

学校编码: 10384  
学号: B200324006

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 秘密★5年  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

微波扩时测距系统的算法研究  
及其射频电路与微天线设计

Algorithm Study for the MTDM System and Design  
of its RF-Circuit & Micro-Antennas

陈华君

指导教师姓名: 黄美纯 教授

郭东辉 教授

专 业 名 称: 凝聚态物理

论文提交日期: 2008 年 01 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评阅人: \_\_\_\_\_

2008 年 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

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

在自动测距系统日益普及的今天，非接触式测距系统占据了主导地位。微波测距系统具有高精度、长距离、快速和环境适应性优异等特点，使得它在非接触式测距系统中得到广泛的应用，成为非接触式测距系统研究的最重要方向之一。本论文工作主要集中在测距算法和系统实现两个方面的研究。

本论文首先介绍了目前常用的几种微波测距系统和算法，分析其各自优缺点；接着提出一种抽样扩时测距算法，并给出了抽样脉冲频率可变的改进方案；根据抽样扩时测距算法原理提出一个可行的射频前端信号处理系统结构框图。然后结合CMOS射频集成电路工艺和微波电路设计分析方法，对照此系统框图，采用自上而下的设计方法，逐个完成模块电路的设计及仿真；最后，作为测距系统与相控阵天线结合的前期基础研究，本论文还将MEMS技术与天线设计相结合，研究了几款RF-MEMS器件（如：移相器、微天线）。

本论文研究的创新之处在于：

(1) 提出新抽样扩时测距算法。该算法利用两个频率相差微小的时钟信号来对包含距离信息的回波信号进行扫描抽样，以获得高精度的距离测量信息。同时，引入两个时钟频率倍数的变化设置进一步提高测量精度和测量速度。

(2) 自主设计测距系统应用的射频集成电路（RF-IC）。该RF-IC是采用标准的 $0.18\mu\text{m}$  CMOS工艺进行设计的，实现包括了微波振荡器、时钟发生器、脉冲发生器、差分放大器、3dB分支线耦合器、低噪声放大器、滤波器、抽样平滑电路、峰值检测电路等电路模块的自主设计。

(3) 给出了基于MEMS工艺的多种天线设计。主要设计包括了基于MEMS开关的移相器与微带缝隙天线、频率可重构的微带天线、以及基于EFAB工艺的微线圈天线。

**关键词：**微波测距；抽样扩时；MEMS天线

**ABSTRACT**

Nowadays, with auto distance measuring system is popularization, contactless distance measuring system hold the dominant position. Microwave distance measuring system obtains broad application and becomes one of key research aspects in contactless distance measuring system, due to its characteristic: high precision, long range, high speed, good environment flexibility and so on. The thesis is focus on research of both distance measuring algorithm and system realization.

In this thesis, we introduce several microwave distance measuring system and algorithm and analyze their characteristic respectively. Then, we propose sample time-spread distance measuring algorithm and its improving algorithm by changing the frequency of sample pulse. A RF front-end signal processing system schematic diagram is proposed, based on sample time-spread distance measuring algorithm. Using CMOS RF integrated circuit technology and microwave circuit design/analyses rules, the whole RFIC is designed and simulated one by one part by from top to bottom design flow. Finally, as the basic research of combination of distance measuring system and electronically array antenna, we investigate and design several kinds of antenna based on MEMS technology, such as phase shifter, micro antenna and so on.

The innovations of this thesis are as following:

(1) Sample time-spread distance measuring algorithm. This algorithm uses two clock signals whose frequency difference is tiny to scan and sample the echo signal which includes the distance information. It can obtain quite high precision distance measuring. By changing the multiple of frequency of two clock signals, the improving algorithm can increase measuring range or measuring speed.

(2) CMOS RF IC design of MTDM System independently. Corresponding to sample time-spread distance measuring algorithm, the CMOS RF IC is designed independently. It mainly includes microwave oscillator, clock generation, pulse generation, differential amplifier, 3dB coupler, low noise amplifier, filter, sample and hold circuit, peak detector and so on.

(3) MEMS antenna designs based on MEMS. The designs include: phase shifter and microstrip slot antenna based on RF MEMS switch, frequency reconfigurable microstrip antenna and micro coil antenna based on EFAB.

**Key words:** Microwave Distance Measuring; Sample Time-Spread; MEMS Antenna

目 录

|   |           |
|---|-----------|
| <b>第一章 绪论</b> .....                     | <b>1</b>  |
| 1.1 引言 .....                            | 1         |
| 1.2 多种非接触式测距方法的比较 .....                 | 2         |
| 1.3 微波测距技术的发展背景及其应用现状 .....             | 4         |
| 1.4 关键技术及其研究进展 .....                    | 6         |
| 1.5 本论文研究工作的重点和论文章节安排 .....             | 12        |
| <b>第二章 微波抽样扩时测距法</b> .....              | <b>14</b> |
| 2.1 雷达测距系统简介 .....                      | 14        |
| 2.2 多种雷达测距算法分析 .....                    | 15        |
| 2.3 扩时雷达测距算法的基本原理 .....                 | 20        |
| 2.4 系统模块结构 .....                        | 23        |
| 2.5 采样频率可变的扩时测距法 .....                  | 26        |
| 2.6 本章小结 .....                          | 30        |
| <b>第三章 射频微电子技术 with 微波电路的基本原理</b> ..... | <b>31</b> |
| 3.1 无源射频集成电路元件 .....                    | 31        |
| 3.2 MOS 射频器件 .....                      | 34        |
| 3.3 微带传输线理论 .....                       | 37        |
| 3.4 网络参量与 Smith 圆图 .....                | 39        |
| 3.5 阻抗匹配 .....                          | 43        |
| 3.6 本章小结 .....                          | 45        |
| <b>第四章 射频电路设计与模块功能仿真</b> .....          | <b>46</b> |
| 4.1 发射前端射频电路模块设计 .....                  | 46        |
| 4.2 接收前端射频电路模块设计 .....                  | 54        |
| 4.3 信号处理模块设计 .....                      | 58        |
| 4.4 电路模块功能仿真分析 .....                    | 61        |
| 4.5 本章小结 .....                          | 69        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| <b>第五章 天线原理与 RF MEMS 技术</b> ..... | <b>70</b>  |
| 5.1 天线原理 .....                    | 70         |
| 5.2 相控阵天线原理 .....                 | 75         |
| 5.3 MEMS 器件工作原理 .....             | 79         |
| 5.4 MEMS 微加工工艺 .....              | 80         |
| 5.5 RF MEMS 器件及其应用 .....          | 83         |
| 5.6 本章小结 .....                    | 86         |
| <b>第六章 RF MEMS 天线设计与仿真</b> .....  | <b>88</b>  |
| 6.1 RF MEMS 移相器设计及仿真 .....        | 88         |
| 6.2 RF MEMS 双频天线设计及仿真 .....       | 93         |
| 6.3 可重构微机械双频天线设计及仿真 .....         | 98         |
| 6.4 基于 EFAB 工艺的微型线圈天线 .....       | 106        |
| 6.5 本章小结 .....                    | 111        |
| <b>第七章 工作总结与今后的研究方向</b> .....     | <b>112</b> |
| 7.1 工作总结 .....                    | 112        |
| 7.2 主要创新 .....                    | 113        |
| 7.3 可继续研究的工作 .....                | 114        |
| <b>参考文献:</b> .....                | <b>116</b> |
| <b>读博士期间发表和待发表的论文</b> .....       | <b>125</b> |
| <b>致    谢</b> .....               | <b>126</b> |



## CONTENTS

1. INTRODUCTION..... 错误！未定义书签。
  1. 1 Introduction ..... 错误！未定义书签。
  1. 2 Comparision of several contactless distance measuring system 错误！未定义书签。
  1. 3 Microwave distance measurement background and application错误！未定义书签。
  1. 4 Key problems and their research & development错误！未定义书签。
  1. 5 Synopsis of out works and arrangement of this thesis错误！未定义书签。
2. MICROWAVE TIME-SPREAD DISTANCE MEASURING ALGORITHM错误！未定义书签。
  2. 1 Introduction of radar distance measuring system错误！未定义书签。
  2. 2 Analysis of several distance measuring algorithm错误！未定义书签。
  2. 3 Principle of time-spread distance measuring algorithm错误！未定义书签。
  2. 4 System schematic diagram ..... 错误！未定义书签。
  2. 5 Changing sample frequency MTDM algorithm .... 错误！未定义书签。
  2. 6 Section conclusion ..... 错误！未定义书签。
3. PRINCIPLE OF RF MICROELECTRONICS AND MICROWAVE CIRCUIT . 错误！未定义书签。
  3. 1 Passive RF IC component ..... 错误！未定义书签。
  3. 2 MOS RF device ..... 错误！未定义书签。
  3. 3 Microstrip transmission line theory ..... 错误！未定义书签。
  3. 4 Network parameter and Smith chart ..... 错误！未定义书签。
  3. 5 Impedance matching ..... 错误！未定义书签。

|  |                      |
|--|----------------------|
| 3. 6 Section conclusion .....                                      | 错误! 未定义书签。           |
| <b>4. RF CIRCUIT DESIGN AND SIMULATION .....</b>                   | <b>错误! 未定义书签。</b>    |
| 4. 1 Transmit RF front-end design .....                            | 错误! 未定义书签。           |
| 4. 2 Receive RF frond-end design .....                             | 错误! 未定义书签。           |
| 4. 3 Signal processing circuit design .....                        | 错误! 未定义书签。           |
| 4. 4 circuit simulation and analysis .....                         | 错误! 未定义书签。           |
| 4. 5 Section conclusion .....                                      | 错误! 未定义书签。           |
| <b>5. PRINCIPLE OF ANTENNA AND RF MEMS .....</b>                   | <b>错误! 未定义书签。</b>    |
| 5. 1 Principle of antenna .....                                    | 错误! 未定义书签。           |
| 5. 2 Principle of array antenna .....                              | 错误! 未定义书签。           |
| 5. 3 Operation principle of MEMS device .....                      | 错误! 未定义书签。           |
| 5. 4 MEMS micromachining technology .....                          | 错误! 未定义书签。           |
| 5. 5 RF MEMS devices and their applications .....                  | 错误! 未定义书签。           |
| 5. 6 Section conclusion .....                                      | 错误! 未定义书签。           |
| <b>6. RF MEMS ANTENNA DESIGN AND SIMULATION .</b>                  | <b>错误! 未定义书签。</b>    |
| 6. 1 RF MEMS phase shifter .....                                   | 错误! 未定义书签。           |
| 6. 2 Microstrip slot antenna based on RF MEMS switch               | 错误! 未定义书签。           |
| 6. 3 Frequency reconfigurable antenna with micromechanical patch . | 错误! 未定义书签。           |
| 6. 4 Micro coil antenna based on EFAB .....                        | 错误! 未定义书签。           |
| 6. 5 Section conclusion .....                                      | 错误! 未定义书签。           |
| <b>7. SUMMARY AND FUTURE WORK.....</b>                             | <b>错误! 未定义书签。 2</b>  |
| 7. 1 Summary .....   | 错误! 未定义书签。 2         |
| 7. 2 Innovation .....  | 错误! 未定义书签。 3         |
| 7. 3 Future work .....   | 错误! 未定义书签。 4         |
| <b>REFERENCES: .....</b>   | <b>错误! 未定义书签。 6</b>  |
| <b>PUBLISHED AND SUBMITTING PAPER LIST .....</b>                   | <b>错误! 未定义书签。 25</b> |

ACKNOWLEDGEMENT..... 错误！未定义书签。 26

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第一章 绪论

本论文旨在开发一种高精度的微波测距系统，主要研究抽样扩时算法，并根据该算法设计实现了相应的射频电路和天线结构。为了说明本论文工作的研究意义及其实现可行性，本章首先介绍了各种测距方法及相关技术，说明微波测距方法是非接触式自动测距系统实现的一种最佳技术方法。然后，分析了实现微波测距系统算法、电路、天线三个主要方面的研究现状，指出相应的关键技术问题。针对这些问题，给出本论文的研究工作重点。最后，简要介绍论文其他各章节的内容安排。

### 1.1 引言

在许多情况下人们需要获知一些物体的相对距离、方位，以便做出一些相应的操作。通过接触式测量或者非接触式测量就可以得到这些结果数据。非接触式测量指在无须接触目标物体的前提下对目标物体进行测量，相比接触式测量而言，其优势在于：操作简便，只需要少数的人就可以完成，节约人力物力；精确度高，不会因视觉差等主观因素影响其精度；安全性高，可以应用于一些恶劣的环境下；测量速度快，只需极短的时间就可得到测量结果，而对于多个不同方向的目标，可以快速改变测量方向。非接触式自动测距通过某种载体进行信号的发射、传播、接收，然后在系统后端进行信号的处理计算，以获得需要的目标距离信息，有的还可以获得目标的方位角度的信息。无论是在军事用途上还是工业应用领域，非接触式自动测距系统都有着很广泛的应用空间。例如军事上的自动跟踪系统[1][2]；飞机着陆[3][4]或者港口船舶的自动导航系统[5-8]；工业生产过程中的储料的测量[9-11]；汽车防撞系统[12-19]等。基本上在需要快速进行精确非接触式距离测量，或者替代人眼进行自动化控制的领域都存在自动测距系统的发展前景。因此，多种多样的测距系统也应运而生。

## 1. 2 多种非接触式测距方法的比较

目前的非接触测距方法主要有激光、红外、超声波、微波测距法。虽然不同测距方法的具体工作原理和信号处理过程有所区别，但它们的基本思路都是通过对目标返回的回波信息进行计算，以获得源与目标的相对距离的。下面对这些测距方法进行介绍和比较。

### (1) 激光测距

激光具有单色性和相干性好、方向性强等特点。激光测距是利用激光来进行高精度的距离测量。其具有测量时间短、量程大、精度高、定位准确等优点，在很多领域得到了广泛应用[20-24]。现在广泛使用的便携式测距仪，作用距离为数百米至数十千米，测量精度为5毫米到5米左右。我国研制的对卫星测距的高精度测距仪，测量精度可达到几厘米。激光测距抗干扰能力强，与微波测距相比，具有抗电磁干扰的优点。但其结构复杂，成本高。

激光测距的主要缺点是工作时受天气和大气影响大。激光一般在晴朗的天气里衰减较小，传播距离较远。而在大雨、浓烟、浓雾等坏天气里，衰减急剧加大，传播距离大受影响。而且，大气环流还会使激光光束发生畸变、抖动，直接影响激光测距的测量精度。由于激光的波束极窄，在空间搜索目标非常困难，直接影响对移动目标的探测效率，只能在较小的范围内搜索目标。

### (2) 红外线测距

红外线是一种波长比可见光线长，肉眼看不见的光，有显著的热效应和较强的穿透云雾的能力。红外线测距是用调制的红外光来进行精密测距[25-27]，测距范围通常在几十米到百米，是一种中距离测距技术。通过发射并接收对方物体反射回的红外线来计算时间差，并依据信号的强弱及波长的不同分析出待测目标与信源的距离及其性质。由于人类肉眼感知不到红外线，因而相对于激光，其具有强隐蔽性。与微波测距相比，具有抗电磁干扰的优点。红外线测距在技术上难度不大，构成的测距系统成本低廉，但是在恶劣的天气和长距离探测方面仍然不够理想。

### (3) 超声波测距

超声波通常指频率在20kHz以上的机械波,具有穿透性较强等特点。超声波测距是利用超声波在空气中的定向传播和固体反射特性(纵波)来进行距离测量的[28-32]。其具有成本低廉、质量轻、体积小、易于装卸等优点。相对于其它测距方法,超声波测距不易受到环境光线、电磁波、粉尘、障碍物阴影、表面粗糙度、裂缝等外界环境条件的影响,对恶劣的工作环境具有一定的适应能力。超声波测距对于远距离的障碍物会由于反射波过于微弱,而使灵敏度下降。故超声波测距的测量范围通常是几十厘米到几十米,适合短距离测量场合。

超声波测距系统是依据声速测量距离的,因此存在一些固有的缺点:超声波的方向性差,发散角大;需要传播媒介,无法用于真空环境中;温度梯度较大的时候会造成声速的变化;超声波的传播速度是几种测距系统中最慢的,无法进行快速测量响应;会受到工作环境噪声的影响。

### (4) 微波测距

微波通常是指频率在300MHz~3000GHz的电磁波。微波测距是利用微波作载波来进行精密测距。其操作简便,测距精度较高,测程可达10公里以上。微波测距在原理上和前述几种测距系统类似,但它克服了其他几种测量系统的缺点。于是,基于微波的测距技术便成为国内外的研究热点,具有重要的应用前景。

微波测量的主要优点有:

(a) 稳定的测量性能。其测量性能不受被测物体表面形状、颜色等的影响。

(b) 良好的环境适应性。微波的穿透能力很强,其测距精度受雨、雪、雾及阳光等天气因素和杂音、污染等环境的影响较小,可以保证在任何天气下的正常运行。

对上述各种测距系统在技术性能上作比较,如表1.1所示。从表1.1中可以明显看出:微波测量比其他测量方法具有更大的优越性。在远距离和不利的天气条件下,其它类型的传感器都很难达到微波的测距性能。例如激光方式和红外线方式容易受到天气和环境等干扰的影响;超声波方式有探测距离上的限制。而微波具有稳定的测量性能和良好的环境适应性,受雨、雪、雾的干扰小,可以适应各种天气变化。同时,微波测距系统不仅可以测量目标距离,而且还可以测量目标物体的相对速度

及方位角等参数。此外，在相同的测量条件下，微波测距系统结构简单、分辨率高、天线部件尺寸小。

表1.1各种测距方式的技术性能比较

|                 | 激光 | 红外线 | 超声波 | 微波 |
|-----------------|----|-----|-----|----|
| 测量距离            | 远  | 一般  | 近   | 远  |
| 目标识别能力          | 一般 | 差   | 差   | 好  |
| 硬件成本            | 一般 | 低   | 低   | 低  |
| 温度稳定性           | 高  | 一般  | 低   | 高  |
| 恶劣天气适应性         | 差  | 差   | 差   | 强  |
| 受湿度/粉尘等<br>环境影响 | 大  | 大   | 一般  | 小  |

### 1.3 微波测距技术的发展背景及其应用现状

由于微波测距方法的诸多优点，使得微波测距得到了比其他测距方法更加广泛的应用。微波测距系统主要是指利用微波信号对目标坐标位置的距离进行快速的非接触式自动测量，也可以包括对目标的方位角、俯仰角的测量等。这些测量都是建立在对目标回波信息测量的基础上。例如，目标距离的测量即是测量目标回波相对于发射信号时刻的延迟量，目标角位置测量即是目标回波到达时刻系统天线波束指向位置的测量，等等。而利用微波波段电磁波探测目标的电子设备则称为雷达。

1864年，麦克斯韦尔提出电磁波的存在，建立了麦克斯韦尔电磁方程，为后来雷达的诞生和发展奠定了理论基础。1886年，赫兹通过电磁波实验，证实了电磁波的真实存在，为雷达的诞生和发展奠定了实验基础。1922年，马可尼提出用电磁波探测物体。20世纪30年代是雷达诞生的年代<sup>[33, 34]</sup>，陆续研发了一批雷达系统。20世纪40年代，雷达探测技术诞生。第二次世界大战期间，美国研制了用于火炮控制的SCR-584雷达，实现了对空中飞行目标的连续自动跟踪测量和对火炮射击的控制。

其角测量精度大约是 2 毫弧度，距离测量精度为几十米，属于中等精度雷达。20 世纪 50 年代后期诞生了精密雷达。1956 年，美国首台高精度的采用单脉冲技术的雷达研制成功，开创了精密测量雷达广泛应用及发展的时代。

现在雷达测距系统不仅仅只是用于军事需求，它已经深入到许许多多的民用场合。下面列举几个雷达测距在国民经济领域的主要应用：

1. 用于直升机的高度计[35-37]。
2. 用于综合交通管制和车辆测速[12-16]。
3. 工业生产控制[9-11]。
4. 用于地图测绘[38]。
5. 汽车防撞系统[17-19]。
6. 对沿海目标的测量[5-8]。
7. 飞机的着陆系统[3][4]。
8. 气象观测[39-41]。

微波测距根据应用场合的不同，在测距算法上对最大测量距离、最小测距精度和测距时间的侧重点会有所不同。例如对于工业生产控制、直升机高度计则要求测量精度高，对于地图测绘、沿海目标测量则要求测量距离远。这三个参数之间互相制约，虽然在某些情况下可以互相转化，但是最小测距精度却一定是最主要的研究问题。这是因为如果能够实现高测距精度，那么可以通过参数转化，牺牲测距精度来提高测量距离或测距速度，使之也可以适用于需要测量距离或测距速度而测距精度要求不高的场合。反之，也可以通过参数转化，牺牲测量距离或者测距速度来提高测距精度，但是这种提高测距精度的方式并不是无限制地改善测距精度，它主要是受到硬件设备精度的限制。当测距结果受到硬件条件限制后，要想继续改善某个参数以达到应用需要，就必须从测距算法上来做根本的改变。

微波测距系统的应用领域越来越广泛，在许多应用中要求其体积要足够小，以便于安装在各种环境中，与其他系统配合使用。例如在车辆防碰撞系统中，车体上给雷达测距系统的空间十分有限。或者需要在不同地点进行使用，则需要小型便携式结构。雷达测距系统包含了发射、接收、信号处理三大部分。每个部分又由许多



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