图示

低可信度描述已自动生成

**本科毕业设计（论文）**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 题目 | 基于比幅法和相位干涉仪 | | |
| 融合的无源测向与定位算法研究 | | |
| 学院 | 电子信息与电气工程学院 | | |
| 专业 | 通信工程 | | |
| 学生姓名 | 胡尧文 | | |
| 学号 | 201810428214 | 班级 | 2018级2班 |
| 指导教师 | 罗正华 | 职称 | 副研究员 |
| 完成时间 | 2022年4月1日 | | |

原创性声明

本人郑重声明：本人所呈交的毕业设计（论文），是在指导老师的指导下独立进行研究所取得的成果。毕业设计（论文）中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 日 期：

关于使用授权的声明

本人在指导老师指导下所完成的毕业设计（论文）及相关的资料（包括图纸、试验记录、原始数据、实物照片、图片、录音带、设计手稿等），知识产权归属成都大学。本人完全了解成都大学有关保存、使用毕业设计（论文）的规定，本人授权成都大学可以将本毕业设计（论文）的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本毕业设计（论文）。如果发表相关成果，一定征得指导教师同意，且第一署名单位为成都大学。本人离校后使用毕业设计（论文）或与该论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为成都大学。

论文作者签名： 日 期：

指导教师签名： 日 期：

基于比幅法和相位干涉仪融合的无源测向与定位算法研究

专业：通信工程 学 号：201810428214

学生：胡尧文 指导教师：罗正华

摘要：

近年来，电磁频谱环境愈加恶劣，出现了不少“非合作”信号，这些信号将对电磁环境产生严重的干扰，甚至是违法犯罪行为。本文以“非合作”无人机为例，重点介绍无人机在重点区域，如机场等环境下的测向与定位方法。由于环境的特殊性，使用了无源雷达来进行探测，但无源探测中的精度始终不及有源雷达，它的性能也决定最终的探测结果，因此使用深度学习的方法进行信息融合称为了较为普遍的解决方案。

本文结合以上背景，对比幅法测向、相位干涉仪测向及到达角度(Angle of Arrival, AOA)定位方法进行了研究。并结合了信息融合技术，从而有效提高了定位精度。

本文的前四章介绍了比幅法测向、相位干涉仪测向，AOA定位的方法和原理。在这些基础上我们已经能够给出信源的位置信息，但其精度还是稍差。在本文后半部分，介绍了神经网络的基础内容，以及使用信息融合技术优化比幅法测向、相位干涉仪测向的结果，从而提升精度的方法和原理。最后一章使用了FPGA和Python进行了各个部分的仿真及实验验证。

其中，在比幅法测向部分，我们提出了使用查表法进行处理，克服了比幅法测向的一些缺点。在这个过程中，本文使用了最近邻（k-Nearest Neighbor, KNN）的思想，通过寻找最近解来提高精度。在相位干涉仪测向部分，我们提出了与常规频域鉴相不同的时域鉴相，虽然其对信号有一定要求，但它的精度能有显著的提升。

综上所述，本文对无人机的无源探测中主流的比幅法测向、相位干涉仪测向及AOA定位进行了研究及改进，并完成了不同算法得到的方位角的信息融合，进一步提升了精度。

关键词：无源探测；比幅法；相位干涉仪；到达角度；信息融合

**Research on Passive Direction Finding and Positioning Algorithm Based on the Fusion of** **Amplitude Ratio Method and Phase Interferometer**

Major：Communication Engineering Student ID：201810428214

Student：Hu Yaowen Instructor：Luo Zhenghua

**Abstract:**

In recent years, the electromagnetic spectrum has become increasingly hostile and several 'non-cooperative' signals have emerged that can cause serious interference to the electromagnetic environment and even criminal offences. In this paper, we take the example of 'non-cooperative' UAVs and focus on the method of direction finding and positioning of UAVs in key areas such as airports. Due to the specificity of the environment, passive radar is used for detection, but the accuracy of passive detection is always inferior to that of active radar and its performance determines the final result, so the use of deep learning methods for information fusion is a more common solution.

This paper combines the above background with a study of the amplitude ratio method, phase interferometer and angle of arrival (AOA) positioning methods. Information fusion techniques are also incorporated to improve positioning accuracy.

In the first four chapters of this paper, the methods and principles of the amplitude ratio method and phase interferometry, and AOA positioning are presented. Based on these we have been able to give the position information of the signal source, but its accuracy is still slightly poor. In the second half of the paper, the basics of neural networks are presented, as well as the methods and principles of using information fusion techniques to optimise the results of amplitude ratio and phase-interferometer measurements and thus improve the accuracy. In the last chapter, simulations and experimental validation of each part are carried out using FPGA and Python.

In this section, we propose the use of the look-up table method to overcome some of the drawbacks of the amplitude ratio method. In this process, the idea of k-Nearest Neighbor (KNN) is used to improve the accuracy by finding the nearest solution. In the phase interferometer section, we propose a time-domain phase detector that is different from the conventional frequency-domain phase detector, although it has some requirements on the signal, its accuracy can be significantly improved.

In summary, this paper investigates and improves the mainstream amplitude ratio method of direction finding, phase interferometer direction finding and AOA positioning in the passive detection of UAVs, and completes the information fusion of azimuths obtained by different algorithms to further improve the accuracy.

**Key words：**Passive Detection; Amplitude Ratio method; Phase Interferometer; Angle of Arrival; Information Fusion

**目 录**

[1 绪 论 1](#_Toc99405600)

[1.1 研究背景与意义 1](#_Toc99405601)

[1.2 国内外发展和研究现状 2](#_Toc99405602)

[1.2.1 国内外无源定位技术发展和研究现状 2](#_Toc99405603)

[1.2.2 国内外神经网络信息融合技术发展和研究现状 3](#_Toc99405604)

[1.3 本文主要研究内容 4](#_Toc99405605)

[2 比幅法测向方法研究 5](#_Toc99405606)

[2.1 比幅法测向方法 5](#_Toc99405607)

[2.2 比幅法测向原理 5](#_Toc99405608)

[2.3 比幅查表法测向 7](#_Toc99405609)

[2.3.1 *K*NN分类器 7](#_Toc99405610)

[2.3.2 *K*NN比幅查表法 8](#_Toc99405611)

[2.4 测试与分析 9](#_Toc99405612)

[3 相位干涉仪测向方法研究 12](#_Toc99405613)

[3.1 一维相位干涉仪测向原理 12](#_Toc99405614)

[3.2 鉴相技术 13](#_Toc99405615)

[3.2.1 频域鉴相 13](#_Toc99405616)

[3.2.2 时域鉴相 14](#_Toc99405617)

[4 到达角度定位方法研究 16](#_Toc99405618)

[4.1 AOA双站定位原理 16](#_Toc99405619)

[4.2 直角坐标系与WGS-84坐标系转换算法研究 16](#_Toc99405620)

[4.3 AOA多站定位原理 16](#_Toc99405621)

[5 深度神经网络研究 17](#_Toc99405622)

[5.1 人工神经网络 17](#_Toc99405623)

[5.1.1 感知器 17](#_Toc99405624)

[5.1.2 激活函数 17](#_Toc99405625)

[5.1.3 损失函数 17](#_Toc99405626)

[5.1.4 优化器原理 17](#_Toc99405627)

[5.2 深度神经网络 17](#_Toc99405628)

[5.2.1 BP神经网络 17](#_Toc99405629)

[5.2.2 卷积神经网络 17](#_Toc99405630)

[6 比幅法与相位干涉法信息融合研究 18](#_Toc99405631)

[6.1 信息融合的方法 18](#_Toc99405632)

[6.2 神经网络的选择 18](#_Toc99405633)

[6.3 神经网络的设计 18](#_Toc99405634)

[6.4 结果分析 18](#_Toc99405635)

[7 系统设计与验证 19](#_Toc99405636)

[7.1 比幅法测向系统设计与验证 19](#_Toc99405637)

[7.1.1 测向站设计 19](#_Toc99405638)

[7.1.2 定标-查表 19](#_Toc99405639)

[7.1.3 归一化 19](#_Toc99405640)

[7.1.4 测试结果 19](#_Toc99405641)

[7.2 相位干涉仪系统设计与验证 21](#_Toc99405642)

[7.2.1 系统硬件平台 21](#_Toc99405643)

[7.2.2 系统软件平台 25](#_Toc99405644)

[7.3 到达角度定位系统设计与验证 27](#_Toc99405645)

[7.4 比幅法与相位干涉法信息融合系统设计与验证 27](#_Toc99405646)

[8 参考文献 28](#_Toc99405647)

[9 致 谢 29](#_Toc99405648)

# 绪 论

## 研究背景与意义

当前，随着科学技术的发展，无线电技术也蒸蒸日上。在无线电频谱资源分配上，国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)规定9KHz~3000GHz的电磁频谱为无线电频谱[1]，其中部分频段，如ISM(Industrial Scientific Medical)频段，操作者无需许可证便可在此频段上发射信号，因此给不法分子以可乘之机[2]。同时，据报道截至2018年底，我国业余电台操作证书累计核发总数约为14.14万份[3]。“非合作”信源的滥用带来的安全隐患主要体现在以下几个方面：

1. 犯罪活动

随着广播的不断发展，一些不法分子也开始利用广播信号进行非法宣传、传播有害信息等。

2018年，李某、陈某与苏某招揽业务、改善经营，非法架设安装广播电台10台，播放医疗广告。经天津市工业和信息化委员会检测认定，这些电台均属于未经批准设置的无线电广播电台。最终，法院判处三人有期徒刑一年二个月到二年六个月不等，并处罚金5000元到10000元不等。

1. 高科技作弊

国家教育考试目前已成为提升学历的最主要途径，然而不法分子通过捷径为考生提供非法服务。

2021年5月30日，湖北省无线电监测中心咸宁市管理处技术人员在考试进行中监测到异常信号，经分析为考场作弊信号，并通过相关技术手段定位信源位置，公安民警查获作弊器材1套，同时抓获作弊嫌疑人员1名。

1. 民航安全

机场属于重点区域。“黑飞”无人机不仅会产生干扰信号还可能会直接与飞机相撞，严重影响飞行安全。

2017年1月5日，莫桑比克LAM航空公司的一架飞机执行从莫桑比克首都Maputo市到Tete市的TM-136航班，在接近Tete市时与一架无人机相撞，所幸最后飞机安全落地，但雷达罩严重受损。同年4月，成都双流机场遭遇多次无人机闯入机场事件，导致多架次航班备降、返航。

目前公民使用不同频段发射信号的准入门槛逐渐降低，且如无人机等搭载可移动的信源的设备也唾手可得，这些都是未来有关部门监管的重难点。但目前“非合作”信源以及无人机的体积小、隐蔽性高、危害大，若缺乏有效的技术手段，将对我国信息域及社会安全带来严重隐患，因此研制出一种针对“非合作”信源或携带信源的“非合作”设备的监管方法迫在眉睫。本文将主要以携带信源的“非合作”无人机为对象进行研究。

## 国内外发展和研究现状

### 国内外无源定位技术发展和研究现状

无源定位区别于有源定位。有源定位常常使用雷达，通过自身发射的电磁波获取目标信源位置信息。雷达利用接收回波，提取参数并解算出目标的距离、方位、高度等信息。无源定位使用的无源雷达，它仅有接收机，通过不断接收信源发出的信号，来解算其位置信息。其相对于有源定位相比，具有以下优势：

1. 无电磁干扰

有源雷达自身会发出电磁波，因此可能会干扰辐射范围内的其他设备，而无源雷达则不会，其仅有一套接收机用于接收来波信号。与有源雷达相同，无源雷达也不受雨、云和雾的影响，能全天时工作[4]。适合部署在重点区域如机场或复杂战场环境等。

1. 频段覆盖广

本文设计的无源定位系统能覆盖70MHz至6.0GHz范围，覆盖绝大部分无人机通信频段。

其余无源定位还具有覆盖范围广、系统体积小、成本低廉等优势[5]。因此本文设计的定位系统也将采取无源定位。

#### 国外现状

早在20世纪60年代，国外已开始针对无源定位技术开始系统性研究，目前已取得长足的发展[6]。战场中，为了快速地、隐蔽地获得目标位置信息，美军十分重视无源定位技术的研究[7]。据已知公开报道，美国的主要研究成果有：基于 F-22 战斗机平台的编队无源组网多站定位系统、精确打击与定位系统(Precise Location and Strike System, PLSS)、先进的战术瞄准技术(Advanced Tactical Targeting Technology, AT3) 和基于网络中心的瞄准系统(Net-work-Centric Collaborative Targeting, NCCT)等。

其中，先进战术目标瞄准技术(AT3)针对机动防空系统开发的技术，目的是将各打击平台联网，同时定位多台雷达发射机。其利用时差、频差信息进行多站无源定位，通过数据链使得各定位站共享探测数据，协同工作，能对敌雷达发射机进行精确定位，能在在80公里外将目标锁定在50米范围之内[8]。

2020年，罗德与施瓦茨公司(Rohde & Schwarz, R&S)研发了四套用于无人机反制的系统：R&S®ARDRONIS-I/D/R/P分别用于无人机的探测、测向、干扰以及保护。其中ARDRONIS-D测向系统使用R&S®ADDx 多通道测向天线，它通过携带的无源天线来接收“黑飞”无人机发出的信号，并通过AOA定位算法来确定目标的位置信息[9-10]。

#### 国内现状

国内对于无源定位的应用主要在于战场环境，研究起步较晚，上世纪80年代开始进行理论研究[11]。近年来，中国电科14所利用到达时间差（Time Difference of Arrival, TDOA）和测向技术研制了YLC-20双站无源定位系统，能对目标信源进行定位。中电29所研制的基于TDOA的DWL002无源定位系统，其便携性强，体积下，因此备受关注。猎航电子在2019年上市的“探翼者”TYZ-106具备无源定位技术，能实现对无人机的被动探测、测向、识别与定位。

综上所述，在信源定位尤其是无人机无源定位领域，无源定位与传统有源定位大致相当，但无源定位近年来发展迅速，以其巨大的优势：无电磁发射，隐蔽性好以及比幅法（Amplitude Ratio Method, ARM）、相位干涉法测向以及TDOA定位算法的加持，为信源定位提供了新的解决思路与办法。

### 国内外神经网络信息融合技术发展和研究现状

信息融合是各数据领域使用的一种主流优化算法，其中又以神经网络作为最主要的优化手段[12]。得益于现在硬件算力的不断提升加之算法性能提升，机器学习（Machine Learning, ML）中的深度学习（Deep Learning, DL）得以大放光彩。通过这些措施使得机器能够像人类般通过直觉解决问题，这被称之为人工智能（Artificial Intelligence， AI）。人工智能发展至今，产生了三次浪潮：上世纪五十年代，人工智能首次被提出，这是第一次浪潮；30年后，第二次浪潮来临，计算机技术的发展赋予了计算机的机器思维；上世纪末期至今依旧是深度学习带来的浪潮[13]。

#### 国外现状

通过基于神经网络的信息融合技术来优化多种定位算法的结果，以达最优的估计值，是可行的。国外部分研究机构和高校也做了研究。2005年，巴西坎皮纳斯大学的C. A. M. Lima运用最小二乘支持向量机的方式对多天线信号波到达角进行预测分析，并对底层函数进行了优化；2019年，韩国九州大学的J. Cho 在TDOA定位中使用了机器学习，利用低功耗的LoRa并采用了DNN优化了TDOA中的定位结果，对列车到达时间进行校正。

#### 国内现状

目前，国内已有少量高校及研究所开始进行研究。2006年，哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院的刘梅等人通过数据聚类和弹性网络优化并过滤掉了无源定位中的虚假点，提高了正确率[16]；2015年，北京理工大学的王阳提出了TDOA-AOA联合定位算法，利用序贯融合的方法将联合算法所得到的目标位置信息进行数据融合，提高对目标的跟踪精度[17]；2020年，郑州轻工业大学的苏虹通过对传感器获得的方位数据做滤波处理和基于聚类复合弹性神经网络的关联优化，获得了不同时间段准确的目标角度信息[18]。这些都是近年来基于神经网络的无源定位系统的应用，目前也都取得了一定的发展。

## 本文主要研究内容

本文将承载无人机。讲述如何通过无源雷达，测向并定位“黑飞”无人机以获取其位置信息。

目前，针对无人机的无源定位系统，其技术路线主要有：相位干涉仪、比幅法、TDOA、FDOA等。本设计将使用相位干涉仪以及比幅法两种方法。对于信息融合，目前的应用场景中大多使用神经网络优化法。本设计旨在优化传统相位干涉法以及比幅法中定位精度、定位速度等方面。具体内容如下：

第二章，主要介绍比幅法测向原理。其中主要利用了*K*NN思想来作为来波方位与信号功率的匹配算法，同时介绍了原始数据库的建立方法，以及实际运用中的匹配过程。

第三章，主要介绍相位干涉仪的工作原理。并通过相位干涉仪中的核心——鉴相技术，分别说明了频域鉴相和时域鉴相的原理、区别及其优劣。

第四章，主要介绍定位方法。将列举多个主流的定位方案，并着重介绍AOA定位算法原理以及AOA多站定位原理及其应用场景。

第五章为神经网络的理论部分，将介绍神经网络的基础原理和实现方法。

第六章，为本文的核心部分。将讲述信息融合的原理及方法、信息融合神经网络的优化方案。重点介绍利用神经网络对比幅法和相位干涉仪测向结果的信息融合过程。

# 比幅法测向方法研究

比幅法测向是一种简单稳定且高效的无源测向技术，适用于对无人机的测向。它通过多通道接收无人机信号，计算信号功率从而判断出来波方向，从来得到无人机的角度信息。

## 比幅法测向方法

无源定位系统由无源天线，接收机以及解算平台构成。比幅法无源测向系统通过特定设计的天线阵列来接收波束，并提取多个通道接收到的信号功率差异，利用其特征值来解算出来波方向。

比幅法无源系统架构如图 2.1所示。此图以四天线阵列为例，在实际应用中也可见天线数量为6或者8阵列系统。随着天线数量的增多，其测向精度也会提高。当天线接收到来波信号，测向系统便开始工作。首先经过带通滤波器（Bandpass Filter, BPF），获取指定频率的无人机信号；再利用放大器将信号放大；最后将信号解调，送入解算平台进行测向。在测向过程中，通过求得不同通道信号功率的比值，而此比值中便包含了来波的方位角信息。



图 2.1 比幅法无源测向系统（4天线阵列）

## 比幅法测向原理

本设计以四天线阵列为例。比幅法测向的原理是：用四个独立的无源天线。，对同一信源发出的信号来说，总会有一个通道会接最大的功率，相应的总有一个通道会接收到最小的功率，通过比较几对信号之间的包络幅度相对大小，从而确定来波的方位角。

天线一般由不同的方向函数，通常含有正余弦函数或高斯函数[19]，此处为了简化运算与分析过程，我们假设天线的方向图函数为高斯函数，即存在。可知：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.1） |

式（2.1）中，是常数，表示来波方位角与天线的最大夹角，表示波束宽度如图 2.2所示：



图 2.2比幅法相邻天线波束示意图

我们把相邻天线的夹角记为。当来波的入射线处于相邻两天线间任意位置时，来波方位角与两天线的夹角分别是和，其中表示入射线与两天线中心线的夹角。那么，对应的两通道输出的信号功率、为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.2） |

式（2.2）中，和是两个通道的增益，此处假设。我们令，则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.3） |

移项后带入可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.4） |

又因为的物理意义是两通道接收信号的功率比值，那么在已知和的情况下，只要知道了，便可利用式（2.4）求得来波的方位角。

## 比幅查表法测向

比幅法测向原理较为简单且稳定，易于实现。但在实际工程中，系统经常受到通道一致性差及其他因素的影响。因此，本项目设计了一种基于*K*NN的比幅查表法测向。它通过预置定标表来克服上文提到的影响。

比幅查表法测向的具体流程是:

1. 将已知方位的信号输入解算平台，并将各个角度下各个通道功率及其特征值存储到本地，此过程为定标；
2. 将未知方位的信号输入解算平台，系统将判断各个通道功率及其特征值与哪一组最为接近，取其角度为此信号的方位角，此过程为查表；
3. 重复步骤2（查表）。

### *K*NN分类器

数据分类是数据挖掘领域中一种重要的技术手段，它能从一组已知的学习样本中寻找分类模型，并使用此模型来预测待分类样本[20]。近邻法（Nearest Neighbor, NN）是模式识别的非参数方法中最重要的方法之一，近邻法的一大特点是，每个类别的所有样本点都被用作“代表点”[21]。其结果是训练样本所属的类别。*K*NN是1NN的推广，即选择*x*的*k*个最近邻，这*k*个最近的邻居中的大多数属于*x*所属的类别。

它的分类流程如下图 2.3所示：



图 2.3*K*NN分类流程

*K*NN的基本数学原理如下：在学习样本中，对所有样本求平均，平均值可代表此类别，则第*i*类别的平均值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.5） |

式（2.5）中，表示第*i*类别样本的总数，表示第*i*类别样本的集合，表示样本总数。

对于样本之间的距离来说，我们一般取欧氏距离，它的定义是：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.6） |

式（2.6）中，。

### *K*NN比幅查表法

#### 定标

在前文中，我们已描述了比幅查表法的主要流程。首先需要通过“定标”确定好一张“角度-各通道幅值”表作为学习数据。该表需要通过不断获取当前环境的实时采集数据来进行迭代，其表内数据如表 2.1所示：

表 2.1定标数据表（以四通道为例）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 方位角 | 通道1幅值 | 通道2幅值 | 通道3幅值 | 通道4幅值 |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

其中，表示信号在角度下通道接收到的幅值。

在实际的定标过程中，以天线阵列几何中心为原点，将信号源以同一高度同一半径画半圆，接收机仅保存来波方位角为的信号数据，在后续的处理过程中，将取得的数据，平均分配到上，所以当接收到的数据总量越多，那么分配到每上的数据量就越多，则角度分辨率越高。

#### 查表

在获得足够量的定标数据后，我们可以利用定标的表格进行“预测”，此过程称为查表。在使用比幅查表法进行测向时，接收机将接收到的四路幅值进行处理，运用*K*NN的思想，计算当前四路幅值与表内每一组数据的距离，算法如式（2.7），这里我们以4通道，定标表中有180组数据为例，表示信号在角度下通道接收到的实时幅值，即为未知的来波方位角。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.7） |

将计算得到的180个距离存储到一个数组里，最后我们选取距离最短的一组所对应的角度，为输出的方位角，如式（2.8）。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.8） |

## 测试与分析

本文提出的比幅查表法具有测向速度快、测向精度高等特点。本小节以实际工程测试为例，具体说明比幅查表法的测试结果与结果分析。

我们选择一处电磁环境较好的开阔场地，布置特定的天线阵列，如图 2.4所示，其中，信号方位角在之间时，天线1接收功率最大；信号方位角在之间时，天线2接收功率最大；信号方位角在之间时，天线3接收功率最大；信号方位角在之间时，天线4接收功率最大。



图 2.4比幅查表法天线阵列示意图（以四通道为例）

测试无人机从以一不变高度、不变半径匀速飞半圆，至时接收机停止接收信号。如此往复此过程即可定标。为了提高查表索引速度，我们使用了MySQLTM作为数据库，用于存储定标数据。最终的定标数据表如图 2.5所示（在Navicat中呈现）。

查表时，测试无人机依旧按以上飞行程序运动，通过整套系统的计算最终的测向结果如图所示。

从测试结果中，图中上副图为“幅值-时间”图，下副图为“方位角-时间”图。图 2.6的测试结果较为理想，四通道一致性优秀，幅值和方位角均较理想。而图 2.7的1通道增益较高，一致性不如前者，但输出的方位角依旧比较理想，说明此方法具有良好的环境兼容性。

![图形用户界面, 表格

中度可信度描述已自动生成]()

图 2.5在Navicat中呈现的最终定标数据表

图表, 折线图

描述已自动生成

图 2.6比幅查表法测试结果1

图表, 折线图

描述已自动生成

图 2.7比幅查表法测试结果1

# 相位干涉仪测向方法研究

相位干涉仪是一种经典的测向方式，此方法通过计算在同一基线上不同位置的天线的相位差来确定来波的方位角。它具有测向精度高、算法简单等优点[22]。

由于信号在被相隔一定距离的天线同时接收后，会产生一个相位差，通过此相位差，以及其他的信号特征可以计算出时间差，从而解算出来波的方位角。当天线的距离较近时，可能会因为较小的相位差导致较大误差，同时也可能存在模糊解的情况。相位干涉仪主要有一维干涉仪测向和二维干涉仪测向。

## 一维相位干涉仪测向原理

一维单基线相位干涉仪的原理结构如下图 3.1所示：



图 3.1一维单基线相位干涉仪原理结构图

图 3.1中共有两个接收天线，其间距为；与平行，均为信号来波；表示来波方位角，。

我们认为同一信源发出的信号在到达接收天线时，是平行的。因此相位差的产生来自于其路程的差异。可假设两路信号为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.1） |
|  |  | （.2） |

这两路信号的路程差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.3） |

由于信号的电磁特征是已知的，根据式（3.1）、式（3.2）和式（3.3）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.4） |

式（3.4）中，表示相位差，表示信号波长，即为所求的信号来波方位角。由于此算法只能解算出相位差位于范围内的信号，当相位差值大于该范围时，需要对信号相位进行解模糊处理。

## 鉴相技术

相位干涉仪测向主要分为三个步骤：利用鉴相器求出相位及相位差、对相位差解模糊、带入式（3.4）求解方位角。首先，我们假设基线长度足够小，未产生相位模糊。在以上三个步骤中，其核心技术为鉴相技术，它也是解算出方位角的基础。鉴相技术的方案主要有频域鉴相和时域鉴相，本节将分别阐述它们的原理及优缺点。

### 频域鉴相

频域鉴相是利用快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform, FFT）将被测信号置于频域的角度去计算其相位，因此又称为FFT法[23]。

由于信号的频点的傅里叶变换含有其相位信息，可通过其实、虚部求出。最后通过减法器求得其相位差。FFT是离散傅里叶变换（Discrete Fourier Transform, DFT）的快速算法，利用蝶形运算加速，DFT的主要原理是：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.5） |

由式（3.5）可知，

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.6） |

式（3.6）中，，，为FFT的长度。在此我们假设信号的频率是已知的，那么信号中心频点的值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.7） |

式（3.7）中，为FFT的长度，为信号的频率，为采样频率。所以信号、的相位分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.8） |

式（3.8）中，值可通过式（3.7）求得。相位差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.9） |

还有一种频域鉴相技术可直接计算出两信号的相位差，这里进行简要介绍[22]。其与前者的区别在于，首先要将两信号进行频域共轭相关：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.10） |

式（3.10）中表示取共轭的运算，再使用式（3.7）求出值，最后直接求出两信号的相位差：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.11） |

### 时域鉴相

和频域鉴相方法类似，时域鉴相也是测量相位信息，但后者是在时域上进行提取。假设有两个通道的天线来接收信号并测向，第一、二路天线接收并经过解析变换后的雷达信号分别为和，且为常规时域信号。

信号会因为到达两个通道的路程的差异而产生相位差，其中我们假设信号较先到达，信号滞后，信号周期。由于我们处理的信号为数字信号，因此我们在可以和上画出其周期、1/2周期及1/4周期，当时，，不会产生相位模糊的情况，也无需解模糊。把每一个时刻的信号看作一个“帧”，通过找到两个信号的“关键帧”所在的时刻，反推出两个信号的相位差。取信号的“上升沿”为其“关键帧”，此处的“上升沿”是指信号幅值由负到正的“帧”，这一时刻的信号正好跨过零点，因此将此方法称为“过零法”。如图 3.2，的零点为15，的零点为9（标红处），那么这两个信号的相位差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.12） |

式（3.12）中，为的零点值，为的零点值，为信号周期，为信号频率。上例中，。



图 3.2 和的时域图

# 到达角度定位方法研究

AOA定位，主要是通过多个测向站点的到达角度来测算出目标的位置信息，其位置信息可以是直角坐标系也可以是WGS-84坐标（World Geodetic System - 1984 Coordinate System）。该方法只需两个站点即可给出目标的位置信息。其定位原理如所示，



图 4.1 AOA定位原理示意图（以双站为例）

如图 4.1所示，表示两个测向基站之间的距离，和分别是两个测向基站获得的信号方位角，其交点便是目标的位置。

## AOA双站定位原理

占位内容

## 直角坐标系与WGS-84坐标系转换算法研究

## AOA多站定位原理

占位内容

# 深度神经网络研究

## 人工神经网络

占位内容

### 感知器

占位内容

### 激活函数

占位内容

### 损失函数

占位内容

### 优化器原理

占位内容

## 深度神经网络

占位内容

### BP神经网络

占位内容

### 卷积神经网络

占位内容

# 比幅法与相位干涉法信息融合研究

## 信息融合的方法

占位内容

## 神经网络的选择

占位内容

## 神经网络的设计

占位内容

## 结果分析

占位内容

# 系统设计与验证

## 比幅法测向系统设计与验证

本文提出的比幅查表法具有测向速度快、测向精度高等特点。本小节以实际工程测试为例，具体说明比幅查表法的测试结果与结果分析。

### 测向站设计

我们选择一处电磁环境较好的开阔场地，布置特定的天线阵列，如图 7.1所示，其中，信号方位角在之间时，天线1接收功率最大；信号方位角在之间时，天线2接收功率最大；信号方位角在之间时，天线3接收功率最大；信号方位角在之间时，天线4接收功率最大。



图 7.1 比幅查表法天线阵列示意图（以四通道为例）

### 定标-查表

测试无人机从以一不变高度、不变半径匀速飞半圆，至时接收机停止接收信号。如此往复此过程即可定标。为了提高查表索引速度，我们使用了MySQLTM作为数据库，用于存储定标数据。最终的定标数据表如图 2.5所示（在Navicat中呈现）。

查表时，测试无人机依旧按以上飞行程序运动，通过整套系统的计算最终的测向结果如图所示。

### 归一化

### 测试结果

从测试结果中，图中上副图为“幅值-时间”图，下副图为“方位角-时间”图。图 2.6的测试结果较为理想，四通道一致性优秀，幅值和方位角均较理想。而图 2.7的1通道增益较高，一致性不如前者，但输出的方位角依旧比较理想，说明此方法具有良好的环境兼容性。

![图形用户界面, 表格

中度可信度描述已自动生成]()

图 7.2在Navicat中呈现的最终定标数据表

图表, 折线图

描述已自动生成

图 7.3比幅查表法测试结果1

图表, 折线图

描述已自动生成

图 7.4比幅查表法测试结果2

## 相位干涉仪系统设计与验证

针对相位干涉仪测向系统，本设计进行了全链路仿真以验证其可行性，设计了基于Xilinx®ZYNQ®7020的验证平台。其系统框图如下图 7.5所示：



图 7.5 相位干涉仪验证平台

系统整体分为四大部分：信号产生端、前端、信号处理端以及个人电脑（Personal Computer, PC）端，图中，信号产生端用于模拟产生的信号，作为外界对系统的信号输入；输入的信号在前端处理部分被AD®9361采集并进行混频处理；之后在信号处理端进行测向解算；计算结果被发送至PC端上显示。

### 系统硬件平台

#### 信源

本平台使用的信号源为AS32-D20，它能够以433MHz频率发送功率为100mW的LoRa信号。该模块信号稳定，且使用了扩频技术因此传输距离远。采用射频芯片SX1278设计开发，LoRa扩频调制，TTL电平输出，大大提高了模块的抗干扰性和高稳定性。模块具有四种工作状态，并可以在运行时自由切换，在省电工作状态下，消耗电流极低，非常适合超低功耗应用。可使用AT指令进行配置，用户数据将通过SPI协议输入该模块，并通过天线发射。其实物图如图 7.6所示

图片包含 文本

描述已自动生成

图 7.6 AS32-D20实物图

#### 射频前端

本设计的前端使用了ADI公司的AD-FMCOMMS5平台。如图 7.7所示，AD-FMCOMMS5平台上布置了两颗AD9361芯片，共有4收4发共8通道。同时采用FMC接口与信号处理端相连。

卡通人物

中度可信度描述已自动生成

图 7.7 AD-FMCOMMS5平台实物图

得益于高速的FMC接口，射频平台能够轻松的交换大量数据，满足设计需求。

AD9361是一款高性能、高度集成的射频（RF）Agile Transceiver™捷变收发器，适用于3G和4G基站应用。该器件的可编程性和宽带能力使其成为各种收发器应用的理想选择。该器件将射频前端与灵活的混合信号基带部分和集成频率合成器结合起来，为处理器提供可配置的数字接口，从而简化了设计引入。AD9361接收器本地振荡器（Local Oscillator, LO）的工作频率为70MHz至6.0ssGHz，发射器LO的工作频率为47MHz至6.0GHz，涵盖大多数许可和免许可频段，支持从200 kHz以下到56 MHz的信道带宽。

由于发射频率为433MHz，根据奈奎斯特采样定律，至少需要866MHz的采样率才能保证采样信号不失真，而AD®9361最高可提供122.88MHz的采样率，故无法满足要求。因此需要先进行下变频处理，将基带信号下变频至中频信号。

假设基带信号为，其角频率为；载波为，其角频率为，根据傅里叶变换的性质可知：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （.1） |

根据式**错误!未找到引用源。**，信号的混频过程在频域上看会产生和频及差频信号，可以通过低通滤波器（Lowpass Filter, LPF）取得所需的差频信号。由此完成了下变频的工作，获得了处于中频的LoRa信号，便于AD®9361的采集，并将数据存储下来。

#### 信号处理端

信号处理端为本系统的核心部件，使用了基于赛灵思的FPGA（Field Programmable Gate Array）评估平台——ZC702。

ZC702评估套件的主要优势是它能够处理更复杂的数据，并专门为嵌入式使用进行了优化。该评估套件主要由FPGA部分和ARM Cortex-A9组成。FPGA部分被称为PL，双ARM Cortex-A9核心处理系统被称为PS。其系统架构图如图 7.8及图 7.9所示。

FPGA是除CPLD之外的大规模可编程逻辑器件的另一大类PLD器件。FPGA使用了可编程逻辑的形成方法，即可编程的查找表（Look Up Table, LUT）结构，LUT是可编程逻辑的最小构成单元。大部分FPGA采用基于静态随机存储器（Static Random-Access Memory, SRAM）的查找表逻辑形成单元，就是用SRAM来构成逻辑函数发生器。一个N输入LUT可以实现N输入变量的任何逻辑功能。

ARM Cortex-A9处理器是低功耗或受热限制的成本敏感型设备中的一个省电和受欢迎的高性能选择。

它目前正在为智能手机、数字电视、消费者和企业应用大量出货。与Cortex-A8处理器相比，Cortex-A9处理器的性能提高了50%以上。Cortex-A9处理器最多可以配置四个内核，在需要时提供峰值性能。可配置性和灵活性使Cortex-A9处理器适用于各种市场和应用。ARM Cortex-A9处理器是一个高性能、低功耗的ARM大单元，具有L1高速缓存子系统，提供完整的虚拟内存功能。Cortex-A9处理器实现了ARMv7-A架构，运行32位ARM指令、16位和32位Thumb 指令，以及Jazelle状态下的8位Java字节码。[24-25]

图示, 示意图

描述已自动生成

图 7.8 Zynq-7000系列Soc架构图

![图形用户界面

描述已自动生成]()

图 7.9ARM Cortex-A9架构图

#### PC端

PC端主要作为人机交互的桥梁，将操作者的命令传递给信号处理端或射频前端，同时将结果显示到PC端。

### 系统软件平台

图 7.10中，上半部分为PL（Programmable Logic）端，下半部分为PS（Processing System）端。PL端主要负责处理采集到的信号。存储在ROM中的实采信号，在收到PS端的Control信号协调后，将信号送往FFT模块中，用于鉴别出输入信号的相位。PS端通过创建AXI总线以及USART使得PS部分能够和PL以及PC进行通信。



图 7.10信号处理端框图

#### PL侧

1. 开发工具

ZC702评估套件隶属于APSoC架构，也就是PL加PS，同时具备两种计算模式的优势，赛灵思推出的相应编程套件（Software Development Kit, SDK）也为开发人员提供了较为完整的解决方案。

Vivado是FPGA厂商赛灵思在2012年发布的一个集成设计环境。它包括一个高度集成的设计环境和从系统到IC级的新一代工具，所有这些都建立在一个共享的可扩展数据模型和一个通用的调试环境上。它还是一个基于AMBA AXI4互连规范、IP-XACT IP封装元数据、工具命令语言（TCL）、Synopsys系统约束（SDC）和其他功能的开放环境，有助于根据开发者的需求定制设计流程并遵守行业标准。由赛灵思打造的Vivado工具结合了各种可编程技术，可扩展到1亿个等效ASIC门设计。本设计使用的是 Vivado 2018.2版本。

1. AXI协议

AMBA®AXI™协议支持高性能、高频率的系统设计。AXI协议适用于高带宽和低延迟的设计，它无需使用复杂的桥接器就能提供高频操作，能满足广泛的组件的接口要求，适用于具有高初始访问延迟的内存控制器，在实现互连架构方面提供了灵活性，同时与现有的AHB和APB接口向后兼容[26]。

1. Block Design

图形用户界面, 图示

描述已自动生成

图 7.11 Block Design

得益于Vivado的Block Design功能，我们可以像搭积木一样设计各个块之间的数据流动以及IP核的调用。如上图 7.11所示，输入有100Mhz的时钟信号、复位信号、FFT模块复位信号、延迟点信号；外部输出有两个端口分别为32位的“angle”和1位的“angle\_vaild”。其中PS侧的时钟信号，采用的是PL侧经过Clock Wizard锁相调频的时钟信号。在Block Design里信号大多是通过AXI协议进行流动的。

#### PS侧

1. 开发工具

赛灵思软件开发套件（Xilinx Software Development Kit, XSDK）是用于在赛灵思任何微处理器上创建嵌入式应用的集成设计环境。Zynq® UltraScale+ MPSoC、Zynq-7000 SoC和业界领先的MicroBlaze™软核微处理器。该SDK是第一个提供真正的同质和异质多处理器设计、调试和性能分析的应用IDE，它基于eclipse构建。本设计使用的是Xilinx SDK 2018.2版本。

1. 软件架构

在PS侧，我们首先需要对其进行初始化包括了平台初始化、GPIO初始化及串口初始化。接着，程序进入待命模式，等待数据输入，有数据输入时，便会将数据传入并通知PL侧，PL侧计算的结果返回给PS侧并将数据显示在PC上。PS侧软件流程如图 7.12所示。



图 7.12 PS侧软件流程

## 到达角度定位系统设计与验证

占位内容

## 比幅法与相位干涉法信息融合系统设计与验证

占位内容

# 参考文献

1. 屈斌. 无线电频谱监测管理系统研究[D]. 西安电子科技大学, 2007.
2. ITU-R. Handbook on National Spectrum Management[M]. Edition of 2015. ITU, 2015.
3. 陈平. 我国业余无线电业务发展现状分析[J]. 中国无线电, 2019, (12): 24-28.
4. 苗玉杰. 试析雷达信号处理系统的关键技术[J]. 电子世界, 2013, (11): 22-23.
5. 邹先雄. 无人机目标无源定位方法研究[D]. 电子科技大学, 2018.
6. 贾兴江. 运动多站无源定位关键技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2011.
7. Jiang W, Xu C, Pei L, et al. Multidimensional scaling-based TDOA localization scheme using an auxiliary line[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(4): 546-550.
8. 孙隆和. 网络瞄准及相关技术——瞄准和打击活动目标[J]. 电光与控制, 2005, (3): 1-5.
9. Rohde & Schwarz. R&S®ARDRONIS Product Brochure[DB/OL]. [2021-11-8]. rohde-schwarz.com.
10. Rohde & Schwarz. R&S® ADDx MULTICHANNEL DF ANTENNAS Product overview [DB/OL]. [2020-10-28]. rohde-schwarz.com.
11. 胡来招. 测向定位文集[M]. 电子工业部第二十九研究所, 1996.
12. 何亮. 基于神经网络融合的比幅法与TDOA测向[D]. 电信科学技术研究院, 2021.
13. 徐雷. 人工智能第三次浪潮以及若干认知[J]. 科学, 2017, 69(3): 1-5.
14. C. A. M. Lima, C. Junqueira, R. Suyama, F. J. Von Zuben and J. M. T. Romano. Least-squares support vector machines for DOA estimation: a step-by-step description and sensitivity analysis[C]//International Joint Conference on Neural Networks(IJCNN), IEEE, 2005.
15. J. Cho, D. Hwang and K. -H. Kim. Improving TDoA Based Positioning Accuracy Using Machine Learning in a LoRaWan Environment[C]//International Conference on Information Networking (ICOIN), IEEE, 2019.
16. 刘梅,权太范,姚天宾,等. 多传感器多目标无源定位跟踪算法研究[J]. 电子学报, 2006, (6): 991-995.
17. 王阳. 多平台无源定位及跟踪技术研究[D]. 北京理工大学, 2015.
18. 苏虹. 基于人工智能的多传感器多目标无源定位仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(9): 399-403.
19. 刘兴明. 高精度宽开比幅测向方法研究及工程实现[D]. 电子科技大学, 2003.
20. 桑应宾. 基于K近邻的分类算法研究[D]. 重庆大学, 2009.
21. Vladimir Vapnik. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. NY: Springer Verlag, 1995．
22. 田冰. 干涉仪测向系统研究[D]. 西安电子科技大学, 2015.
23. 郎杰,邹建彬,张尔扬. 基于FPGA的高精度相位差测量算法实现[J]. 现代电子技术, 2011, 34(21): 28-30, 33.
24. ARM®. ARM® Cortex™-A Series Programmer’s Guide[DB/OL]. [2014-1-22]. arm.com
25. ARM®. Cortex™-A9 Series Technical Reference Manual[DB/OL]. [2012-9-17]. arm.com
26. ARM®. AMBA® AXI™ and ACE™ Protocol Specification [DB/OL]. [2011-10-28]. arm.com

参考文献内容，不缩进，设置成字体：宋体，字号：五号，多倍行距1.25，段前、段后均为0行，取消网格对齐选项。

# 致 谢

占位内容