

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学号: 23320121152953

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

调频编码雷达高精度测距测速技术研究

Study on High Accuracy Range and Motion Parameter  
Estimation for Frequency Modulation Coded Radar Systems

傅茂忠

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: 2015年 月

论文答辩时间: 2015年 月

学位授予日期: 2015年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2015年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

(        )1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于  
年    月    日解密，解密后适用上述授权。

(        )2.不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

年    月    日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘要

调频编码雷达为一种新型的高距离分辨率雷达，具有作用距离大、瞬时带宽低和抗干扰性能强等优点。针对调频编码雷达进行高精度测距测速算法的研究对于在该种雷达上完善和改进后续的目标成像、目标识别和目标跟踪等研究具有重要意义。因此，本文围绕调频编码雷达信号的距离和运动参数估计问题，开展了如下几个方面研究工作：

(1) 深入研究调频编码雷达的回波信号模型，对实际雷达信号处理过程中的下变频、采样、匹配滤波和带通滤波等过程进行了模拟。最终得到调频编码雷达回波信号的离散形式数学模型。

(2) 为了得到高精度的测距测速结果，本文提出利用最大似然估计法（maximum likelihood estimation, MLE）对调频编码雷达信号进行距离和运动参数估计，并对似然函数在线性步进、随机编码和Costas编码的载波跳频图案下的不同的分布特性进行了分析与对比。为了对所提出算法的性能进行评价与分析，本文对基于调频编码信号的距离、速度和加速度估计的克拉美—罗下限进行了详细推导。此外，本文还讨论了不同载波跳频图案对克拉美—罗下限的影响，从理论的层面上分析了调频步进信号与调频编码信号的性能差别。通过仿真对比证明最大似然估计法的估计性能能够达到理论最佳值。

(3) 针对最大似然估计法存在搜索范围大、计算复杂和估计精度与计算量之间的相互矛盾的问题，本文首先提出利用距离走动多项式拟合法获得运动参数的粗估计值，以减小最大似然估计法的搜索范围。随后，结合快速傅里叶变换（fast Fourier transform, FFT）与Chirp Z变换（Chirp Z transform, CZT）方法对似然函数计算过程进行化简，将最大似然估计法对距离、速度和加速度的三维搜索降阶为速度和加速度二维搜索与一次FFT运算或CZT运算。此外，为解决最大似然估计法的估计精度与计算量之间的矛盾，本文用牛顿迭代法求取似然函数的最大值，将对距离、速度和加速度的三维搜索过程转化为计算量小且固定不变的迭代过程。最后，通过设计一种联合估计算法将这三种算法有机地结合在一起，大大减少了最大似然估计法的计算量。仿真结果表明，联合估计算法性能稳定，对距离和运

动参数的估计精度能够达到克拉美—罗下限。

**关键词：**调频编码雷达；最大似然估计；牛顿迭代法；Costas编码；随机编码；克拉美—罗下限

厦门大学博硕士论文摘要库



## Abstract

Frequency modulation coded radar is a new kind of high range resolution radar with advantages such as far range coverage, low instantaneous bandwidth and strong anti-jamming capability. Studying on high accuracy range and motion parameter estimation algorithm on frequency modulation coded radar is of great significance to improve and perfect the follow-up target imaging and target recognition and target tracking algorithm. Therefore, we focus on the problem of estimating range and motion parameter on the frequency modulation coded signal in this article. And the main objectives of our research work can be summarized as follows:

(1) The model of frequency modulation coded signal is discussed in detail. The process of down converting, sampling, matched filtering, and band-pass filtering process is simulated in our model. And the final output of this signal model is obtained in discrete form.

(2) In order to obtain high precision estimation results, a method for motion parameters based on maximum likelihood estimation (MLE) is presented in this article. And the property of the likelihood function is analyzed and compared under different carrier frequency hopping patterns which are linear stepped, random codes and Costas codes. In order to evaluate and analysis the performance of the proposed algorithms, Cramér-Rao lower bound (CRLB) is also derived. Besides, this article discusses the influence of different carrier frequency hopping pattern on Cramér-Rao lower bound, which explains the performance difference of frequency modulated stepped signal and frequency modulation coded signal. The results of our simulation indicates that the MLE method can achieve close to the optimum performance theoretically attainable.

(3) The MLE method has drawbacks as large search space, complicated calculation procedure, and the contradictory between the estimation precision and the amount of calculation. Firstly, in order to narrow the search of the MLE, we use the walking distance polynomial fitting method for rough estimation. Then, fast Fourier

transform (FFT) and Chirp Z transform (CZT) is applied to MLE method to reduce the calculation process of likelihood function. The three-dimensional searching of range, velocity and acceleration is turned into a two-dimensional searching and one FFT or CZT. In addition, a fast method basing on Newton's method is also provided, which turns the three-dimensional search process into an iteration process with small and fixed amount of calculation. Finally, a joint estimation algorithm is introduced, which can greatly reduce the calculation of the MLE. Experimental results show that the performance of the joint estimation algorithm is stable and can achieves CRLB.

**Key Words:** Frequency modulation coded radar; maximum likelihood estimation; Newton's method; Costas codes; random codes; Cramer-Rao lower bound

## 目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
目录.....	V
Contents .....	VII
<b>第 1 章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.2 国内外发展现状 .....	2
1.3 课题研究意义 .....	4
1.4 本文结构安排 .....	6
<b>第 2 章 信号模型 .....</b>	<b>7</b>
2.1 线性调频信号 .....	7
2.2 频率步进信号 .....	8
2.3 调频编码信号 .....	9
2.4 本章小结 .....	16
<b>第 3 章 基于最大似然估计理论的估计方法.....</b>	<b>17</b>
3.1 传统估计方法.....	17
3.1.1 最小熵法.....	17
3.1.2 最大对比度法.....	18
3.1.3 相邻相关法.....	19
3.1.4 传统方法总结.....	19
3.2 最大似然估计方法.....	19
3.3 似然函数分布 .....	21
3.3.1 载波频率步进.....	24
3.3.2 载波随机跳频.....	28
3.3.3 载波编码跳频.....	30

3.4	克拉美—罗下限.....	33
3.5	仿真实验.....	37
3.6	本章小结.....	40
<b>第 4 章</b>	<b>基于似然函数特性的快速算法.....</b>	<b>41</b>
4.1	粗估计算法.....	41
4.1.1	算法基本原理.....	41
4.1.2	仿真实验.....	44
4.2	快速搜索算法.....	46
4.2.1	基于 FFT 的快速算法.....	47
4.2.2	基于 CZT 的快速算法.....	48
4.2.3	计算量分析.....	52
4.2.4	仿真实验.....	52
4.3	牛顿迭代法.....	55
4.3.1	算法基本原理.....	55
4.3.2	收敛域大小.....	58
4.3.3	仿真实验.....	59
4.4	联合估计算法.....	62
4.4.1	算法基本原理.....	62
4.4.2	仿真实验.....	65
4.5	本章小结.....	67
<b>第 5 章</b>	<b>总结与展望.....</b>	<b>69</b>
5.1	论文工作总结.....	69
5.2	不足与展望.....	70
	参考文献.....	71
	致谢.....	76
	硕士期间参与的科研项目和发表的论文.....	77

## Contents

<b>Abstract in Chinese</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract in English</b> .....	<b>III</b>
<b>Contents in Chinese</b> .....	<b>V</b>
<b>Contents in English</b> .....	<b>VII</b>
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Research Background</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Development Status at Home and Abroad</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Research Significance</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4 Organization of the Paper</b> .....	<b>6</b>
<b>Chapter 2 Signal Model</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 Linear Frequency Modulation Signal</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2 Frequency Modulated Stepped Signal</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3 Frequency Modulated Coded Signal</b> .....	<b>9</b>
<b>2.4 Summary</b> .....	<b>16</b>
<b>Chapter 3 Estimation Method Based on MLE</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1 Traditional Estimation Method</b> .....	<b>17</b>
3.1.1 Minimum Entropy Method .....	17
3.1.2 Maximal Contrast Method .....	18
3.1.3 Adjacent-correlate Method .....	19
3.1.4 Summary of Traditional Method .....	19
<b>3.2 Maximum Likelihood Estimation</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3 Distribution of Likelihood Function</b> .....	<b>21</b>
3.3.1 Linear Stepped Carrier Frequency .....	24
3.3.2 Random Coded Carrier Frequency .....	28
3.3.3 Costas Coded Carrier Frequency .....	30

3.4	<b>Cramér-Rao Lower Bound</b> .....	33
3.5	<b>Simulation</b> .....	37
3.6	<b>Summary</b> .....	40
<b>Chapter 4 Fast Methods for MLE</b> .....		<b>41</b>
4.1	<b>Corase Estimation Method</b> .....	<b>41</b>
4.1.1	Algorithm Theory .....	41
4.1.2	Simulation .....	44
4.2	<b>Fast Searching Method</b> .....	<b>46</b>
	Fast Method Based on FFT.....	47
	Fast Method Based on CZT .....	48
	Analysis of Calculation Amount .....	52
	Simulation.....	52
4.3	<b>Newton's Method</b> .....	<b>55</b>
4.3.1	Algorithm Theory .....	55
4.3.2	Convergence Region.....	58
4.3.3	Simulation.....	59
4.4	<b>Joint Estimation Method</b> .....	<b>62</b>
4.4.1	Algorithm Theory .....	62
4.4.2	Simulation.....	65
4.5	<b>Summary</b> .....	<b>67</b>
<b>Chapter 5 Summary and Prospect</b> .....		<b>69</b>
5.1	<b>Summary of the Work</b> .....	<b>69</b>
5.2	<b>Insufficient and Prospect</b> .....	<b>70</b>
<b>Reference</b> .....		<b>71</b>
<b>Acknowledgement</b> .....		<b>76</b>
<b>Published Paper and Research during Pursuing Master Degree</b> .....		<b>77</b>

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景

雷达是一种通过发射和接收电磁波信号来测量目标的距离、方位和仰角等信息的电子设备。通常，雷达的工作波段较高，因此它可以在各种气候条件下全天候、全天时地正常工作。随着各个领域科技的发展与雷达功能需求的增加，针对不同的用途，雷达目前已经发展出多种工作体制，如多普勒雷达、高距离分辨率雷达和相控阵雷达等。

现代雷达系统中，高距离分辨率雷达具有抗杂波能力强、测距精度高等特点，为目前广泛采用的雷达体制。由雷达原理可知，采用脉冲压缩技术的雷达的距离分辨率主要取决于发射脉冲信号的带宽。对于传统的线性调频（linear frequency modulation, LFM）信号，其距离单元大小为 $c/(2B)$ ，与带宽 $B$ 的大小成反比。因此，获得高距离分辨率最直接的方法是增大发射信号的带宽。而根据采样定理，大带宽的信号对采样率的要求也相应增高。高采样率导致雷达系统所要处理的数据量与系统实现难度急剧增大，且为满足雷达信号处理实时性的要求将采用成本更高的高性能硬件。

频率步进雷达是另一种常见的高距离分辨雷达。它通过发射一组载波频率线性变化的窄带脉冲信号来合成等效的大带宽。因此，频率步进雷达作为一种窄带雷达，不仅具有硬件要求低、实现简单的优点，还具有宽带雷达距离分辨率高的优点。但频率步进雷达存在数据率低的缺点和严重的时延—多普勒耦合现象。

针对频率步进雷达存在的时延—多普勒耦合现象，进一步发展出了频率编码雷达。频率编码雷达通过对载波频率进行编码，可以消除时延—多普勒耦合，但仍然存在对目标运动敏感的问题。而调频步进雷达采用了线性调频信号作为基带信号的包络并结合了频率步进雷达载波频率线性跳变的工作方式，兼具线性调频脉冲雷达数据率高与频率步进雷达瞬时带宽低的优点。但调频步进雷达载波线性跳变的特性带来严重的时延—多普勒耦合现象，将直接影响雷达的测距测速精度。而采用载波非线性跳频的方式工作的调频编码雷达可以缓解这一问题。目前，大多数针对调频编码雷达的测距测速算法的精度不高。因此，本文将重点围绕调频

编码雷达的高精度测距测速算法进行详细研究。

## 1.2 国内外发展现状

高距离分辨雷达能提供丰富的目标空间结构信息,是新体制雷达的重要发展方向之一。调频编码信号作为一种新型的高距离分辨信号,是在频率编码信号<sup>[1]-[10]</sup>和调频步进信号<sup>[11]-[15]</sup>的基础上衍生而来的,从而兼具了两者的优点。因此,调频编码信号也获得了相当多的关注<sup>[16][17]</sup>。

模糊函数理论是对雷达发射信号进行分析和设计的重要数学工具。模糊函数描述了雷达信号的固有特性,体现了不同信号波形下雷达系统所能达到的理论上的最佳分辨率、测距测速精度和杂波抑制能力<sup>[18]</sup>。J.P. Costas<sup>[19]</sup>提出了一种具有理想模糊函数分布(模糊函数呈图钉型分布)的频率编码脉冲序列,即Costas序列。文献[20]研究并分析了Costas序列应用在频率步进雷达中实现合成高距离分辨率的相关理论。文献[21]则对采用Costas编码的调频编码信号模糊函数进行了讨论并指出采用Costas编码后,调频编码信号具有较好的距离和速度的联合分辨能力,可以消除信号的时延—多普勒耦合现象。

文献[23]对采用线性调频信号作为脉冲包络的雷达回波信号建立了完善的数学模型,从理论角度分析了多普勒对子脉冲压缩和合成距离像造成的影响,并给出了对二次相位因子进行补偿的速度临界值。根据其得到的信号模型,当目标存在径向运动时,目标的径向运动将导致脉冲间的距离像发生走动。当对多个脉冲信号进行相参累积时将出现目标距离像展宽的现象。因此,必须对目标的运动参数进行精确估计,并通过相应的运动补偿算法,将运动的目标转化为在脉冲累积时间内静止不动的目标。

互相关法是雷达领域的经典测速算法,具有计算量小,精度高的优点。文献[24]对时域互相关法和频域互相关法的测速性能进行了讨论与对比。其中,频域互相关法对成像前的相邻回波信号进行互相关运算,根据得到的相位差值估算相应的目标速度。而时域互相关法利用了相邻回波信号距离像的走动现象,并通过互相关方法获得走动距离,进而估算出目标速度。文献[24]指出频域互相关法的模糊范围较小,但具有相当高的精度,而时域互相关法的速度测量模糊范围较大,但精度稍差一些。文献[25]中提出了时域二维互相关法,通过对比分析,指



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.