

学校编码：10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号：X2009222022

UDC \_\_\_\_\_

廈門大學

工 程 碩 士 學 位 論 文

基于民用辐射源的无源雷达系统研究  
Studies on Passive Radars System Based on Civilian  
Illuminator

钟 鸣

指导教师姓名：邓振森 副教授

专业名称：电子与通信工程

论文提交日期：

论文答辩时间：

学位授予日期：

答辩委员会主席：

---

评阅人：

年 月

厦门大学博硕士论文摘要库

# 厦门大学学位论文原创性声明

本人提交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日



# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密（ ），在年解密后适用本授权书。
2. 不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

## 摘要

随着战场环境的日益复杂，传统的主动雷达受到越来越多的威胁，已无法满足未来战争的需要。基于民用辐射源的无源雷达，利用民用辐射源信号作为照射源，靠被动接收目标的反射信号来探测目标，具有隐蔽性强，反隐身能力突出等优点，越来越受到重视。

本文对基于民用辐射源的无源雷达的定位精度、辐射源选择以及混合频率民用辐射源无源雷达的系统设计等方面做了深入研究，归纳起来，主要包括以下几个方面：

1. 介绍了民用辐射源无源雷达（Civilian-Illuminator-Based Passive Radar System, CIPRS）的概念和价值。回顾了民用辐射源无源雷达的发展历史和研究现状。

2. 简述了 CIPRS 的工作原理和关键技术，指出了目前这种系统在实际使用中存在的难题。

3. 研究了民用辐射源无源雷达的目标定位精度问题。分析了不同定位方法，不同定位体制以及不同站址分布对目标定位精度的影响，指出了适合于民用辐射源无源雷达的定位方法和定位体制，提高了民用辐射源无源雷达的目标定位精度。

4. 提出了混合频率民用辐射源无源雷达的概念。通过综合使用多种民用辐射源，进一步提高了 CIPRS 的探测性能。此外通过系统设计，研究了 CIPRS 的系统实现方案。

关键词：民用辐射源；无源雷达；无源相干定位

## ABSTRACT

With the increase of complexity in modern battlefield circumstances, conventional active radar has encountered more and more threats, so that active radar don't meet the demand of future wars. Passive radar(PR) which exploit Civilian illuminator as their radar transmitters and detect target by receiving the echo signal reflected by the target, have concealment and anti-stealth performance. So PBR have been paid more and more attention.

This dissertation addresses some aspects of PBR for the target localization accuracy, the choice of illuminator and the systematic design of multi-illuminator PBR. The main contributions of this dissertation concentrate in some aspects as follows:

1. The concept and the study value of PBR utilizing civilian illuminator are introduced and an overview of the development history and latest research is given.
2. The operating principle and key technologies of PBR utilizing civilian illuminator are introduced, and the problems of PBR in practical use are pointed out.
3. The accuracy of target localization in PBR is studied. We analyze the effect on the accuracy of target location by different target location methods, different modes of location, and different configurations of PBR. At last, the location method and the mode of location which suit for PBR are found out and the location accuracy of PBR is improved.
4. The concept of multi-illuminator PBR is discussed. The detection performance of PBR is further enhanced by using multi-illuminator technology. Finally, the implementation scheme of multi-illuminator PBR is proposed.

Key Words: civilian illuminator; passive radar(PR); passive coherent location (PCL)

## 目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	II
目 录 .....	V
CONTENTS .....	VII
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 研究历史、现状及发展趋势 .....	2
1.2.1 发展历史 .....	2
1.2.2 研究现状 .....	3
1.2.3 发展趋势 .....	4
1.3 论文的研究目标和结构安排 .....	5
第 2 章 民用辐射源无源雷达系统 .....	7
2.1 系统组成 .....	7
2.2 关键技术 .....	9
2.3 定位原理 .....	10
2.3.1 DOA 定位法 .....	10
2.3.2 TOA 定位法 .....	11
2.3.3 TDOA 定位法 .....	12
2.4 存在不足 .....	12
2.5 本章小结 .....	13
第 3 章 民用辐射源无源雷达定位精度分析 .....	14
3.1 测量参数分析 .....	14
3.1.1 角度测量精度 .....	14
3.1.2 距离和测量精度 .....	15
3.2 定位精度分析 .....	16
3.2.1 定位参数的数学表达式 .....	16
3.2.2 基于 DOA 定位方法的精度分析 .....	17
3.2.3 基于 TOA 定位方法的精度分析 .....	18
3.2.4 基于 TDOA 定位方法的精度分析 .....	20
3.3 定位精度仿真分析 .....	22
3.3.1 基于 DOA 定位方法的定位精度仿真 .....	23



3.3.2	基于 TOA 定位方法的定位精度仿真.....	31
3.3.3	基于 TDOA 定位方法的定位精度仿真.....	38
3.4	本章小结 .....	41
<b>第 4 章</b>	<b>民用辐射源无源雷达多辐射源混合技术研究 .....</b>	<b>43</b>
4.1	典型民用辐射源信号分析 .....	43
4.1.1	广播信号分析.....	43
4.1.2	电视信号分析.....	46
4.1.3	通信信号分析.....	47
4.1.4	GPS 卫星信号分析.....	49
4.2	典型民用辐射源探测性能比较 .....	49
4.3	混合频率民用辐射源无源雷达设计方案 .....	51
4.3.1	民用辐射源的选择.....	51
4.3.2	系统组成.....	51
4.3.3	天线的设计.....	53
4.3.4	接收机的设计.....	54
4.3.5	信号处理设备的设计.....	56
4.3.6	数据融合设备的设计.....	57
4.4	本章小结 .....	58
<b>第 5 章</b>	<b>总结与展望 .....</b>	<b>59</b>
5.1	总结 .....	59
5.2	展望 .....	59
	[参考文献].....	61
	致谢 .....	64

## CONTENTS

<b>ABSTRACT .....</b>	错误! 未定义书签。
<b>ABSTRACT .....</b>	错误! 未定义书签。
<b>CONTENTS.....</b>	错误! 未定义书签。
<b>CONTENTS.....</b>	错误! 未定义书签。
<b>Chapter I Preface.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Research Background and Signification.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Research History and Development .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Research History.....	2
1.2.2 Research Status .....	3
1.2.3 Research Development .....	5
<b>1.3 Research Target and Structure Arrangement of Paper.....</b>	<b>6</b>
<b>Chapter II The System of Civilian Illuminator-Based Passive Bistatic Radars.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 System Composition.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Key Technology .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 Positioning Principle .....</b>	<b>11</b>
2.3.1 Positioning Method of DOA.....	11
2.3.2 Positioning Method of TOA .....	12
2.3.3 Positioning Method of TDOA .....	13
<b>2.4 The Deficiencies.....</b>	<b>13</b>
<b>2.5 Summary.....</b>	<b>14</b>
<b>Chapter III The Positional Accuracy of Civilian Illuminator-Based Passive Bitatic Radars .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Measured Parameters Analyze .....</b>	<b>15</b>
3.1.1 Accuracy of Angle Measurement.....	15
3.1.2 Accuracy of distance sum .....	16
<b>3.2 Positional Accuracy Analyze .....</b>	<b>16</b>
3.2.1 Mathematical Expression of Positional Parameter .....	17
3.2.2 Positional Accuracy Analysis of DOA.....	18
3.2.3 Positional Accuracy Analysis of TOA .....	19
3.2.4 Positional Accuracy Analysis of TDOA .....	21

---

<b>3.3 Emulation Analysis of Positional Accuracy .....</b>	<b>23</b>
3.3.1 Emulation Analysis of DOA .....	23
3.3.2 Emulation Analysis of TOA.....	31
3.3.3 Emulation Analysis of TDOA.....	38
<b>3.4 Summary .....</b>	<b>41</b>
<b>Chapter IV Research on Multi-Frequency Hybrid Passive Radar Technology .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Analysis of Civilian Illuminator .....</b>	<b>43</b>
4.1.1 Analysis of Broadcast Signal .....	43
4.1.2 Analysis of Television Signal.....	46
4.1.3 Analysis of Communication Signal .....	48
4.1.4 Analysis of GPS Signal.....	49
<b>4.2 Detection Performance Comparison with Civilian Illuminators.....</b>	<b>50</b>
<b>4.3 Designing Scheme of Multi-Frequency Hybrid Passive Radar.....</b>	<b>51</b>
4.3.1 Selection of Civilian Illuminators.....	51
4.3.2 System Composition .....	51
4.3.3 Design of Antenna .....	53
4.3.4 Design of Receiver.....	55
4.3.5 Design of Signal Processing Equipment.....	56
4.3.6 Design of Data Fusion Equipment.....	57
<b>4.4 Summary .....</b>	<b>58</b>
<b>Chapter V Summary and Prospect .....</b>	<b>59</b>
<b>5.1 Conclusion.....</b>	<b>59</b>
<b>5.2 Prospect.....</b>	<b>59</b>
<b>References.....</b>	<b>61</b>
<b>Acknowledgments .....</b>	<b>64</b>

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

随着电子技术的不断进步，电子对抗在战争中起到的作用越来越重要，特别是雷达系统，更是在目标定位和跟踪中起到了不可替代的作用。但是在电子对抗技术迅速发展的严峻形势下，雷达面临的困难和挑战也越来越多，比如低空突防、隐形武器、电子干扰设备、反辐射武器等都会极大地削弱雷达的工作效能，甚至危及雷达的安全。因此，如何提高雷达系统对敌方目标的探测距离和精度，同时保护己方人员和装备的安全，提高己方雷达系统生存能力成为现代雷达系统设计发展的主要方向。

有源雷达是通过自身发射电磁波并接收经目标反射后的电磁波，从而实现目标探测、定位及跟踪功能的雷达。由于在定位时自身要发射大功率电磁信号，虽然具有全天候、高精度等优点，但是其发射的电磁信号会被敌方发现、定位，从而遭到敌方电子干扰或反辐射武器打击。虽然近年来低截获概率雷达的不断发展，使得有源雷达被敌方发现的概率在一定程度上减少了，但是有源雷达受到电磁干扰和被反辐射导弹打击的问题并没有从根本上得到解决。

无源雷达是指自身不发射电磁波，通过接收目标辐射的电磁波，从而实现目标探测、定位及跟踪功能的雷达。目标辐射的电磁波通常有两种形式：一是目标发射的电磁波；二是目标反射的电磁波<sup>[1][2]</sup>。所以，根据目标辐射源的类型，无源雷达分为两种：一种是将目标作为辐射源的无源雷达，辐射源包括目标自身雷达、通信、敌我识别等设备发射的电磁波；另一种是将除目标之外的其他稳定辐射源作为辐射源的无源雷达，该辐射源可以是广播、电视、手机、卫星定位系统等基站辐射的电磁波<sup>[3]</sup>。本文讨论研究的无源雷达属于后者。为方便描述，本文中基于民用辐射源的无源雷达，简称为民用辐射源无源雷达。

民用辐射源无源雷达，除具备普通无源雷达隐蔽性好的优点外，还具有以下4个优点：

1. 结构简单。辐射源为民用电台，自身无发射设备，只有接收设备，因此雷达的结构相对简单，便于灵活机动和快速部署。此外由于结构简单，雷达的生产安装、维护保养也相对方便。

2. 具有一定的反隐身能力。相对传统的双（多）基地体制雷达，基于民用辐射源的无源雷达系统，由于所利用的民用辐射源（如广播、电视、移动电话等）频率较低，并且辐射源具有全向发射的特点，因此具有更强的反隐身能力和低空探测能力。

3. 生存能力强。各种民用辐射源种类多样、数量繁多、分布广泛，当某一民用辐射源被摧毁或无法工作时，可以及时更换其他的辐射源继续工作，因此雷达可以保持不间断工作，生存能力和抗摧毁能力强。

4. 具有反无线电静默的能力。相对于利用目标自身辐射源进行探测的无源雷达，基于民用辐射源的无源雷达可对保持无线电静默的目标进行探测。

由于具备以上优点，因此对基于民用辐射源的无源雷达系统的研究具有十分重要的意义。

## 1.2 研究历史、现状及发展趋势

### 1.2.1 发展历史

民用辐射源无源雷达的工作原理类似于双基地雷达，其核心是采用收发分置的构造，而收发分置的雷达早在雷达诞生起就开始使用，因此民用辐射源无源雷达几乎是与雷达技术同步发展起来的。

1922年，美国的 Taylor 等人进行了 60MHz 电磁波传播实验，使雷达系统的结构初具模型，并成功探测到了附近河中的小木船。10年后，他的同事 Hyndland 等人在 Taylor 雷达模型的基础上，通过多次试验研制出发射机与接收机分别独立工作的探测设备，其结构类似于目前的双基地雷达，并成功探测到了 80km 以外的飞机<sup>[4]</sup>。1935年在英国，第一部最接近目前民用辐射源无源雷达的探测设备诞生。它由 Arnold Wilkins 等人设计，将 BBC 电台发射的广播信号作为民用辐射源，该设备实现了对一架距离接收机 12km 左右的轰炸机的有效探测<sup>[5]</sup>。

最早投入实战的双基地雷达是第二次世界大战中德国研制的“Klein

Keidelberg”雷达，该雷达采用的辐射源为位于英国的对空警戒雷达所发射的信号，雷达的接收机位于其邻国丹麦。该雷达的探测距离可达到450km左右，距离分辨力约为10km，在当时可较好的完成对轰炸机群的预警任务。由于当时的理论和器械条件的限制，该体制的无源雷达的优势被掩盖了，在定位精度上的劣势也一直难以解决。因此，当1936年天线收发转换开关出现之后，收发一体的单基地雷达迅速发展，逐步取代了基于无线电通信的双基地雷达<sup>[6]</sup>。

但是40多年后，该体制的无源雷达又重新焕发了生命力。1982年，Fomst Schoenenberger和Davies开发出使用机场管制雷达600MHz信号的无源雷达。1986年，伦敦大学的Griffith和Long首次发表了基于电视信号的双基地雷达系统的论文，他们通过利用同步脉冲信号以及专用波形，使雷达的距离分辨力达到1.8Km，最大不模糊距离达到10Km。虽然研究取得了较大的进步，但是离实际应用还有很大的距离<sup>[7]</sup>。

1992年，Griffiths, Keaveney, Baker和Garner等人再次进行基于无线电通信信号的双基地雷达研究。这次他们采用卫星电视信号作为辐射源，并将接收机革命性的设置成两个分离的信道，通过对辐射源的直达波信号和目标的回波信号进行相参处理，从而完成对目标的探测与定位。但是，此次实验没有达到预期的效果，主要原因是目标运动速度过快，导致相参积累时间过短。<sup>[8][9]</sup>

### 1.2.2 研究现状

目前，国内外十分重视利用外辐射源的无源雷达系统的研发。国外正在研发的系统有：美国华盛顿大学基于西雅图市商业广播电台信号的无源探测定位系统；英国伦敦大学基于伦敦电视台电视信号的无源探测雷达；英国防御研究局基于电视音频调幅载波信号的无源雷达试验系统；法国国家航空研究局基于巴黎电视台广播信号的非合作照射多基地无源雷达试验系统；德国西门子公司基于民用通信信号的无源雷达试验系统；澳大利亚国防科技部基于达尔文市调频广播信号的无源探测雷达<sup>[10][11][12]</sup>。

尽管国外针对基于民用辐射源的无源雷达系统的理论研究和装备试验有很多，但是真正研发成功并列装军队的系统却屈指可数。目前，已列装军队并投入使用的民用辐射源无源雷达主要有两款，分别是美军的“沉默哨兵”雷达和英军

的“蜂窝”雷达。

### 1. 美国的“沉默哨兵”雷达

1998年,美国洛克希德-马丁公司研制出“沉默哨兵”雷达。该雷达由相控阵接收天线、大动态范围数字接收机、高性能并行处理器等部分组成,并将50-80MHz的民用调频广播信号作为辐射源,可在180Km范围内完成对雷达反射面积 $10\text{m}^2$ 目标的探测、定位及跟踪。该雷达的最远探测距离可达220Km,距离分辨力可达15m,能同时处理200个目标<sup>[13]</sup>。

### 2. 英国的“蜂窝”雷达

英国的“蜂窝”雷达系统利用蜂窝电话基站所发射的信号作为辐射源进行探测和跟踪各类移动目标。实验表明,该雷达在野外条件下对地面小型目标的探测距离为10-15km,对空中大型目标的探测距离为100km<sup>[14]</sup>。

我国的无源雷达系统研究从70年代末开始,经历了引进、仿制、自主研发三个阶段。成都的中电29所和南京的中电14所在此方面的研究处于全国领先的地位。目前,我军所装备的无源雷达系统已经发展到第三代,最新列装的电子对抗对空侦察定位系统就是利用民用调频广播作为辐射源,通过分析飞机掠过时形成的信号时间差来确定飞机的位置,从而实现探测和发现目标。

## 1.2.3 发展趋势

由于民用辐射源无源雷达与有源雷达和一般无源雷达相比,具有无法比拟的优势,所以民用辐射源无源雷达可能成为今后军事领域雷达系统发展的一个重要方向。此外,随着无线通信技术的发展和普及,未来将有越来越多的信号通过无线手段进行传输,民用辐射源的种类将更加趋于多元,使用范围将更加普及,发射基站数量不断增多,特别是卫星信号将使全世界构成一个“无死角”、“不断线”的电磁空间,民用辐射源无源雷达系统可充分利用这些无线通信信号进行目标探测、定位和跟踪<sup>[15][16][17]</sup>。

结合目前民用辐射源无源雷达的研究发展现状,未来民用辐射源无源雷达可能将在以下几个方面实现突破:

1. 拓展可使用的民用辐射源种类。随着无线通信技术的发展和数字信号处理技术的不断进步,民用辐射源无源雷达可供选择和处理的民用辐射源的种类将日

渐增多,并从单一使用某一种民用辐射源发展成综合使用多种民用辐射源进行探测。目前可利用的民用辐射源信号除了调频广播(FM)信号、移动通信(GSM、CDMA)信号以外,还可扩展到数字广播(DAB)信号、数字电视(DVB-T)信号、以及全球卫星定位系统(GPS)信号等。此外,由于不同的民用辐射源信号的特性不同,造成探测性能有差异,所以综合使用多种民用辐射源可以使无源雷达的探测性能得到优势互补,从而进一步提高民用辐射源无源雷达的探测性能。

2. 多站组网侦察。目前的民用辐射源无源雷达大多采用类似双基地雷达的配置,即由单个发射站和单个接收站组成,导致在探测区域内定位精度较差且容易形成观测盲区,削弱了作战效能。因此,为尽可能地提高对目标的探测能力,提高定位精度,减少探测盲区,可以将多个无源雷达站通过组网进行协同侦察。

3. 探测目标的傅里叶成像。由于采用民用辐射源进行探测,不接收目标本身发射的电磁信号,因此系统本身不具备目标识别功能。因此,可以对同一个目标,通过使用分布、频段均不同的多个民用辐射源进行探测,构建起目标的傅里叶函数,在通过傅里叶逆变换实现对目标的傅里叶成像,从而达到对目标的个体识别的目的。

4. 无源雷达与有源雷达相配合。民用辐射源平时可能存在关机检修的情况,战时可能存在关机避战或被敌方摧毁的可能,此时民用辐射源将消失或无法利用,从而导致无源雷达无法正常工作。因此,可以考虑将无源雷达与有源雷达配合使用。如在民用辐射源无源雷达的探测范围内部署一部有源雷达,有源雷达可正常工作并探测目标,同时也为民用辐射源无源雷达提供可利用的辐射源信号,当民用辐射源消失或无法利用时,民用辐射源无源雷达可利用有源雷达的信号,继续保持正常工作。相互配合后,不仅可以提高无源雷达的使用效率,同时也可以提高整个系统的抗摧毁能力。

### 1.3 论文的研究目标和结构安排

本文在介绍无源雷达系统定位原理的基础上,重点针对目前基于民用辐射源的无源雷达系统在定位上存在精度差的问题进行改善性研究,并通过仿真提出了具体的解决方案,从而为进一步提升该体制无源雷达系统的作战效能提供了方



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库