有效面积。

$$A_r = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (3-3)$$

在公式(3-2)中， G_r 表示接收天线的增益， λ 是波长(m)，整理以上三个公式得到：

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (3-4)$$

路径损耗的定义是有效发送时的功率与接收时的功率相减的结果。如果考虑天线增益，则自由空间的路径损耗为：

$$PL(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right) \quad (3-5)$$

如果不考虑天线增益时。路径损耗如公式(3-6)所示：

$$PL(\text{dB}) = -10 \log \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right) \quad (3-6)$$

在自由空间中可以将天线看作质点，没有几何尺寸，所以上面的模型仅适用于发射天线的远场区域，远场的条件如公式(3-7)和(3-8)所示：

$$d \gg D \quad (3-7)$$

$$d \gg \lambda \quad (3-8)$$

而对于不满足远场条件的情况，将远场区域的参考距离 d_0 作为接收功率的参考点，来计算 d 点的接收功率。当 $d > d_0$ 时，自由空间的接收功率为：

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad (3-9)$$

上式中 $P_r(d_0)$ 可以由测量的平均值得到，平均路径损耗如公式(3-10)所示，其中 n 值的范围是 2-6：

$$\overline{PL}(d) = \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (3-10)$$

转变成分贝的表达方式：

$$\overline{PL}(\text{dB}) = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3-11)$$

根据以上公式算得不同环境下的路径损耗指数如表(3-1)所示。

表 3-1 能耗模型的标准参数值

环境	路径损耗指数
自由空间	2
市区蜂窝	3-5
室内视距传播	1.6-1.8
被建筑物阻挡	4-6

机场区域开阔，阻挡物很少，因此在后面仿真实验中路径损耗指数取 2。

根据机场环境监测面积大、监测指标多样化、节点固定等特点，参照实验过程中可能出现的不良现象，通过对比提出了以上的最优参数取值。其中机场监测区域的面积根据机场规模大小不同分成了五个等级，每个等级对应的监测节点位置信息也会有所变化。在设计好机场布局模型之后，根据机场布局的特点来设计 NGC 组网布局算法。

3.2 基于 NGC 算法的组网

从 2.2 节的算法分析可以看出，greedy 算法与本课题组网布局的要求最为契合，结合前期研究，选择以最近贪婪准则（Nearest Greedy Criterion，简称 NGC）为启发式条件的 NGC 算法，结合机场环境的几种特殊因素，在最优解的选取时设定了几个限制条件，有效的避免了在选取最优解时的冗余量。

3.2.1 节点布局的限制条件

与无线传感器网络的一般应用场合相比，机场环境具有监测面积大、监测指标多样化、节点固定等特点，参照前文对 greedy 算法进行分析时发现的弊端，提出了在布局过程中几项限制条件来迅速锁定最优解。

(1) 传输方向

在贪婪寻优的过程中，符合通信条件的中继节点应该是在以监测节点为圆心，通信半径为半径的圆形范围内，监测节点只考虑距离较近的节点进行通信而不考虑方向。为了防止监测网络中出现多余的传输路径，需要保证数据是沿正对 SINK 节点方向进行传输的，所以设定了传输方向这一限制条件，寻优范围被限制后，候选中继节点的合理范围是以监测节点为圆心，有一定角度的扇形区域。因此引入了传输方向这一限制条件。

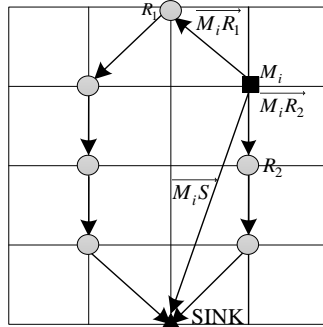


图 3-2 传输方向限制

如图 3-2 所示，设定监测节点 M_i 到 SINK 节点的方向向量 $\overrightarrow{M_i S}$ 为基准向量，监测节点 M_i 在候选位置节点选定中继节点 R_1 和 R_2 ，在 M_i 和这两个候选中继节点之间建立方向向量，分别是 $\overrightarrow{M_i R_1}$ 和 $\overrightarrow{M_i R_2}$ 这两个向量。从图中可以得到，监测节点 M_i 所找的两条路径的合理性显而易见，经由 R_2 转发的这条路径较短且需要的中继节点更少。在路径选择过程中应满足公式(3-12)。

$$\overrightarrow{M_i R_1} \cdot \overrightarrow{M_i S} > 0 \quad (3-12)$$

向量 $\overrightarrow{M_i R_2}$ 与基准向量之间的夹角是锐角，所以两个向量点乘结果大于 0，符合条件，而 $\overrightarrow{M_i R_1}$ 与基准向量之间呈钝角，点乘小于 0。按照该限制条件选择 $\overrightarrow{M_i R_2}$ 所在的路径进行数据传输，保证了监测网络中数据发送的方向一直指向 SINK 节点。

(2) 节点通信容量

在监测网络中，节点的通信容量是指节点能够转送最大数据的位数。为了防止中继节点接收过多的监测节点数据而产生数据丢失，设定了对每个中继节点通信容量的限制。节点选择下一跳节点的时候，需要查看其通信容量，在确保容量足够的情况下才能发送数据。关于监测网络组网布局对通信容量方面的限制如图 3-3 所示。

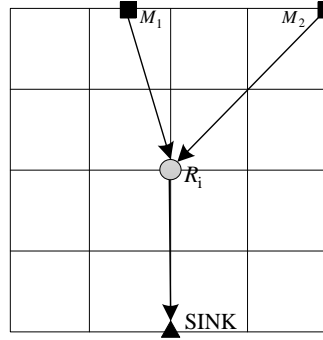


图 3-3 通信容量限制

有两个监测节点 M_1 和 M_2 ，所采集的数据量分别为，9bits 和 11bits，在这两个监测节点的可行域内有中继节点 R_i ，如果通信容量大于 20bits，超出了中继节点转发的上限能力，会出现数据中断的现象。因此设置该中继节点的通信容量为 20bits，如果通信容量超过限制，另选候选中继节点建立通讯路径。

(3) 转发跳数

监测网络中使用多跳数据传输方式经常会出现逐跳转发数据的现象，逐条转发会使得网络布设过多的中继节点，造成硬件资源的浪费。为避免这种现象提出了对转发跳数的限制。转发跳数也是在监测节点将数据转发到 SINK 节点的路径中，对所经历的中继节点数目的限制。

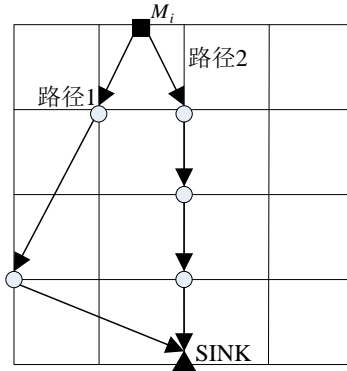


图 3-4 转发跳数限制

如图 3-4 所示，路径 2 经由多个中继节点将数据传输至 SINK 节点，使用了 3 个中继节点，如果传输距离增加则中继节点个数将更多，因此要限制转发跳数。设监测节点与 SINK 节点的最大转发跳数为 $Jump_max(d, L)$ ，其中 d 表示节点间通信距离， L 表示网格间距。最大转发跳数计算如公式(3-13)所示。

$$Jump_max(M_i, S) = \lceil \frac{d(M_i, S)}{L} \rceil \quad (3-13)$$

由此可以看出最大转发跳数与节点间通信距离成正比关系，距离越大，最大跳数也随之增大。在监测节点 M_i 选择传输路径时，比较路径 1、2 的转发跳数，选择转发跳数较小的路径进行数据传输。

3.2.2 监测区域网格划分

机场监测区域地势开阔、面积较大，为了在布设安装和后期维护的过程中便于快速确定精确位置，将监测区域划分为标准网格，每个网格的交点都具有唯一坐标，这些坐标就是组网时中继节点布设的候选位置。为了在布设初期快速锁定节点位置，在运行中实施维护问题节点，更好的实现数据可靠传输，可以将监测区域按网格划分定位。想要对机场监测区域进行网格划分，首先需要确定所划分网格的网格间距，它影响着监测网络总体的硬件成本和能量消耗的多少。网格间距过大会导致网络中相邻节点超出通讯距离，出现节点发射能耗过大甚至数据丢包或重传的问题。而网格间距过小会使得监测节点到 SINK 节点的数据经由的中继节点过多，浪费节点数目成本、影响传输速度。因此可见，在监测网络组网之前，需要根据监测节点的通信特性指标来推算最优网格间距。

采用接收信号强度指示器(RSSI, Received Signal Strength Indicator)和链路质量指示(LQI, Link Quality Indication)进行仿真对比，确定网格间距。接收信号模块通过确定测量射频信号能量的方式来计算发送信号模块与接收信号模块之间的距离。

发送功率与接收功率之间的计算公式用公式(3-14)表示。

$$P_R = \frac{P_T}{d^n} \quad (3-14)$$

式中 P_R 、 P_T ——发射和接收信号时的功率值；

d ——收发模块之间的距离；

n ——传播因子。

对公式(3-3)两边做取对数的处理，可得公式(3-15)。

$$10 * n \lg d = 10 * \lg \frac{P_T}{P_R} \quad (3-15)$$

将发送功率代入公式(3-15)中，得到公式(3-16)。

$$10 * \lg P_R = A - 10 * n \lg d \quad (3-16)$$

公式(3-16)变形得到公式(3-17)。

$$P_R(\text{dBm}) = A - 10 \lg * n \lg d \quad (3-17)$$

式中， A 的数值是数据发送 1m 距离所对应 P_R 的大小。

公式(3-17)就是 RSSI 值与 d 的关系公式。在 MATLAB 中进行仿真实验，设置 $A = -25\text{dBm}$ ，RSSI 与收发距离的关系如图 3-5 所示。

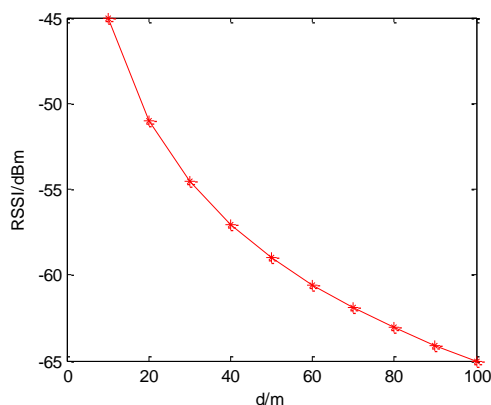


图 3-5 RSSI 值与通信距离 d 的关系仿真图

在进行理论仿真后，选取 CC2530 无线通信模块，设 d 由 0-100 等距取值，测得 RSSI 和 LQI 的数值与距离的关系如图 3-6 和 3-7 所示。

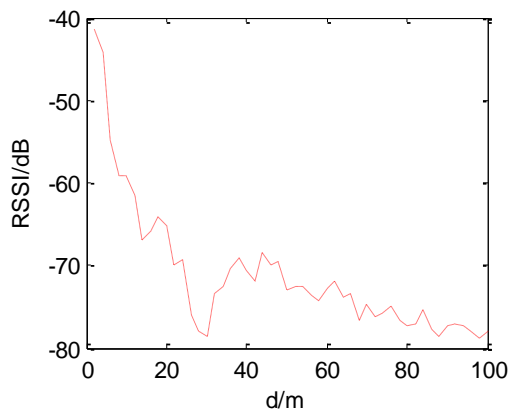


图 3-6 RSSI 值与通信距离 d 的关系实验图

从实验结果图中可以看出，在 d 的大小为 30 米时所对应 RSSI 值和 LQI 值都是最小的，而在这个最小值点多对应的地方，通信距离 d 的大小与最大收发通信距离的比例约是 1:3。

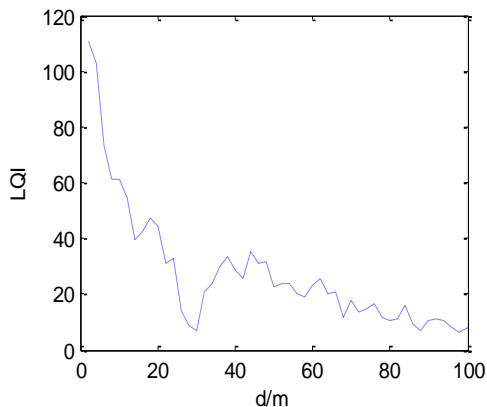


图 3-7 LQI 值与收发距离 d 的关系实验图

因此，在保证正常通信的前提下，可以得出公式(3-18)的关系公式。

$$L^2 + (3 * L)^2 \leq R^2 \quad (3-18)$$

由此推导出网格间距的合理取值范围如公式(3-19)。

$$L \leq \frac{R}{\sqrt{10}} \quad (3-19)$$

一般情况下取网格间距 L 为小于且接近 $R/\sqrt{10}$ 的整数值。比如通信半径 300m，则网格间距需要小于等于 94.9m，所以取 L 为 90m。

3.2.3 NGC 算法的设计

以最近 greedy 准则为启发式条件的 NGC(Nearest Greedy Criterion)算法在监测区域内选择距离 SINK 节点最近的中继转送数据。此算法以即时的情况为优化测度的依据做一步步寻优，不考虑整体所有可能最优解，避免了为找所有的最优解而考虑所有可能解的过程。自顶层依次向下，以迭代的方法做出寻优选择，每一次寻优选择的选取都将缩小至寻优子范围当中，通过一步步寻优的叠加，同样能找到全局最优解。

利用 NGC 算法进行监测网络节点布局的工作过程如下文所示：

输入： 监测区域、网格间距 L 、监测坐标集合： $M=\{M_1, M_2, \dots, M_i\}$ 、网格间距 L 、通信半径 R 和通信容量 CAP 等一些初始参数。

Step1. 确定网格间距 L 与步进，将机场监测区域网格化处理，从而确定所有候选中继节点的坐标。

Step2. 将 M_i 到 M_0 的欧氏距离 $d(M_i, M_0)$ 记为 $d_{i0}(1 \leq i \leq n)$ ，按降序排列得到欧氏距离集合 $d=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ ，与欧氏距离集合中的元素相对应的是监测节点集合 $M_0=\{M_{10}, M_{20}, \dots, M_{i0}\}$ 。

Step3. 从最底层的监测节点(即 M_{10})开始，在其可行域内查询候选中继节点，选择满足传输方向限制和最近机制的，且离 M_0 较近的中继节点(设为 R_j)作 M_{10} 的下一跳。

Step4. 若此时 M_{10} 的通信容量($RNCAP[R_j]+1$)< R_j 的通信容量(capacity)，则选择 R_j 作为下一跳，且更新选中的中继节点的通信容量中继节 $CAP [R_j]+1$ 。

Step5. 若 $d(R_j, M_0)>R$ ， R_j 开始循环执行第三步，继续在可行域寻找中继节点，设选中 R_{j+1} 作为下一跳，进入下一步。否则，将 M_{j0} 欧氏距离的集合当中去除。

Step6. R_{j+1} 开始执行第四、五步，更新这一步中 R_{j+1} 的通信容量，即令中继节点 $CAP [R_{j+1}]=RNCAP [R_j]$ 。

Step7. 若 $d = \Phi$ ，算法执行完成，否则从欧氏距离的集合当中选择距离最近的节点开始重新执行第一步至第六步。

输出： 所构建网络中中继节点坐标、监测网络相关能耗和算法执行时间 t 等。

算法流程图如图 3-8 所示。

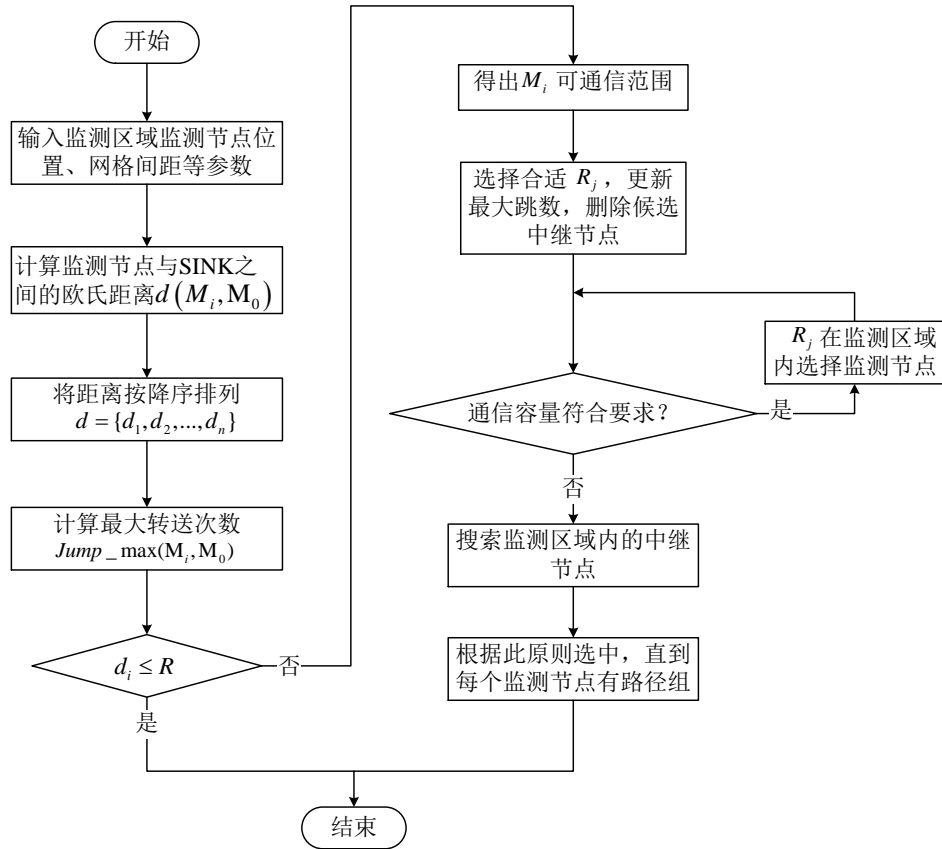


图 3-8 NGC 算法流程图

3.2.4 NGC 算法实验仿真

基于 NGC 算法进行各个属性节点的仿真布局实验，用机场多限制条件来缩小寻优范围，为机场中围界入侵监测节点、噪声监测节点和温湿度监测节点最优的将数据传输至 SINK 节点的通信路径。具体结果及分析如下所示：

(1) 围界入侵节点布局

仿真实验首先针对中型机场进行组网布局，监测区域面积大小为 200 公顷 (2000m*1000m)。表 3-2 列出了仿真实验中监测区域、节点通信容量、网络结构、通信容量和 SINK 节点坐标等参数。表 3-3 列出了根据监测需求设置的 24 个围界入侵节点的位置坐标。

表 3-2 节点布局输入参数

监测区域/m	节点通信容量	网格间距 L/m	通信半径 R/m	SINK 节点坐标
2000*1000	200	100	330	500, 0

表 3-3 围界入侵监测节点位置

节点序号	x_i, y_i	节点序号	x_i, y_i
SN ₁	0,1000	SN ₁₃	900,600
SN ₂	500,1000	SN ₁₄	1000,600
SN ₃	1000,1000	SN ₁₅	1200,600
SN ₄	1500,1000	SN ₁₆	1400,600
SN ₅	2000,1000	SN ₁₇	700,500
SN ₆	200,700	SN ₁₈	1000,500
SN ₇	400,700	SN ₁₉	300,400
SN ₈	500,700	SN ₂₀	700,400
SN ₉	700,700	SN ₂₁	1400,400
SN ₁₀	1400,700	SN ₂₂	300,300
SN ₁₁	1700,700	SN ₂₃	700,300
SN ₁₂	1800,700	SN ₂₄	1700,300

按照上述输入参数进行仿真实验，输出节点布局的指示坐标以及监测节点和中继节点的能耗分布图。节点布局见图 3-9，能耗分布见图 3-10。

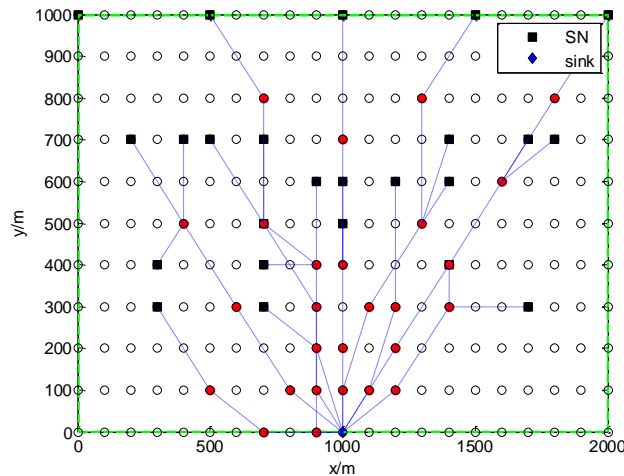


图 3-9 围界入侵监测布局图

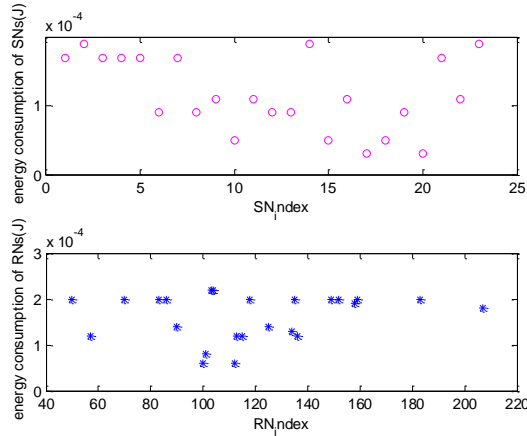


图 3-10 围界入侵监测节点能耗分布图

由图 3-9 可以看出，仿真结果完成了围界入侵监测网络构建，考虑到可实行性，布设在跑道区域的中继节点，可以安装在地面诱导灯的灯罩内。由于在仿真时通信半径留出了 10% 的冗余量，所以在参考中继节点位置范围内，按实际可布设位置，移动 30m 以内不会影响节点数据传输。由图 3-10 可以看出，监测节点由于位置及跳数不同，其节点能耗数值分布相对零散。而中继节点能耗分布比较平均，大多数分布在 $1 \times 10^{-4} \text{J}$ 到 $2 \times 10^{-4} \text{J}$ 之间。

(2) 噪声监测节点布局

输入监测区域、节点通信容量、SINK 节点坐标、网络结构、通信容量等固定参数如表 3-2 所示，监测节点坐标等参数如表 3-4 所示。

表 3-4 噪声监测节点位置

节点序号	x_i, y_i	节点序号	x_i, y_i
SN ₁	250,990	SN ₉	250,710
SN ₂	500,990	SN ₁₀	500,710
SN ₃	750,990	SN ₁₁	750,710
SN ₄	1000,990	SN ₁₂	1000,710
SN ₅	1250,990	SN ₁₃	1250,710
SN ₆	1500,990	SN ₁₄	1500,710
SN ₇	1750,990	SN ₁₅	1750,710
SN ₈	2000,990	SN ₂₆	2000,710

按照上述输入参数，进行噪声监测组网布局的仿真实验，输出节点布局的坐标以及能耗分布。节点布局见图 3-11，能耗分布见图 3-12 所示。

由图 3-11 可以看出，仿真结果完成了噪声监测网络构建，考虑到可实行性同样可以把一些中继节点安装在地面诱导灯的灯罩内，但是比较图 3-9 和 3-11 可以看出，两个监测网络中中继节点的位置较近，存在节点重复的问题。

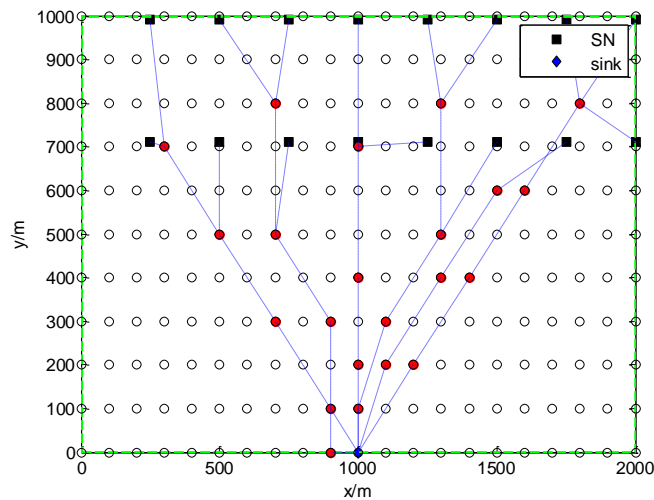


图 3-11 噪声监测布局图

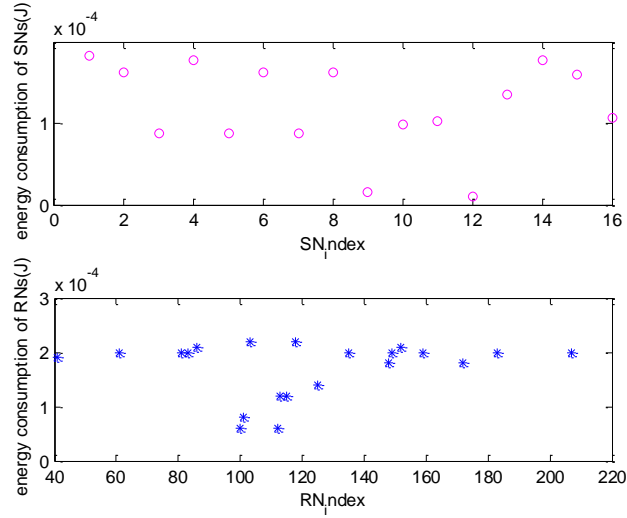


图 3-12 噪声监测节点能耗分布图

由图 3-12 可以看出，监测节点能耗数值分布更加零散，而中继节点能耗的分布集中在 $2 \times 10^{-4} \text{J}$ 左右的最多。

(3) 温湿度监测节点布局

初始输入参数如表 3-2 所示，监测节点坐标等参数如表 3-5 所示。

表 3-5 温湿度监测节点位置

节点序号	x_i, y_i
SN_1	0, 1000
SN_2	1000, 500
SN_3	1700, 300

按照上述输入参数，进行温湿度节点布局的仿真实验，温湿度节点布局图如图 3-13 所示，能耗分布如图 3-14 所示。

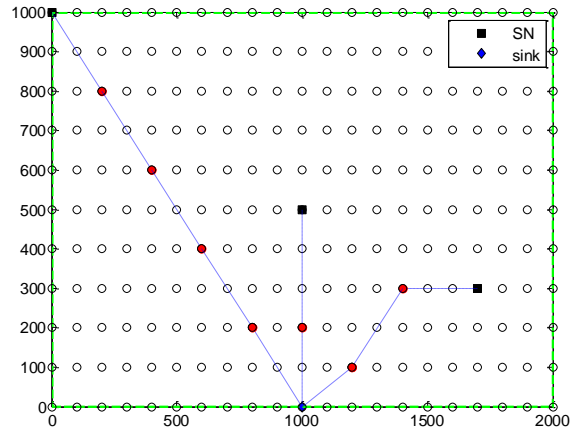


图 3-13 温湿度监测布局图

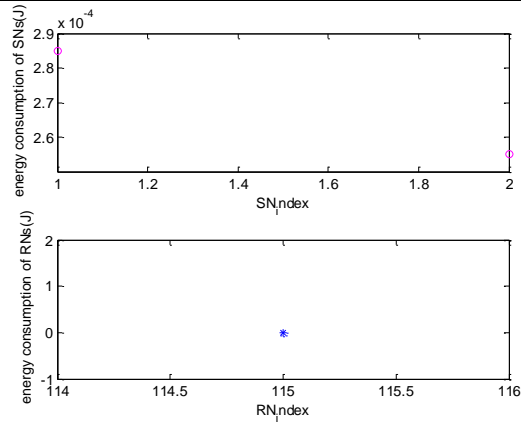


图 3-14 温湿度监测节点能耗分布图

3.2.5 算法的改进

从三种不同属性节点布局的仿真结果可以看出,如果三种监测项目分开监测,共需中继节点 56 个,节点的重复和浪费会导致硬件成本增加。统计监测网络所使用的中继节点数目以及总能耗和平均能耗如表 3-6 所示。

表 3-6 各个属性的节点能耗对比

节点属性	中继节点数目	总能耗(J)	平均能耗(J)
围界入侵	27	7.2641×10^{-6}	1.4798×10^{-7}
噪声	22	5.664×10^{-6}	1.265×10^{-7}
温湿度	7	1.539×10^{-7}	0.536×10^{-7}

按照一体化监测进行组网布局,将三种不同属性的节点所监测的数据发送给中继节点并进行数据处理之后和数据传输。仿真结果如图 3-15 所示。

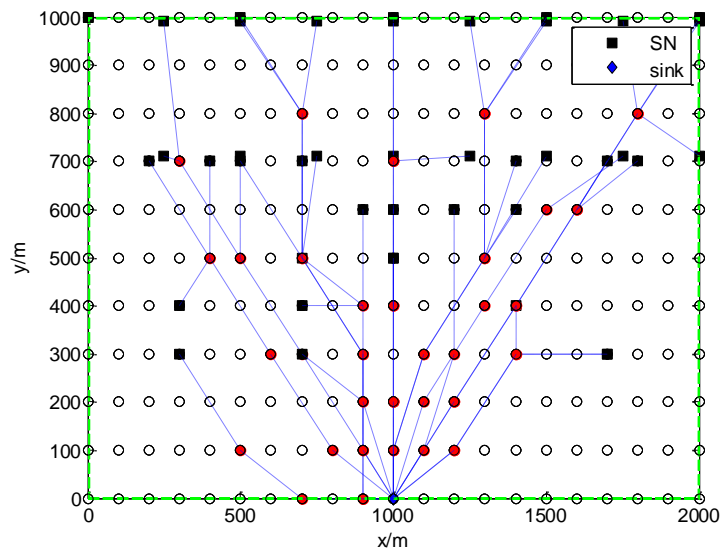


图 3-15 一体化布局仿真图

由图 3-15 可以看出,一体化组网布局的方法解决了中继节点硬件资源浪费的问题。布设在跑道区域的中继节点的中继节点只有三个,可以就近(在标准布设位置 30m 范围内)安装在地面诱导灯的灯罩内。从表 3-6 以及前面分析还可以看出,不同属性的监测节点布局中能耗相差较大,且不同属性的监测节点所需传输的数据量不同,会造成各个传输路径的负载不均、影响监测网络的整体使用寿命。针对不同属性节点的传输路径使用频率不同、能耗不均等问题,提出了适用于机场环境监测的 NGC 改进算法,改进内容有以下几个方面:

- (1) **路径建立:** NGC 算法在布设初期发现最优中继节点布局,布设出一条路径以供数据传输;改进算法采用多路径数据传输的方式进行组网布局。
- (2) **工作方式:** 基于 NGC 算法的组网布局是单路径工作,当工作路径失效时这条路径上的数据将无法传输,容错性差;改进算法在数据传输的工作过程中所有可用路径都会使用,个别路径的失效不会影响正常工作。
- (3) **传输方式:** 原算法将数据打包整包发送;而改进算法利用各个路径按优先级排序,依次轮换发送数据包。

对于多路径传输方式,其实质是利用监测网络中可能存在的不同分组传输路径,将需要传输的数据通过多个路径同时或轮换传输,以减轻现存或潜在的网络拥塞。这种方法可以有效适应网络中动态变化情况,减少传输延时。多路径数据传输方式按不同的工作方式可以分为两种类型。一类是在网络布设初期构建多个路径,而在工作时只有一条路径参与进行数据传输,其他路径只在工作路径失效时作为替补;另一类是轮换使用多条路径来进行数据传输的工作,因此也叫做并用多路径数据传输。

改进后的算法命名为 MP-NGC(multi-path NGC)算法。该算法采用并用多路径数据传输方式。算法改进的核心是采用单、多路径路由相结合的方式组网。其中多路径路由机制是将待传送信息通过所布设的 k 条路径轮次传输数据,来达到在 SINK 节点实时接收到所需数据包,依靠多条路径之间合理根据资源、跳数、延迟等策略,合理的分配负载,实现最优组网和数据的可靠传输。

3.3 基于 MP-NGC 算法的一体化组网

MP-NGC 算法首先以最近 greedy 准则作为启发式条件,算法的形成主要包括理论分析和算法设计两大部分。

(1) 理论分析:使用最近 greedy 准则解决路径选择最优问题,需要研究以下 3 个问题:

- 1) 明确目标问题;
- 2) 分析问题所包含的限制条件;
- 3) 制定贪婪准则。

(2) 算法设计：运用 MP-NGC 路由算法进行机场环境监测的组网布局主要包括四个部分：节点路由表的建立、路径路由的确定、基于 MP-NGC 进行组网布局和数据传输。下面对这四个部分的设计分别进行详细介绍。

3.3.1 通信路由表的建立

由于在监测网络中不同的传感器节点所监测的对象和节点属性不同，且需要实时了解每个监测节点关于工作状态的参数，所以为了实时判断当前路径的工作状态，为监测网络中每个节点设置一个通信路由表。通信路由表包含了以下信息：节点的地址、监测节点属性、节点的深度、信号强度 RSSI 以及剩余能量和优先级，将通信路由表设计为如图 3-16 的格式。

Addr 节点地址	Type 监测节点属性	Depth 节点深度	RSSI 信号强度	Er 剩余能量	Priority 优先级
--------------	----------------	---------------	--------------	------------	-----------------

图 3-16 通信路由表格式图

通信路由表中所包含的节点地址、节点深度(即节点跳数)、信号强度 RSSI 和节点剩余能量的物理含义如下：

- (1) 节点地址 Addr: 所布设的中继节点的 8 位网络地址；
- (2) 节点类型 Type: 中继节点所转发的监测节点信息类型，取决于具体监测的数据类型；
- (3) 节点深度 Depth: 即该节点到 SINK 节点的跳数；
- (4) 信号强度 RSSI: 是到上一级节点的信号强度，受机场中存在电磁干扰等非正常因素的影响，需要在通信路由表中加入信号强度；
- (5) 剩余能量 Er: 该节点实时剩余能量；
- (6) 优先级 Priority: 优先级的计算公式如(3-20)所示，给计算公式中的每一个变量一个加权值，分别是 α , β 和 $1-\alpha-\beta$ ，各个加权值可以通过想要侧重要求的方面（如优先要求能量足够、优先要求跳数较小等）进行取值。其中： L_m 是节点深度的最大值。

$$V_{priority} = \alpha * (L_m - Depth) + \beta * RSSI + (1 - \alpha - \beta) * E_r \quad (3-20)$$

设置节点的通信路由表是为了方便查询监测网络中每个参与工作的节点实时状态。当某条路径完成一次数据传输之后，由于能量的消耗会使剩余能量变小，因此对应的优先级也会减小，在下一次数据传输中被选中的几率就会变小从公式可以看出，距离 SINK 节点较远的中继节点优先级较低，当某节点剩余能量很小或者信号强度弱时，由于优先级的限制，不会让其参与数据传输工作，这种机制从根本上增强了监测网络的容错性。

3.3.2 路径数目的确定

在通信路由表建立好之后,在进行节点布局之前首先要确定对应不同监测数据类型 Type 所需要的路径数 k 。要找到所需的路径数目,首先根据实验室相关工作,对某种监测节点类型的传输成功率进行 20 次试验,数据传输成功率的最小值、中值和最大值分别是为 p_1 、 p_2 和 p_3 , $p_n(n=1, 2, 3)$ 也就是成功将数据传送给 SINK 节点的概率。基于多路径的数据传输可以将每一个沿 $i(i=1, 2, \dots, k)$ 条路径进行数据传输的子过程对应为重复性伯努利实验^[58]。由于所采用的多路径是节点不相交路径组,因此这些实验是彼此独立的。重复性伯努利实验结果的分布可以近似为正态分布,依据正态分布建模来估算所需路径条数 k , 计算每种属性的监测节点所要建立的多路径传输条数 k 如式(3-21)所示。

$$k = \left\lceil x_{\alpha} * \sqrt{\sum_{n=1}^3 p_n (1 - p_n)} + \sum_{n=1}^3 p_n \right\rceil \quad (3-21)$$

由于路径传输条数必须为整数,为保证传输可靠性,在计算公式中对 k 的取值进行了向上取整的处理。 x_{α} 的对应取值如表 3-7 所示:

表 3-7 不同 α 对应的正态分布取值

α	95%	90%	85%	80%	50%
x_{α}	-1.65	-1.28	-1.03	-0.85	-0

确定了每种监测节点类型 Type 所对应的路径条数 k 之后,对监测节点进行组网布局。当然为了简化步骤便于计算,在组网时可以将确定路径数 k 的计算工作放在 MATLAB 中进行,接着根据所需路径数 k 进行节点寻优的叠加。在数据传输过程中,监测节点实时比较通信路由表的信息中计算所得的优先级的值,最大者被选为当前传输用路径。

3.3.3 基于 MP-NGC 算法的节点布局

在建立通信路由表、确定多路径数目工作完成之后,进行节点布局。当监测节点传输监测数据之前,需要先依据节点属性判断采用单路径或多路径的数据传输方式。温湿度节点的数据量小,不需实时上传,继续采用单路径的传输方式。对于噪声监测节点而言,其监测数据需要全部发送给 SINK 节点以便作为预测软件的数据源,围界入侵节点需要实时上传开关量,这两种监测节点数据量较大,采用多路径的传输方式。

确定了路径数目 k 后,首先判断该监测节点类型所对应的通信路径条数是否是 1。若 k 为 1 则利用 NGC 算法进行节点布局,在确定通信路径可用之后进行数据传输。若 k 大于 1,则先按照贪婪寻优准则找出第一条路径 P_k ,并从候选中

继节点集合中删除该路径中所包含的中继节点监测节点，再执行 k —指令，重复上述步骤直到 k 为 0，此时组网布局工作完成。接着向上层中继节点传输一个查询数据包，等待中继节点的返回了回应信息之后，将数据沿着当前所比较出的优先级最大的一条路径发送给 SINK 节点。一次数据传输之后，在这条路径上的中继节点能耗剩余能量会减少，再次计算时优先级的排序也会降低。

根据以上描述，设计 MP-NGC 算法，首先给出基于 MP-NGC 算法进行监测网络组网布局的流程如图 3-17 所示。

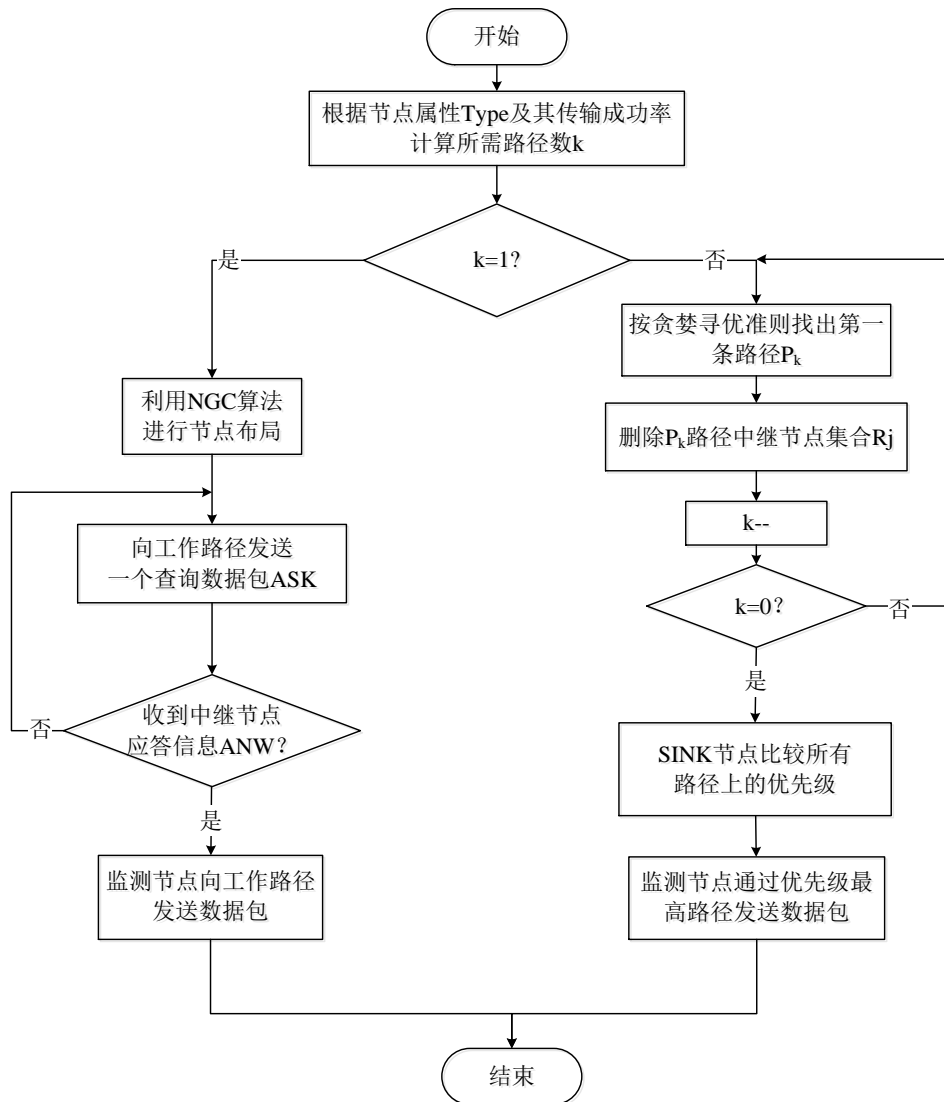


图 3-17 MP-NGC 算法组网流程图

所设计的 MP-NGC 算法的执行步骤描述如下。

输入： 监测区域面积、网格间距 L 、监测节点集合： $M=\{M_1, M_2, \dots, M_i\}$ 的坐标及节点类型、通信半径 R 、通信容量 CAP 、路径收发成功率等一些初始参数。

- Step1.** 根据节点属性 Type 及其路径收发成功率计算所需路径数 k 。
- Step2.** 确定网格间距 L 与步进, 将机场监测区域网格化处理, 从而确定所有候选中继节点的坐标。
- Step3.** 判断 k 的数值, 若 k 为 1, 将 M_i 到 M_0 的欧氏距离 $d(M_i, M_0)$ 记为 $d_{i0} (1 \leq i \leq n)$, 按递减的顺序排列出欧氏距离 $d = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, 与欧氏距离集合中的元素向对应的是监测节点集合 $M_0 = \{M_{10}, M_{20}, \dots, M_{i0}\}$ 。
- Step4.** 从距 SINK 节点最远的监测节点(即 M_{10})开始, 在其通信半径 R 的范围内查询候选中继节点, 选择满足传输方向限制和最近机制的, 且离 M_0 较近的中继节点(设为 R_j)作 M_{10} 的下一跳。
- Step5.** 若此时 M_{10} 的通信容量($RNCAP[R_j]+1$) $< R_j$ 的通信容量(capacity), 则选择 R_j 作为下一跳, 且更新选中的中继节点的通信容量中继节 $CAP [R_j] += 1$ 。
- Step6.** 若 $d(R_j, M_0) > R$, R_j 开始循环执行第三步, 继续在可行域寻找中继节点, 设选中 R_{j+1} 作为下一跳, 进入下一步。否则, 将 M_{j0} 欧氏距离的集合当中去除。
- Step7.** R_{j+1} 开始执行第四、五步, 更新这一步中 R_{j+1} 的通信容量, 即令中继节点 $CAP [R_{j+1}] = RNCAP [R_j]$ 。
- Step8.** 直至 $d = \Phi$, 路径建立成功, 监测节点向工作路径发出查询信号并得到回复信号 ANW 的信号之后, 进行传输数据。
- Step9.** 若 k 大于 1 则执行第三步到第八步, 执行 $k--$, 找出多路径的第一条路径 P_k 。从候选中继节点集合删除 P_k 中的中继节点元素 R_j , 更新待选择的中继节点集合。
- Step10.** 重复第九步直至 $k=0$ 。
- Step11.** 所有中继节点 R_j 读取通信路由表中的参数, 根据公式(3-20)计算出所有 $V_{priorityj}$, 比较各个 $V_{priorityj}$ 数值得到优先级最高的节点所在的路径 P_b 。
- Step12.** 监测节点向 P_b 发送查询信号 ASK 并得到回复信号 ANW 的信号之后, 进行传输数据。
- 输出:** 所构建网络中中继节点坐标、传输路径及其对应的优先级; 监测网络相关能耗和算法执行时间 t 等。

3.3.4 MP-NGC 算法实验仿真

基于 MP-NGC 算法在 MATLAB 中进行一体化组网布局仿真布局实验, 找到满足限制条件的通向 SINK 节点的多个通信路径。为更直观的分析比较两种算法, 首先将 MP-NGC 算法的仿真实验的机场规模、各个属性节点的个数与位置设置和前面 NGC 算法的实验条件一致, 机场监测区域的面积还是取 $2000m \times 1000m$, 监测节点位置坐标见表 3-4, 表 3-5 和表 3-6, 其余的输入参数如表 3-8 所示。

表 3-8 MP-NGC 算法仿真输入参数

监测区域/m	节点通信容量	网格间距 L/m	通信半径 R/m	SINK 节点坐标
2000*1000	200	100	330	500, 0

得到的仿真结果如图 3-18 所示。由仿真结果布局图可以看出，机场噪声监测需要 3 条路径根据实时优先级轮换传输，而围界入侵监测虽然需要实时上传，但其数据量只是 0 和 1 开关量，数据量小，需要 2 条路径轮换传输。

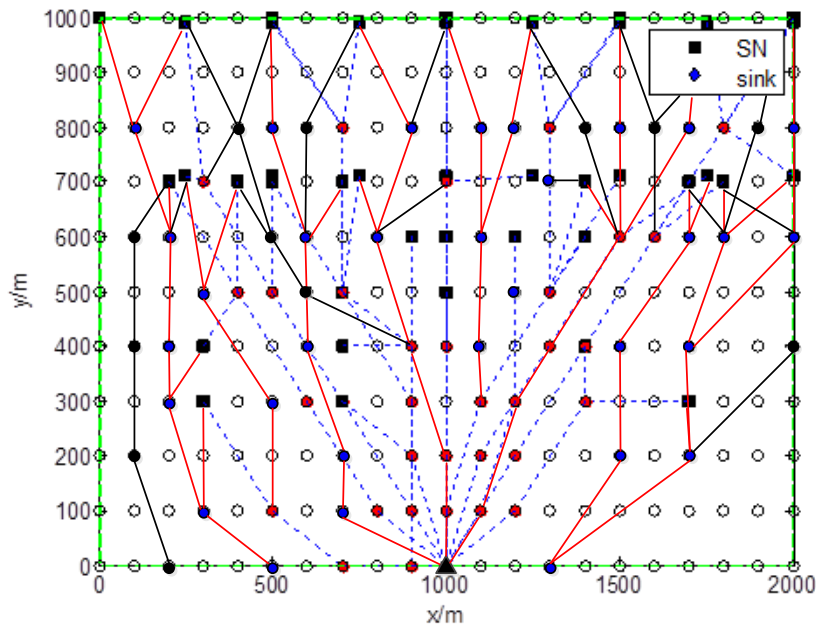


图 3-18 MP-NGC 算法仿真效果图

需要注意的是，在图 3-18 中显示的是所有可用路径所组成的监测网络，而在一次数据传输的工作过程中，每个监测节点到 SINK 节点只需要一条路径，下次数据传输时又会根据优先级选择其他路径。所以工作过程中的监测网络要比仿真结果所显示的监测网络简单得多。关于 MP-NGC 算法的能耗情况以及和 NGC 算法的能耗对比，将在第四章中详细展开，这里不再赘述。

3.4 本章小结

本章首先对基于 greedy 准则的 NGC 算法进行算法设计和仿真实验，在得到仿真实验结果后发现，不同属性监测节点的数据需要上传的频率差别较大，导致路径使用不均衡，从而影响监测网络的均衡性。针对这些问题对 NGC 算法进行了路径建立、工作方式和传输方式三方面的改进，确定了单、多路径相结合的组网布局方式，改进的算法包括两个方面：一是增加了通信路由表，包括如剩余能量、优先级等信息，综合考虑各节点实时工作状态；二是噪声和围界入侵数据的传输采用多条路径轮换进行，确保了监测网络实时性和整体工作寿命。

第4章 算法优化与性能评价

4.1 算法的负载均衡优化

使用在机场环境监测中，保证网络整体的可靠性和网络寿命至关重要，节点的通信容量的最优取值应是一个依据实际网络状况。因此提出通过实现网络能耗均衡来延长网络生命周期的方法。负载均衡的实现在多路径数据传输的监测网络中尤为重要，使用基于通信容量的方法实现负载均衡，这种方法的关键是找到决定最优通信容量的均衡因子。

4.1.1 基于通信容量的负载均衡

基于通信容量的均衡因子法的核心在于计算监测网络中负载在各个路径中的最大值和最小值。然后根据均衡因子，取一个中间值作为平均负载，以此确定节点通信容量的最优取值。根据相关文献可以看出，大多数实验过程中都将传感器节点的通信容量设置为节点的最大数据转发量。

设 max 是各个监测节点硬件要求的最大通信容量，则有公式(4-1)和(4-2)：

$$MINCAP \leq (MAXCAP + MINCAP) * level \leq max \quad (4-1)$$

$$MINCAP \leq MAXCAP \leq max \quad (4-2)$$

综上最终得到了如式(4-3)所示的均衡因子 $level$ 的合理取值范围：

$$\frac{1}{max+1} \leq level \leq \frac{max}{max+1} \quad (4-3)$$

使用方差来直观的显示各个路径负载均衡得情况。方差越小，各个路径上的负载之间相差越小，负载均衡的效果越好。监测网络中各个节点的平均负载和方差定义分别如公式 (4-4)和(4-5)所示：

$$ave = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4-4)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - ave)^2}{n} \quad (4-5)$$

4.1.2 方法描述与仿真实验

基于通信容量的均衡因子法判断节点通信容量上限的关键在于：确定一个适当的均衡因子。由公式(4-3)可以初步确定均衡因子 $level$ 的合理取值范围， max 取 62，可知 $level$ 取值范围是 0.013-0.986。为了能取得一个理想的均衡因子，在合理取值范围内对 $level$ 做等差取值，再根据 MP-NGC 算法进行对比测试。实现

负载均衡优化的具体工作过程如下文所示。

输入： $level$ 的等差取值，监测节点通信容量上限。

Step1. 初始化变量 $n=0$ ，监测节点容量 $SUMCAP[n]=\{0\}$ ，节点最大数据转发量 $MAXCAP=CAP$ ，节点最小转发容量 $MINCAP=1$ ，其中 CAP 为各节点实际通信容量。均衡因子 $LEVE$ 的具体取值随后将会详细给出。

Step2. 根据 MP-NGC 算法为 $MN_i (1 \leq i \leq m)$ 生成到 SINK 节点的路径， m 为监测节点总数。

Step3. 若此路径上各节点连接有 m 个监测节点，则 $SUMCAP[n++]=m$ 。

Step4. 比较 $MAXCAP$ ， $MINCAP$ 与 $SUMCAP$ 数组中各元素的大小，将最大的赋给 $MAXCAP$ ，最小的 $MINCAP$ 。

Step5. 更新节点通信容量的上限 $CAP=(MAXCAP+MINCAP)*level$ 。

Step6. 循环执行第一步至第五步，直到得出所有 $level$ 值对应的计算结果。

运用上述工作步骤对最优均衡因子的选取进行仿真，将实验结果进行整理，得出不同均衡因子条件下，各个路径负载的平均值和方差如表 4-1 所示。

表 4-1 基于通信容量的负载均衡执行步骤

$level$	负载方差 S^2	平均负载 ave	所需中继节点数目
0.1	-	-	80
0.2	-	-	73
0.3	-	-	68
0.4	2.69	39	64
0.5	2.6	40	57
0.6	4.47	45	52
0.7	3.39	56	45
0.8	0.75	65	39
0.9	0.68	75	32

其中表中的空格的内容表示代表 SINK 节点上一跳的所有中继节点负载超出上限 max 。为了更加直观的作比较，在 MATLAB 中仿真时，将输出数据绘制成柱状对比图，如图 4-1 所示。

从图 4-1 的对比结果可看出，均衡因子的数值取 0.9 时实现负载均衡的效果最好，但是这样会使节点通信容量接近自身上限，在实际操作中应当给通信容量预留一定的余量，因此最佳均衡因子取值为 0.8。均衡因子 $level$ 最优取值的表达式如式(4-6)。

$$level \in [MAX(level) - 0.2, MAX(level)) \quad (4-6)$$

其中 $MAX(level)$ 是均衡因子的上限值。

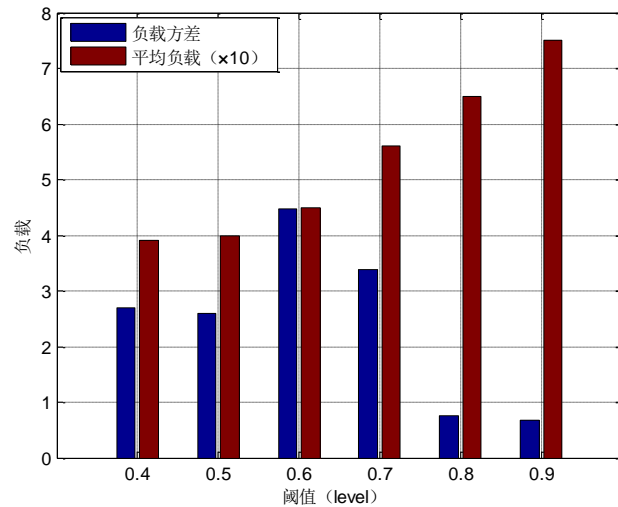


图 4-1 各均衡因子对比图

4.2 改进后算法的评价分析

在对算法进行针对机场环境的改进设计完成之后，通常会对算法的有效性进行评价分析，因此涉及到算法性能的评价标准。本节将机场规模分成 5 个等级，针对不同监测面积进行仿真实验，并从中继节点数目、通信能耗网络总能耗、剩余能量和耗能均衡率这几个方面对改进后的算法进行一个全面的评价分析。由于不同监测面积下的仿真布局实验图形过多，因此将与性能评价相关的输出参数整理成表格的形式。

4.2.1 节点数目成本

在监测网络构建过程中，硬件资源的主要来源是有采集监测数据功能的监测节点和转发数据功能的中继节点，因此所设计的算法需要在保证监测网络正常运行的前提下，尽可能的减少节点数目，节约硬件成本。在监测网络构建初期，确定了监测节点的数目及位置之后，最直观的评价指标即所布设的中继节点的个数。分别用 NGC 算法和 MP-NGC 算法对不同机场规模进行仿真实验，得到节点数目的数据整理如表格 4-2 所示。

表 4-2 节点数目的对比

机场面积/m ²	1000*1000	1000*1500	1500*1500	1500*2000	2000*2000
监测节点数目	34	43	58	67	80
NGC 节点数目	45	56	69	78	97
MP-NGC 节点数目	26	32	45	52	63

从表格 4-2 可知，在所布设的监测节点数目相同的前提下，MP-NGC 算法较 NGC 算法而言，在节点数目上有明显优势，使用改进后的算法能大量减少中继节点的数目，充分实现了各个中继节点的使用价值，避免了由于额外添加大量中继节点造成的总成本的增加。在 MATLAB 中根据输出数据绘制的节点个数的对比图如图 4-2 所示。

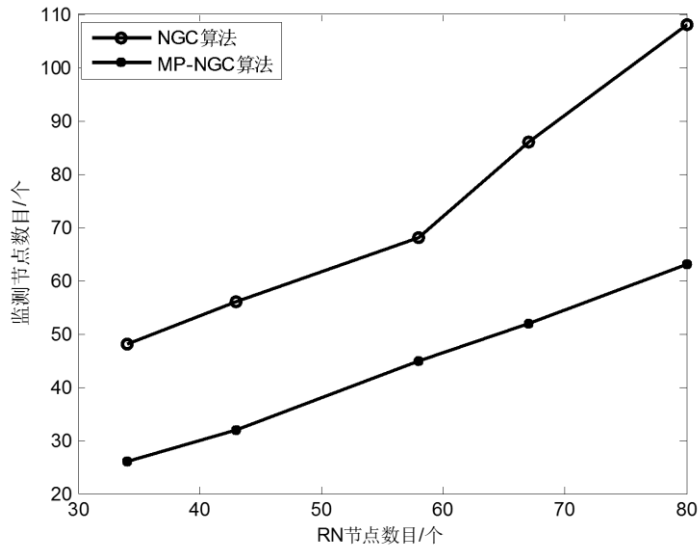


图 4-2 节点数目对比图

布设中继节点数目直接关系到网络构建初期的设施成本，从图 4-2 可以看出 MP-NGC 算法所需节点较少，在同样的监测节点布局情况下，MP-NGC 算法中需要布设的中继节点数目减少了 30% 以上，且在中大型机场环境下该百分比更高。结果图显示，在监测节点数目到 70 时，所需中继节点的个数存在一个转折点。分析这种现象，其主要原因是监测节点较多时，NGC 算法时累加，而 MP-NGC 算法一个中继节点最多可以转发 3 个监测节点的数据，因此节点多时数目上的差距更为明显。

4.2.2 通信能耗的对比

在 2.1.4 节中已经提到，监测节点在通信模块上消耗的能量最多，处理模块的功耗远远小于通信模块能耗，因此在考虑监测节点能耗时主要关注通信能耗。设监测节点 S_i 在工作时路径 1 的通信能耗为 $energy_consumm_{i1}$ ，... 路径 k 的工作能耗为 $energy_consumm_{ik}$ ，则该节点的通信能耗的计算公式如(4-7)所示。

$$EC_i = energy_consumm_{i1} + energy_consumm_{i2} + \dots + energy_consumm_{ik} \quad (4-7)$$

依据公式(4-6)对两种算法在不同机场规模条件下的通信能耗进行计算，最终参与对比的通信能耗值取集合 $\{EC_i\}$ 中的中值。整理数据如表 4-3 所示。

表 4-3 通信能耗的对比

机场面积/m ²	1000*1000	1000*1500	1500*1500	1500*2000	2000*2000
机场规模编号	1	2	3	4	5
监测节点数目	34	43	58	67	80
NGC 通信能耗/J	1.24×10^{-4}	2.68×10^{-4}	4.03×10^{-4}	5.87×10^{-4}	7.23×10^{-4}
MP-NGC 通信能耗/J	0.86×10^{-4}	1.82×10^{-4}	3.16×10^{-4}	4.01×10^{-4}	4.93×10^{-4}

从表格 4-3 可以看出，在所布设的监测节点数目相同的前提下，MP-NGC 算法与 NGC 算法比较，所消耗的通信能耗更少，使得每个节点的更换周期延长。在 MATLAB 中根据仿真实验数据绘制的通信能耗的对比图如图 4-3 所示。

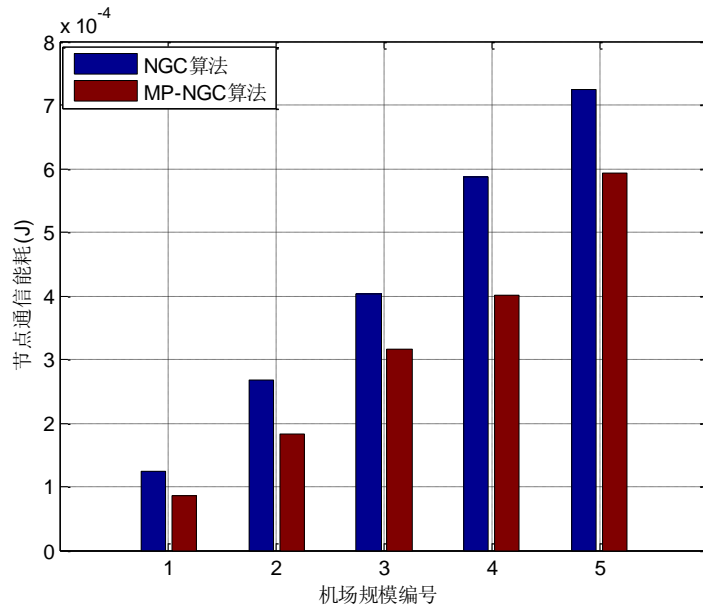


图 4-3 通信能耗对比图

4.2.3 网络总能耗评价指标

减少布设节点的数目可以降低网络初期构造时的硬件成本，而减少监测网络运行时的成本则要看网络总能耗这一评价指标。网络总能耗不仅要考虑各个节点的通信能耗，还要考虑路径损耗等问题，第 m 条路径的能耗计算公式如下。

$$P_{Tm} = \frac{P_0 (4\pi)^2 d^2 L}{G_T G_R \lambda^2} \quad (4-8)$$

其中： P_0 -节点通信功率；

d -无线收发节点间距离；

L -路径损耗因子($L=2$)；

G_T, G_R -接收、发射天线的增益；

λ -无线信号的波长。

根据公式(4-8)，进一步得到监测网络总能耗的计算公式：

$$TEC = \sum_{m=1}^k P_{Tm} \quad (4-9)$$

依据公式(4-8)对两种算法在不同机场规模条件下的总能耗进行仿真计算，整理数据如表 4-4 所示。

表 4-4 总能耗的对比

机场面积/m ²	1000*1000	1000*1500	1500*1500	1500*2000	2000*2000
机场规模编号	1	2	3	4	5
监测节点数目	34	43	58	67	80
NGC 总能耗/J	2.61×10^{-3}	4.18×10^{-3}	5.21×10^{-3}	6.52×10^{-3}	8.19×10^{-3}
MP-NGC 总能耗/J	1.14×10^{-3}	2.97×10^{-3}	4.58×10^{-3}	5.53×10^{-3}	6.99×10^{-3}

从表格 4-3 可以看出，在所布设的监测节点数目相同的前提下，MP-NGC 算法与 NGC 算法比较，所消耗的总能耗更少，这直接关系到整个监测网络的存活寿命的长短。在 MATLAB 中根据输出数据绘制的总能耗的对比图如图 4-4 所示。在网络总能耗这一评价指标中，MP-NGC 算法的优势不如节点通信能耗的优势明显，但是还是有一定的改善。

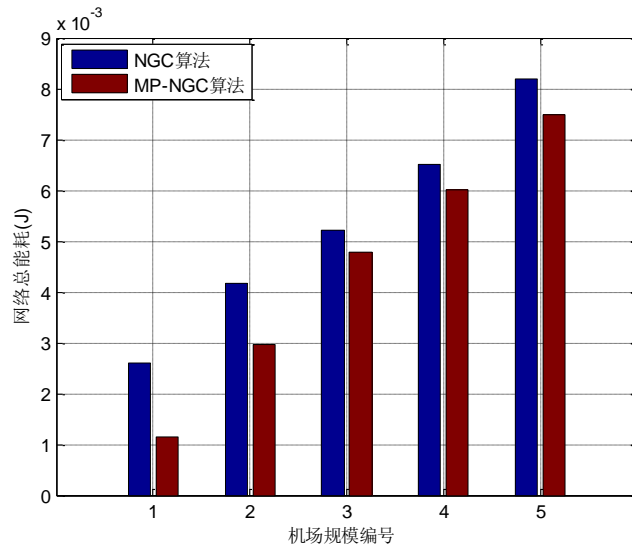


图 4-4 总能耗对比图

4.2.4 剩余能量的对比

以上的平均能耗和总能耗都是在一次算法执行时间 t 内算得的数值，在实际应用中，节约能耗的性能评价标准多是“使用寿命”。在评价指标中有必要加入能耗与时间的关系图。在监测网络的工作过程中，剩余能量和数据传输的数据量大小有关，和参与数据感知、收集和传输的所有节点接收发送的数据包的个数有

关。为了减少其他影响因素对该评价指标的影响，设定监测节点的收发数据的功率是固定值，则剩余能量 E_R 的计算公式如下：

$$E_R = E_O - N_{\text{send}} * ETX - N_{\text{received}} * ERX \quad (4-10)$$

其中， E_O 表示节点初始能量

N_{send} 表示节点发送数据包的数量

N_{received} 表示节点接收数据包的数量

其中 ETX 、 ERX 分别表示收发一个数据包所需要的能量值。为更加直观，将剩余能量归一化，用百分比表示：

$$E_{\text{res}} = \frac{E_R - E_{Rt}}{E_R} \times 100\% \quad (4-11)$$

其中， E_{Rt} 表示第 t s 时的网络总能耗，将程序改为循环执行，每 1s 查询一次网络总能耗。仿真结果如图 4-5 所示，对比发现 MP-NGC 算法所布设的网络能量消耗较慢，监测网络存活寿命大于 NGC 算法。

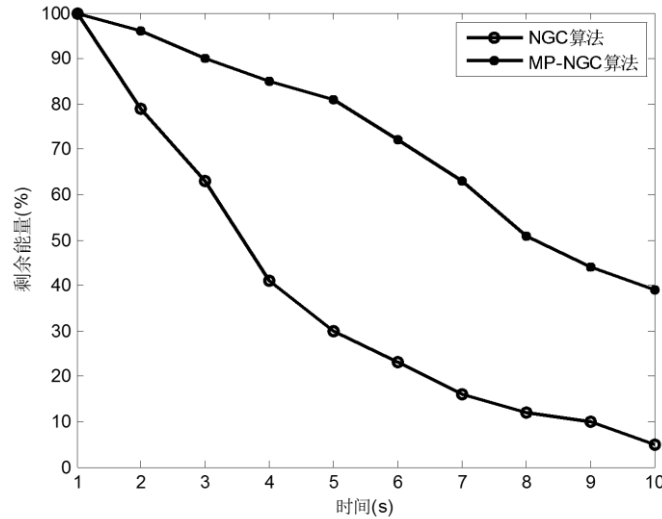


图 4-5 剩余能量对比图

4.2.5 能耗均衡率

在通过通信路径均衡使用和计算均衡因子两种手段来实现耗能均衡之后，需要一个合适的指标对两部优化效果进行评价比较。由于前文的指标工作过程中的得到了大量网络整体能耗及平均能耗的数据，根据这些数据进行分析，提出了能耗均衡率的概念。

第 i 个节点对应路径组的通信能耗 EC_i 计算公式如 (4-6) 所示，则通信能耗量最多的路径组和通信能耗量最少路径组的计算公式如 (4-12) 和 (4-13) 所示。

$$EC_{\max} = \max\{EC_i\} \quad (4-12)$$

$$EC_{\min} = \min\{EC_i\} \quad (4-13)$$

为直观的衡量比较耗能均衡方面的效果,采用归一化的方法得到耗能均衡率。耗能均衡率越高,网络工作时间越长。耗能均衡率的计算公式如 (4-14)所示。

$$lp = 1 - \frac{EC_{\max} - EC_{\min}}{\overline{EC}} \quad (4-14)$$

其中, \overline{EC} 表示平均通信能耗,如公式(4-15)所示。

$$\overline{EC} = \frac{\sum_{i=1}^k EC_i}{k} \quad (4-15)$$

由前文得到的实验数据计算耗能均衡率,其实验数据如表 4-5 所示。

表 4-5 耗能均衡率的对比

机场面积/m ²	1000*1000	1000*1500	1500*1500	1500*2000	2000*2000
NGC-lp	0.85	0.81	0.76	0.74	0.73
MP-NGC-lp	0.93	0.94	0.92	0.93	0.93
优化 MP-NGC-lp	0.94	0.95	0.94	0.96	0.95

由上表可以看出,MP-NGC 算法的耗能均衡率较 NGC 算法而言有很大提高,且对于不同规模机场的情况,耗能均衡率变化不大。这主要是因为 MP-NGC 算法做到了路径的均衡使用,而经过均衡因子优化后的仿真结果与 MP-NGC 算法相比,有一定程度的改进。监测网络能耗问题同样能够看成一个组合求最优解的问题,用数学模型的方式表达,如公式(4-16)、公式(4-17)和公式(4-18)所示。

$$\max lp \quad (4-16)$$

$$\min TEC, EC_{\max} - EC_{\min} \quad (4-17)$$

$$s.t. \quad 1 \leq i \leq n \quad (4-18)$$

4.3 本章小结

本章提出基于通信容量的负载均衡优化方法来进行进一步平衡网络中各个路径的负载情况。通过仿真实验和数据分析,得出了均衡因子的最优取值。第二节中过多指标评价对比改进前后的两种算法,从算法的所需硬件成本和网络能耗的角度来看,MP-NGC 算法进行机场环境监测网络的组网布局是十分可取的。对比测试结果表明 MP-NGC 算法在满足节点通信路径不可逆等物理限制因素的同时,能大大减少所需的中继节点的数目,且能降低网络总能耗而不会额外增加时间消费,从而使各节点在生成路径时相互协作,进一步达到了构建低成本、低功耗的机场环境监测网络的目的。

结 论

为达到全面、实时、高效、低能耗构建机场环境监测网络的目的,本文在调研分析了几种常见组网算法的基础上,确定了最适用于机场环境监测的算法,并根据监测数据的特点和一体化组网的特性,提出了改进算法——MP-NGC 算法。该算法的提出和设计具有一定的创新性,填补了国内机场环境监测一体化组网方面的空白。目前完成的工作和主要创新点如下:

(1) 为解决机场环境监测指标单一、实时性差等问题,设计了监测网络一体化组网的布局方式。将围界入侵警报、噪声监测和温湿度三种不同属性的监测节点整合到同一个监测网络,建立出机场布局模型。**创新点在于**,提出了适合机场环境监测节点固定且其属性多样化特点的一体化组网的思想;建立了符合节点监测位置和数据特点要求的机场布局模型。

(2) 利用以最近贪婪准则为启发式条件的 NGC 算法,对组网布局进行仿真实验。为了便于后期节点现场布设,首先将监测区域进行网格划分,并设置了传输方向、通信容量、转发跳数等限制条件来减小寻优范围,确保所建立路径的有效性。实验仿真显示,NGC 算法可以完成不同属性节点的监测网络构建,但是分析发现,不同属性监测节点需要传输的数据量差别较大,导致路径使用不均,部分路径的过早失效会降低监测网络的整体寿命。

(3) 结合上述 NGC 算法存在的问题,从工作方式、传输方式和路径建立这三个角度对算法进行改进,提出了更契合一体化组网布局特性的 MP-NGC 算法。这种算法采用多路径路由机制,确定了所需路径数目 k 以后,同样以最近贪婪准则为启发式条件进行 k 次路径寻优。从实验仿真结果可知,MP-NGC 算法所需的节点数目减少 30% 以上,节约了硬件成本。MP-NGC 算法通过路径的均衡使用延长网络寿命,为了进一步实现负载均衡,采用基于通信容量实现负载均衡的方法,找出了能实现最优通信容量的均衡因子。**创新点在于**通过建立通信路由表实时更新节点状态和优先级,每次数据传输都在多路径中选择优先级最高的路径。

(4) 为了保证 MP-NGC 算法的普适性,将机场监测区域分为五种不同规模大小,并设置不同大小机场所有的监测节点个数和位置,进行仿真实验并将仿真数据进行整理分析。仿真实验表明,该算法可以完成不同规模大小的机场监测网络构建。实验数据表明,与 NGC 算法相比,MP-NGC 算法节约了网络硬件成本,通过降低能耗达到了延长网络寿命的目的。在节点数目成本、通信能耗、网络总能耗、剩余能量和耗能均衡率等方面都有明显优势。

综上所述,MP-NGC 算法能实现机场监测网络的组网,且构建网络成本较低,同时通过减少耗能和实现负载均衡延长了监测网络寿命。

在研究过程中，发现仍有以下**研究前景**：

- (1) 对于监测节点的初步布局，本文根据对数据特点和布设位置的需求，对监测节点的坐标进行手动输入。可以通过设计算法，依据数据特点和布设要求自动确定监测节点的个数和位置并输出节点坐标信息。
- (2) 本文的在 **MATLAB** 上进行仿真实验，仿真输出结果为节点坐标和组网布局图。为了进一步方便操作，可以开发一个可视化人机交互界面，实时显示各位置监测节点的工作情况，是一个很好的后续研究方向。
- (3) 由于机场会有改建和扩建工作，为保证全面监测，可能会需要在监测网络中加入新的节点，在不破坏原有网络结构的基础上加入新节点也是一个需要进一步研究的地方。

参考文献

- [1] Vivek D, Tovinakere, Olivier Sentieys. Low Power Reconfigurable Controllers for Wireless Sensor Network Nodes[C]. Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM), 2014, 68 (5): 230-233.
- [2] 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45 (1): 1-15.
- [3] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报, 2013, 35 (1): 215-227.
- [4] Zhang X, Ding X Y, LU S L. Principles for Energy-Efficient Topology Control in Wireless Sensor Network[C]. Proceedings of the 5th WICOM, Beijing, China, 2015: 1-3.
- [5] 李晓津, 王春风, 张清. 空域资源、民航发展以及国民经济关系的研究[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31 (2): 93-96
- [6] Yang Yingjie. Airport Noise Simulation Using Neural Networks[J]. IEEE World Congress on Computational Intelligence, Hong Kong, China, 2010, 1917-1923.
- [7] Miao Jin, Guodong Rong, Hongyi Wu. Optimal Surface Deployment Problem in Wireless Sensor Networks[J]. Proceedings IEEE INFOCOM, 2014: 2345-2353.
- [8] 赵娜. 无线传感器网络研究现状及应用[J]. 电脑与电信, 2015, 12 (4): 47-48.
- [9] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报, 2013, 35 (1): 215-227.
- [10] WANG Z, LV C, SHAO X. An Improved Relay Node Layout Approach in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Computational Information Systems, 2013, 9 (23): 9381-9388.
- [11] 民用机场运行安全管理规定 (CCAR-140) .
- [12] Bing-Yuan Wang, Xin-Qing Zhang, Kun Tian. An Efficient WSN Routing Protocol on Airfield Lighting Monitoring System[C]. 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015: 1701-1705.
- [13] Asensio C, Ruiz M, Recuero M. Real-time aircraft noise likeness detector[J]. Applied Acoustics, 2013 (71): 539-545.
- [14] X. Prats, V. Puig, J. Quevedo. A multi-objective optimization strategy for

- designing aircraft noise abatement procedures[J]. Case study at Girona airport. Transportation Research Part D, 2011 (16): 31-41.
- [15] Kishtwal A, Singh J, Bhatt R. A Review: Wireless Sensor Networks (WSN) and Security Aspects[C]//International Journal of Engineering Research and Technology. ESRSA Publications, 2014: 456-461.
- [16] Sajjad Hussain Shah, Fazle Kabeer Khan, Wajid Ali. A new framework to integrate wireless sensor networks with cloud computing[J]. Aerospace, 2013 (32): 1-6.
- [17] Liu X, Cao J, Lai S. Energy efficient clustering for WSN-based structural health monitoring[C]//INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE. IEEE, 2011: 2768-2776.
- [18] Augusto Casaca, Tiago Silva, António Grilo, et al. The Use of Wireless Networks for the Surveillance and Control of Cooperative Vehicles in an Airport[J]. Telecommun Syst: 2007 (36): 141-151.
- [19] Lynn E. The application of automatic surface lights to improve airport safety[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine IEEE. 1993 (3): 14-20.
- [20] Teo C, Revoredo, Jules G. Noise metrics comparison and its use on urban zoning in airports surveys: A Brazilian case study[J]. Journal of Air Transport Management, 2013 (14): 304-307.
- [21] Tang X M, An H, Wang C. Conflict-Avoidance-Oriented Airport Surface-Taxiing Guidance Lights System Model[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35 (2): 674-681.
- [22] Wei Wang, V. Srinivasan, Kee-Chaing Chua. Extending the Lifetime of Wireless Sensor Networks Through Mobile Relays[J]. Transactions on Networking, 2014, 16 (5): 1108-1120.
- [23] Vasyl Lytvyn. Research on the Application of Internet of Things in Airport Enclosure Intrusion Detection and Alarm System[J]. Computer Sciences and Information Technologies, 2012 (1): 78-81.
- [24] Vasyl Lytvyn, Zoriana Rybchak. Design of airport service automation system[J]. Computer Sciences and Information Technologies, 2015, 63(12): 33-35.
- [25] Rolf.S, West.R. Method and Apparatus for Wireless Runway Incursion Detection[P]. US: 2010/0023191, 2010-1-28.
- [26] Granado J, Chavez J. Modeling Airfield Ground Lighting Systems for Narrowband Power-Line Communications[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2010, 25 (4): 2399-2405.

- [27] Vaibhav P, Amarjeet K, Narottam C. A Review on Data Aggregation Techniques in Wireless Sensor Network[J]. Journal of Electronic and Electrical Engineering, 2014, 1 (2): 1-8.
- [28] Misra S, Seung Don Hong, Xue Guoliang. Constrained relay node placement in wireless sensor networks to meet connectivity and survivability requirements[C]. The 27th Conference on Computer Communications, 2008: 281-285.
- [29] Misra Satyajayant, Seung Don Hong. Constrained Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks: Formulation and Approximations[J]. IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, 2010, 18 (2): 434-447.
- [30] J. pan, Y. T. Hou, L. Cai. Topology control for wireless sensor networks[C]. ACM MobiCom, California, 2013: 286-299.
- [31] Zhang W, Xue G, Misra S. Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks: Problems and algorithms[C]//INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. 2007: 1649-1657.
- [32] Roh H T, Lee J W. Joint relay node placement and node scheduling in wireless networks with a relay node with controllable mobility[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2014, 12 (8): 699-712.
- [33] 王丙元, 张心清. 基于能量均衡的助航灯光单灯监控 WSNs 路由协议[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47 (4): 526-531.
- [34] 郭小琴, 孙毅刚, 陈维兴. 机场场面无线传感器网络监控系统关键技术研究[J]. 网络与通信技术, 2009, 30 (22): 5106-5108.
- [35] 薛明, 高德民. 无线传感器网络最大生命期聚合树路由算法[J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (1): 130-133.
- [36] 崔素辉, 陈光亭, 李茹雪. 三维无线传感器网络的中继器放置问题[J]. 杭州电子科技大学学报, 2010, 30 (2): 81-84.
- [37] 张艳维. 无线传感器网络中位置受限的中继器放置问题[D]. 杭州电子科技大学, 2013: 35-40.
- [38] 陆克中, 陈国良, 冯禹洪, 等. 无线传感器网络最小中继节点布置问题的近似算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 11: 2-4.
- [39] 陈瑜, 张铁民, 孙道宗. 基于无线传感器网络的设施农业车辆定位系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 30 (10): 26-28.
- [40] Zhang S, Zhang H. A review of wireless sensor networks and its applications[C]//Automation and Logistics (ICAL), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012: 386-389.
- [41] M.A.Matin, M.N.Rahman. Lifetime improvement of wireless sensor

- network[C], 2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), 2011: 475-479.
- [42] Yang Y, Blum R S, Sadler B M. Energy-efficient Routing for Signal Detection in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, (6): 2050-2063.
- [43] Yahya B, Ben-Othman J. REER: Robust and Energy Efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. Proceeding of 2009 IEEE Global Telecommunications Conference, Honolulu, United States, 2009: 1-7.
- [44] 林敏敏. 无线传感器网络异构节点部署的研究[D]. 广州: 中山大学学位论文, 2010: 1-20.
- [45] 唐克, 谢保军, 卢金星. 基于蒙特卡罗的无线传感器网络战场目标定位模型[J]. 兵工自动化, 2011 (4): 31-35.
- [46] 邓鑫, 张乐君. 无线传感器网络可生存性增强技术研究概述[J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (1): 1-10.
- [47] 杨紫, 陈明锐, 沈重. 基于神经网络的 WSN 森林火灾预测与定位研究[J]. 计算机仿真, 2015, 11 (3): 23-29.
- [48] 邓昀, 程小辉. 智能灌溉系统的无线传感器网络设计[J]. 自动化仪表, 2012, 34 (2): 80-83.
- [49] Xi Y F, Yeh E M. Node-Based Optimal Power Control, Routing, and Congestion Control in Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 54 (9): 4081-4106.
- [50] 刘恒, 何光耀. 无线传感器网络应用于医疗领域的展望 [J]. 信息与电脑, 2011 (7): 80-81.
- [51] Yang Dejun, Misra Satyajayant, Fang Xi, et al. Two-Tiered Constrained Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks: Efficient Approximations[C]. 2014 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2014: 1-9.
- [52] 何蓉, 陈东义, 韩露. 基于 WSN 的工业设备运行状况监控平台的研究[J]. 电子科技大学学报, 2013 (41): 19-23.
- [53] 袁浩浩, 蒋联源, 张联盟. 基于 WSN 的冷链物流监控溯源系统[J]. 物流技术, 2014 (22): 51-59.
- [54] Dae-Man Han, Jae-Hyun Lim. Design and implementation of smart home energy management systems based on zigbee. IEEE Transactions on Consumer Electronics , 2010 (37): 1-9
- [55] 孔英会, 高育栋. 面向智能家居的实时数据处理技术研究[J]. 测控技术.

2016 (04): 63-69.

- [56] Branch J W, Giannella C, Szymanski B, et al. In-network outlier detection in wireless sensor networks[J]. Knowledge and information systems, 2013, 34 (1): 23-54.
- [57] 肖骁, 袁家斌, 王雪. 适用于机场噪声感知的改进 ZigBee 路由算法[J]. 小型微型计算机系统, 2016, 30 (2): 35-37.
- [58] 《民用航空运输机场安全保卫设施建设标准》(MH/T7003-2008) [S].
- [59] S.Dulman, T. Nieberg, J. Wu. Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks[C]. 2013 9th Wireless Communications and Networking (WCNC), 2013: 1918-1922.

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

（一）发表的学术论文

- [1] 董梦梦，王翥. 面向机场环境监测的 WSN 组网技术的研究[J]. 江苏大学自然科学版. （已录用）

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《面向机场环境监测的 WSN 组网技术的研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果，且学位论文中除已标注引用文献的部分外不包含他人完成或已发表的研究成果。对本学位论文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。

作者签名：董梦梦

日期：2016年6月20日

学位论文使用授权说明

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

(1) 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，并向国家图书馆报送学位论文；(2) 学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；(3) 研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名：董梦梦

日期：2016年6月20日

导师签名：王磊

日期：2016年6月20日

致 谢

在论文完成之际，谨向在本人攻读硕士学位期间给予我指导、关心、支持和帮助的老师、同学、朋友和亲人们致以衷心的感谢！

首先，衷心地感谢我的导师王翥教授。感谢王老师这两年多以来在学习和研究上给予我的指导和帮助。在两年多的时间里，王老师不仅传授给我做科学研究和钻研问题的方法，更重要的是他正直的人品、严谨的治学态度和忘我的工作精神时时刻刻都在潜移默化的教育我如何做人、做事和做学问。在此，对王老师给予我学习和生活上的帮助与关怀表示衷心的感谢。

其次感谢 14 级仪器科学与技术专业的同学们在撰写论文时的支持帮助。同学们在研讨及学习中，真诚的与我分享他们的研究经验。在我困惑时，他们能及时的提出解决意见，这些宝贵的意见使我顺利完成课题及论文撰写。同时还要感谢好朋友们的陪伴，她们在我学习之余与我一起谈人生理想，谈生活趣事，让研究生生活更加丰富多彩。

最后要感谢父母在我人生的每一个阶段都陪伴和支持着我，谢谢爸爸妈妈一如既往的懂我和疼爱我，给了我良好的家庭教育和生活条件。在人生的下一阶段，我会用更优秀的成绩、更多的陪伴和关怀来回报他们。