

北京邮电大学

本科毕业设计(论文)



题目: 低误报微波红外双鉴探测系统的算法实现

姓 名 谭 韬

学 院 电子工程学院

专 业 电子科学与技术

班 级 2014211208

学 号 2014211001

班内序号 13

指导教师 李秀萍

2018 年 1 月

低误报微波红外双鉴探测系统的算法实现

摘 要

随着百姓生活质量的提高，对家居安防上的需求也在相应的增长。传统的单红外或单微波探测器已经不能满足人们对低误报率和稳定性的需求。因此，需要借助微波红外双鉴探测系统这种复合探测技术，降低产品的误报率，提升产品的可靠性。

本文针对低误报微波红外双鉴探测系统的算法实现进行研究，主要工作如下：

首先，针对微波红外双鉴探测器的小型化需求，设计软件支持系统。该系统的设计以驱动双鉴探测系统为目的，同时兼顾采样和处理数据的功能。作为硬件和软件算法之间交流的中介，该套系统能够完成微波模块的驱动和解调脉冲的产生，完成红外和微波解调信号的采样以及采样数据的传送功能，并且能用中断方式产生稳定驱动解调脉冲来降低微波探测系统的噪声，以降低误报率。

其次，分别针对微波探测系统和红外探测系统，研究其在典型目标下的响应，并据此设计相应的区分人及非人目标的在单片机上实现的增强幅度门限算法。该算法运用于微波探测系统，基于时域结果进行分析，并在传统固定门限上增加频率门限，达到降低非人目标引起的误报率的效果。同时，该算法还能够在探测区域内达到“一步探测”的效果（即人只要在有效探测距离内动一步探测器就能发出警报）。红外探测系统的算法也使用了时域分析方法，能够达到区域内人体移动报警的效果。

最后，根据分别设计的算法，再使用联合探测的方式将两个探测系统用“与门”逻辑连接起来。红外探测系统和微波探测系统能够互相补充对方误报率高的缺点，因此联合算法能够显著降低误报率，达到在同类产品中低误报的效果。

关键字 微多普勒效应 热释电效应 单片机系统 双鉴探测器 门限探测法

Realization of low false positives microwave/infrared detector

ABSTRACT

With the improvement of people's life quality, the demand for home security is correspondingly increased. The traditional single infrared or single microwave detector can no longer meet people's demand for low false alarm rate and stability. Therefore, we need to use microwave infrared two threads detection system which also be known as two threads detection technology to reduce the false alarm rate, improve product reliability.

In this paper, low false alarm microwave infrared two threads detection system algorithm research, the main work is as follows:

First, for the miniaturization needs of microwave infrared dual-detector, design software-driven system. The system is designed to drive the tow threads detection system for taking into account the function of sampling and processing data. As a medium of communication between hardware and software algorithms, the system can accomplish the driving of the microwave module and the generation of the demodulation pulse, complete the sampling of the infrared and microwave demodulation signals and the transmission of sampled data, and can generate the interrupt by means of interruption Drive the demodulation pulse to reduce the noise of the microwave detection system to reduce the false alarm rate.

Secondly, the microwave detection system and the infrared detection system are respectively studied to investigate their response under the typical target. Based on this, the corresponding enhancement threshold algorithm for distinguishing between human and non-human targets in SCM is designed. The algorithm is applied to the microwave detection system, based on the time-domain analysis, and increases the frequency threshold on the traditional fixed threshold to reduce the false alarm rate caused by inhuman targets. At the same time, the algorithm can also achieve the effect of "one-step detection" within the detection area (i.e., an alarm can be issued by simply moving the probe within the effective detection range). The algorithm of infrared detection system also uses a similar method of time domain analysis, to achieve the effect of human movement alarm in the area.

Finally, the two detection systems are combined with "AND" logic according to the designed algorithm and the joint detection system. Infrared detection system and microwave detection system can complement each other false alarm rate shortcomings, so the use of joint detection system for reducing the overall system false alarm rate is of great significance. At the

end of this paper, compares the results of the actual test of this algorithm with the performance of other similar products, and shows the superior performance of the low false positive infrared/microwave algorithm in reducing false alarm rate.

KEY WORDS micro-Doppler effect pyroelectric effect SCM system double threads detector threshold detection method

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究的背景及意义	1
1.2 国内外发展及研究现状分析	1
1.3 论文的主要工作及内容安排	2
第二章 探测原理	5
2.1 引言	5
2.2 多普勒效应	5
2.3 连续波雷达探测原理	6
2.4 热释电红外传感器探测原理	7
2.5 菲涅尔透镜	8
2.6 本章小结	9
第三章 微波红外双鉴探测器软件支持系统	10
3.1 引言	10
3.2 PIC16F1828 单片机	10
3.2.1 PIC16F1828 单片机的引入	10
3.2.2 PIC16F1828 单片机的硬件接口电路	10
3.2.3 PIC16F1828 单片机软件开发环境	11
3.3 红外微波双鉴探测器的软件支持系统设计	11
3.3.1 整体流程	11
3.3.2 微波探测系统	13
3.3.3 红外探测系统	15
3.3.4 报警显示系统的设计	16
3.3.5 红外微波双鉴探测器上位机系统的设计	16
3.4 本章小结	16
第四章 典型目标的微波探测模型	17
4.1 引言	17
4.2 人体模型	17
4.2.1 人体步态多普勒的模型	17
4.2.2 实际中测试的结果分析	18
4.3 树叶影响模型	24
4.3.1 树叶的多普勒模型估计	24

4.3.2	实际中的测试结果分析.....	24
4.4	衣物模型.....	26
4.4.1	衣物的多普勒模型.....	26
4.4.2	实际中的测试结果分析.....	26
4.5	复杂室外环境模型.....	29
4.5.1	复杂室外环境综合模型分析.....	29
4.5.2	实际中的测试结果分析.....	29
4.6	本章小结.....	31
第五章	典型目标的红外探测模型	32
5.1	引言.....	32
5.2	人体模型.....	32
5.2.1	人体移动的红外探测结果估计.....	32
5.2.2	实际探测结果分析.....	35
5.3	白光模型.....	37
5.3.1	白光对红外探测结果的影响.....	37
5.3.2	实际探测结果分析.....	37
5.4	本章小结.....	37
第六章	微波探测系统算法设计	39
6.1	引言.....	39
6.2	幅度门限.....	39
6.3	频率门限.....	40
6.4	实验结果分析.....	41
6.5	本章小结.....	42
第七章	红外探测系统算法设计	43
7.1	引言.....	43
7.2	幅度门限.....	43
7.3	实验结果分析.....	43
7.4	本章小结.....	44
第八章	微波红外联合探测系统	45
8.1	引言.....	45
8.2	算法设计.....	45
8.3	实验结果.....	46
8.4	本章小结.....	47
第九章	总结与展望	48
9.1	总结.....	48

9.2 展望.....	48
参考文献	49
致 谢	51

第一章 绪论

1.1 研究的背景及意义

近年来，随着百姓安防意识的提升和对家居安防方面要求的提高^[1]，被动红外探测器由于其体积小、成本低、功耗低等优势，被广泛应用在安防领域^[2]。但是单纯的被动红外探测器，容易受到白光、热风等温度变化剧烈的干扰源的影响而产生误报。同时，市面上又出现了一种探测器，使用的是单纯的雷达探测技术，通过检测防区内有无移动的目标来确认是否报警。但这种探测器也存在严重问题，比如防区内如果有衣服摆动、风扇转动或者一些机器在振动的话，探测器很容易认为探测区域内有人在走动，触发雷达探测器报警，从而引发误报。基于这两种探测器的优劣，满足在衣物、电磁波以及白光、振动的非目标物体的干扰下能够正确识别检测目标信号，达到低误报率、较低漏报率的效果的要求，本文研究出一套用于红外微波双鉴探测器的算法。使用该算法的探测器，具有功耗低、低误报等特点，可以满足民用产品对安防设施的需求。

1.2 国内外发展及研究现状分析

目前市场上的产品以两种路线为主，一种是用于更低成本的单纯红外探测器或者单纯的微波探测器，另一种是使用复合技术的微波红外双鉴探测器。根据参考文献所述，单纯的红外探测器，分为主动式和被动式两种^[3]。主动式红外探测器由发射机和接收机两部分组成，发射机发射红外信号，接收机接收调理红外信号^[4]，当有物体穿越防区就会对红外的发射接收过程产生遮挡，利用这个遮挡引起的接收机上红外辐射水平的变化来报警。其探测器在恰当的摆放时，能够有效的形成一个闭合空间。但是当期望保护的空間加大，需要的探测器的数量以及体积就会成倍的增长，且其受环境的影响较大，成本较高。一种典型的主动式红外探测器^[5]如图 1-1 所示：



图 1-1 一种典型的主动式红外探测器

本文经过成本的考量，以及红外微波双鉴探测器的小型化和部署的简单化的需求，放弃主动式红外探测技术而使用被动式红外探测手段。被动式红外探测器是依靠检测防区内平均红外辐射水平变化而产生输出变化，经过信号调理后产生报警信号。目前单纯的红外探测器难以区分出人和假目标，尽管市场上已经有使用菲涅尔透镜来降低误报率

和提升探测距离，但实际上的效果仍然不尽人意。尽管如此，单红外探测器仍然由于其低廉的价格和成本而占据着不小的市场。单纯的微波探测器则因为雷达的误报率更高而较为少见。

目前市场上主要使用的复合技术探测器为微波红外双鉴探测器^[6]。这种探测器其实是分别同时使用微波探测器和红外探测器，将其封装在一个探测器里面，并把两套探测系统的报警输出用一个“与门”逻辑连接到一起。这种探测系统是一种互补型的探测系统，利用红外探测系统探测目标的红外辐射变化（也就是温度的变化），用雷达探测系统探测目标的移动，刚好互相弥补了红外探测系统不能分辨目标是否移动和雷达探测系统不能分辨目标是否有温度上的变化的缺点，以此获得较低的漏报率和误报率^[7]。

经过本文的测试和大量的研究发现，市场上的微波红外双鉴探测器，虽然利用联合报警消除了不少干扰，但是其对树叶、宠物和衣服等假目标的防误报做的仍然不足。有的产品甚至是防区内有一点振动就会触发微波探测系统的报警，再加上红外探测系统本身容易收到环境干扰而产生误报，最终整个系统的误报率就会提升。

1.3 论文的主要工作及内容安排

本论文在前期阶段主要采用实验法，对目前市场上已有厂商的典型产品拿来进行分析研究，分析其电路结构、原理，并结合实际中的测试对其电路和报警算法作分析。同时采用文献研究法，对雷达原理相关的书籍、对微多普勒信号处理的相关书籍和参考文献进行查阅和分析，了解雷达探测系统的原理和优劣势，对热释电红外探测器的相关文献作阅读、分析，了解红外探测器的优劣势，之后再对红外雷达联合探测的相关文献作考查，了解这种组合探测器的存在意义。前期研究结束后，采用观察法，对实际实验中的波形进行分析，并用模拟法预测人体的目标与非人体目标的区别，利用分析综合的方法从上述得到结论中归纳总结出具体可实现的算法，最后利用控制变量法对算法的实际效果进行分析和优化算法。

本论文全文共分为 9 章，主要结构图如图 1-2 所示

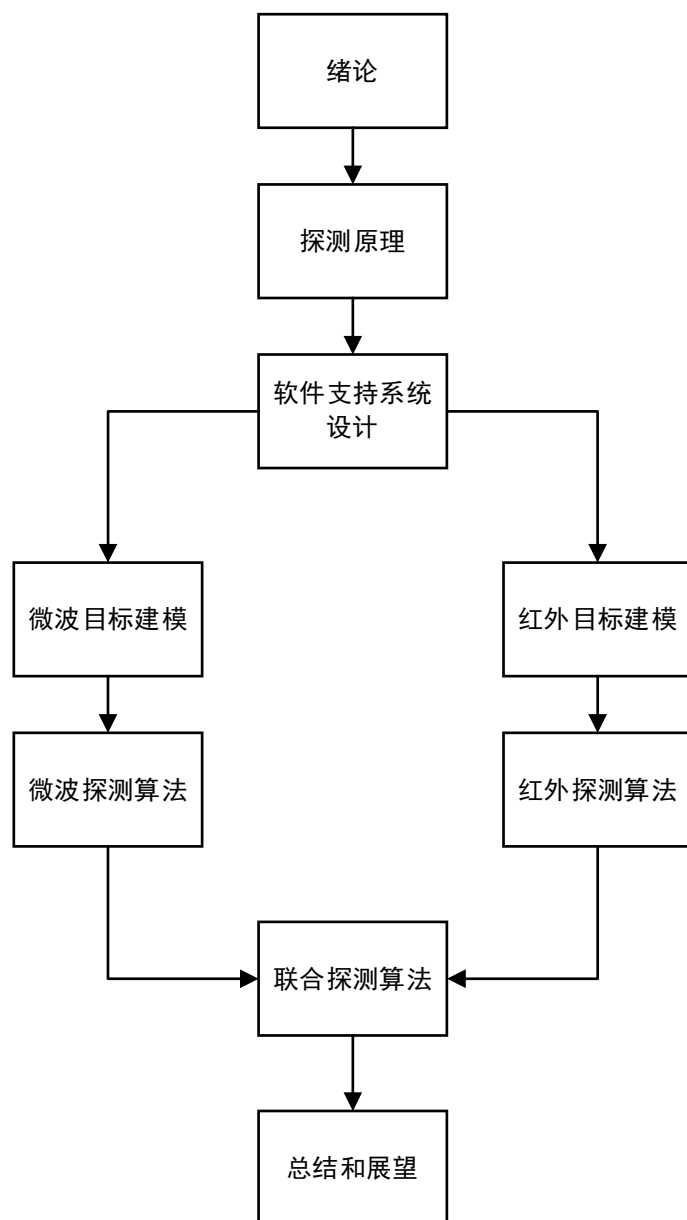


图 1-2 论文主体结构

第一章：绪论。主要阐述研究微波红外双鉴探测器算法的背景以及意义，阐述了市场上已有的产品，总结了当前国内外市场上的发展以及研究现状，并说明了本论文的主要工作以及内容安排。

第二章：探测原理。主要介绍微波红外双鉴探测其中微波探测的原理和红外探测的原理，介绍其探测组件的原理和功能，并说明微多普勒效应与雷达探测之间的关系。

第三章：微波红外双鉴探测器软件支持系统。主要介绍了本文所制作的微波红外双鉴器中的主要软件支持系统和单片机的实现，并分别介绍微波探测系统和红外探测系统如何对信号进行采样处理。另外还介绍了本文在研究过程中所使用的上位机。

第四章：典型目标的微波探测模型。本章主要通过分析几种典型状态下的微波探测模型，并根据实际探测的结果进行分析。主要包括人体的移动模型，树叶的飘落模型，

衣物的摆动模型和综合性的室外复杂环境的模型。

第五章：典型目标的红外探测模型。本章主要分析对红外探测系统影响最为严重的白光对红外探测结果的影响，以及人的走动的探测模型，并根据实际的结果进行分析。

第六章：微波探测系统算法设计。本章主要通过第四章的分析和测试结果确定出本文实际使用的微波探测系统的算法，并对其进行测试、比较。

第七章：红外探测系统算法设计。本章主要通过第五章的分析测试的结果确定出本文实际使用的红外探测算法，并对其性能进行测试和分析。

第八章：微波红外联合探测系统。本章主要介绍如何将上两章的微波、红外探测系统联合起来进行报警，给出其测试结果并对比其他同类产品的性能。

第九章：总结与展望。总结本文的研究内容，并展望后续的研究方向。

第二章 探测原理

2.1 引言

本文所研究的微波红外双鉴探测器最主要依赖于两种探测技术：微波探测技术与红外探测技术。要想明白不同的物体经过探测系统会得到什么样的结果，首先要了解其探测原理和手段。基于此，本章将分别探究微波探测系统和红外探测系统的基本原理。

2.2 多普勒效应

微波探测系统主要依赖于多普勒效应来进行检测和输出。多普勒效应（或称多普勒频移）是指相对于波源移动的观察者的波的频率或者波长的变化^[8]。能够引起多普勒效应的原因是指，当波源相对于观察者来说发生移动的时候，原本间隔时间相同的波峰却从不同位置向观察者发送，由于波在同一介质中有相同的传播速度，不同距离下同时发送的波会在不同时刻到达同一点，导致实际上每一个波峰从波源到达观察者的时间都不一样，进而有尽管波源的波峰发送间隔相同但观察者接收到的波峰的间隔不同的现象，反应在频率上则表现为频率的变化。这样的频率变化就被称作为多普勒频移，这样的一种效应就被称作多普勒效应。多普勒效应也可以用数学公式推导出来。现在反过来假设，假设这里的波源为雷达，观察者距离波源的初始距离为 R_0 ，沿波源的径向以速度 v_0 离开波源，那么其距波源的距离可以表示为

$$R(t) = R_0 + v_0 t \quad (2-1)$$

如果假设波源的载频频率为 f_0 ，那么波源的发射波可以表示为

$$s_T = G_T e^{j2\pi f_0 t} \quad (2-2)$$

其中 G_T 为发射波的增益。当波遇到观察者时会反射回来，此时的反射波可以表示为

$$s_r = \rho G_T e^{j(2\pi f_0 t + \varphi_d(t))} \quad (2-3)$$

其中的 $\varphi_d(t)$ 就是产生的多普勒相位偏移， ρ 为反射波的幅度变化。在经典物理学中，波源和观察者之间的相对速度要远远低于波在介质中的传播速度，那么观察到的频率与载频间的关系可以由下式给出

$$f = \left(\frac{c + v_r}{c + v_s} \right) f_c \quad (2-4)$$

其中 c 为光速， v_r 为观察者相对于介质的速度，当观察者远离波源时这个速度为正值。 v_s 为波源的运动相对于波传播所在的介质的速度，当波源是逐渐远离观察者的这种运动方向时这个速度取正值。那么运用在这里则波源收到的回波频率为下式

$$f = \left(\frac{c + 2R(t)}{c} \right) f_0 \quad (2-5)$$

那么这里的多普勒相位偏移就可以表示为

$$\varphi_d(t) = \frac{4\pi R(t)f_c}{c} \quad (2-6)$$

多普勒频移可以由相位偏移求导得到

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_d(t)}{dt} = \frac{2v_0}{\lambda} \quad (2-7)$$

本文所研究的对象所产生的雷达回波，除了上述的平动外还有许多复杂的转动和微小的振动，这些微小的振动所产生的多普勒频移被定义为微多普勒^[9]。微多普勒反应了目标的精细化的运动特征，对不同的目标来说其微多普勒效应是具有唯一性的。

2.3 连续波雷达探测原理

微波探测系统的基本组成是连续波雷达^[10]。连续波雷达的原理是依靠雷达发射连续电磁波，再将回波与发射波相混频后得到解调的多普勒信号^[11]。本文所研究的微波红外双鉴探测器使用的是最在连续波雷达的基础上，利用间断式驱动来达到收发一体的脉冲连续波雷达。该连续波雷达的基本框架由图 2-1 所示

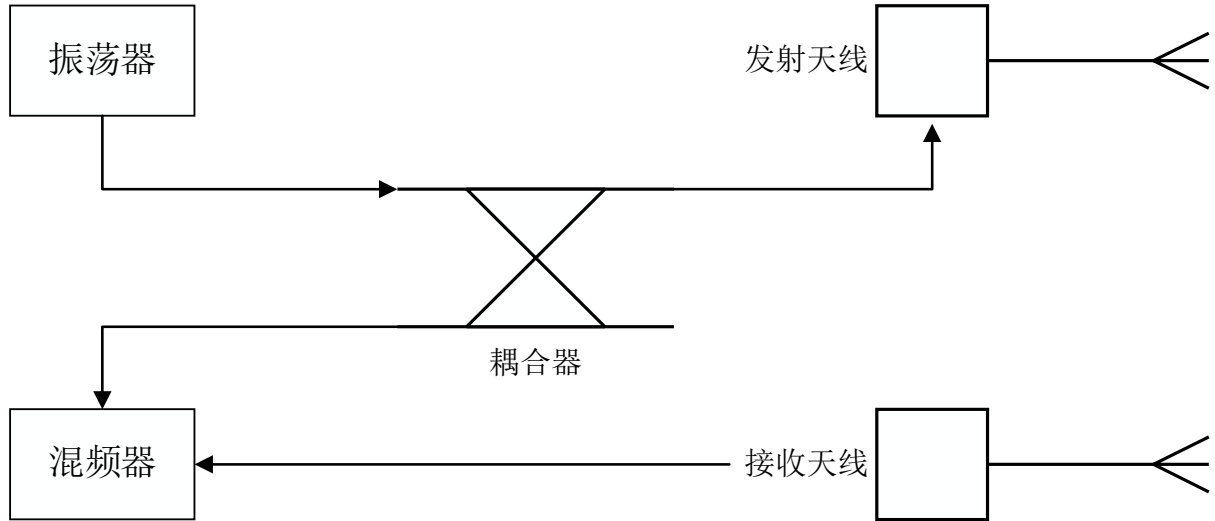


图 2-1 连续波雷达的基本框架

振荡器用以产生中心频率在 10.525GHz 的电磁波。该电磁波要经过一个耦合器，第一条路径是直接将电磁波传送给发射天线，由发射天线将电磁波传送到空间中形成雷达波束。雷达信号遇到物体反射后会被接收天线接收，该接收到的信号与耦合器耦合得到的发送信号一起被送入混频器中混频。这里假设一种发送信号为下式

$$S_{send} = \sin(2\pi f_c t) \quad (2-8)$$

经过运动物体反射回来带有多普勒效应的接收信号可以由下式表示

$$S_{receive} = \sin(2\pi f_c t + \varphi(t)) \quad (2-9)$$

其中 $\varphi(t)$ 为多普勒效应引入的多普勒相移。经过混频器混频后，输出信号可以由下式表示

$$S = \frac{1}{2} \cos(\varphi(t)) - \frac{1}{2} \cos(4\pi f_c t + \varphi(t)) \quad (2-10)$$

从式 2-10 可以看出，混频器的输出包括一个单纯的多普勒频移分量和一个具有二次载频谐波的分量。雷达模块的基带处理电路中会有一个等效低通滤波器，可以滤除高次谐波分量得到只包含多普勒效应的分量。本文所使用的雷达探测算法将以这里提到的多普勒效益分量作为雷达原始信号的输入。

2.4 热释电红外传感器探测原理

红外探测系统主要由热释电红外传感器（PIR）^[12]组成。热释电红外传感器主要依靠探测总体的红外辐射水平的变化来判断是否存在目标^[13]。红外传感器的主要构成如下图所示

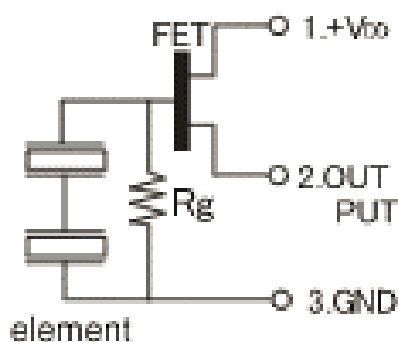


图 2-2 热释电红外传感器的主要结构^[14]

其工作原理是利用热释电效应，即用电极把某种特殊晶体的上下表面连接到电路中，这种特殊的晶体可以感受其表面温度的变化。当外界的红外辐射量发生变化时，晶体内部的原子排列将受温度变化而变化，从而产生极化电荷，这些极化电荷会在晶体的两端产生一些电势差^[15]。这些电势差可以被红外传感器内部的 FET 管转化为电流的变化输出给外部电路进行调理。其中，热释电红外传感器的表面通常会有一个窗口用来接收红外辐射，窗口上通常会放上一个光学透镜，这个光学透镜只允许波长在 10μm 左右的红外线（这个正好是人体辐射的红外线的波长^[16]）通过，从而有效的抑制其他波长的红外线对晶体表面温度的干扰。图 2-2 所示的探测器中有两个感应红外线的晶体，通常这两个晶体的极性是正好相反的，这样做的目的是利用两个晶体求其差值，当由于环境温度的变化而引起两个晶体的电压差变化趋势相同时将会使总体的输出没有变化，而当有人或者其他较小目标经过时两个晶体上感受的红外辐射不同，极性相反而使差值扩大，就可以将这个差值通过放大调理电路输出得到想要采集的红外信号。

本文所使用的热释电红外传感器为 D203B 其外观可如下图所示。



图 2-3 D203B 传感器实物图

一般的红外传感器，感应到的信号变化速率是很慢的。据 D203B 数据手册，其典型的传感器信号调制频率在 0.3~3Hz 之间。

2.5 菲涅尔透镜

单纯的红外传感器其距离较近，通常只有几米的范围。这里可以由数据手册中得知

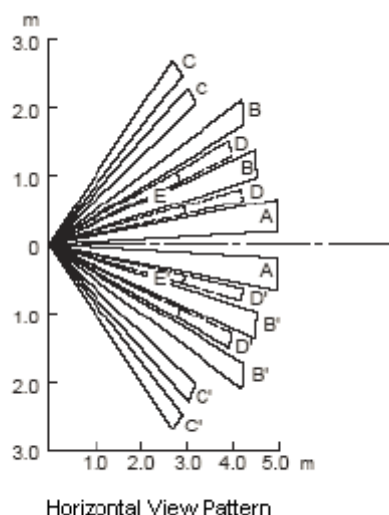


图 2-4 D203B 的红外探测距离

要想增加红外探测系统的探测距离和探测灵敏度，需要借用菲涅尔透镜。

菲涅尔透镜本质上为传统的凸透镜，作用都是使光汇聚到一起^[17]。但是菲涅尔透镜在传统凸透镜的基础上，在保持了聚光的作用的基础上并尽可能多的减少了光学材料的消耗，从而降低了加工的材料成本。菲涅尔透镜由两个面组成，一面是光滑的表面，另一面则是由半径不同的同心圆构成^[18]，如图 2-5 所示。

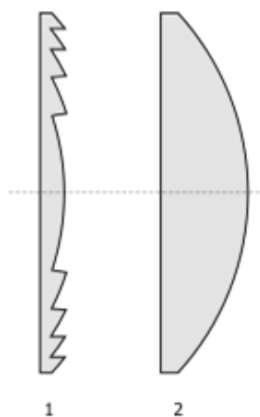


图 2-5 菲涅尔透镜源传统凸透镜

这些同心圆在圆内保持了凸透镜的弯曲角度，使得透镜仍然具有汇聚光的作用。

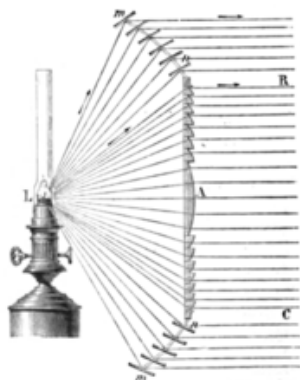


图 2-6 菲涅尔透镜的聚光作用

图 2-6 表明了这些聚光作用的原理。

同时，由于这些同心圆的表面不连续，存在一些“非工作面”，当光透过非工作面时不能汇聚到焦距处，导致菲涅尔透镜的成像存在“明区”、“暗区”的特点。

红外探测器刚好需要菲涅尔透镜的这两个特性。菲涅尔透镜的聚光作用使得远处的红外线能被聚焦到热释电红外传感器的探测窗上，以此增加探测的距离^[19]。另一方面，由于菲涅尔透镜的明暗分区作用，使得红外辐射的热源（例如人）从探测器的探测区域穿过时，会跨越菲涅尔透镜的明区和暗区，增强投射在热释电红外探测器上的红外辐射量的变化，从而进一步增强热释电红外传感器输出的能量强度，便于后端的信号处理。

2.6 本章小结

本章引入的多普勒效应，作为雷达探测的基本原理，解决了雷达回波信号所遵循的基本原理是什么的问题。引入热释电红外传感器的原理，作为解决红外探测系统的基本原理和探测思路，同时由于红外探测器的种种弊端，出于成本和性能的考虑又引入菲涅尔透镜来增强红外传感器的探测效果。

第三章 微波红外双鉴探测器软件支持系统

3.1 引言

本文所研究的微波红外双鉴探测器，其面向的是民用产品，要求探测系统具有小型化、轻便性、隐蔽性好的特点。因此，探测器需要借助单片机来驱动和控制整个系统，而这一套驱动和控制系统的坏会直接影响探测系统的准确性和可靠性。本章将要研究和设计的就是探测系统的整体软件驱动。此外，为了便于后面的研究，本章还设计了相应的上位机系统用于采集和处理数据。

3.2 PIC16F1828 单片机

3.2.1 PIC16F1828 单片机的引入

设计这样一套系统，首先分析软件的需求。安防系统中最重要的是产品的可靠性。对于探测器的系统来说，就要求单片机具有良好的稳定性和可靠性。基于此，PIC 系列的工业级别单片机能够满足可靠性的需求。该单片机具有 4 个定时器，其中有 1 个 16 位定时器和 3 个 8 位定时器，主频能够达到 32MHz。使用具有 49 条指令的精简指令集，具有 16 层硬件堆栈，能够高效率的执行代码。单片机具有一个 12 通道的 10 位 ADC，可以满足本文设计的采样需求。

3.2.2 PIC16F1828 单片机的硬件接口电路

单片机作为接驳微波和红外探测系统的关键部分，其硬件接口也需要详细设计。图 3-1 展示了该单片机的硬件接口：

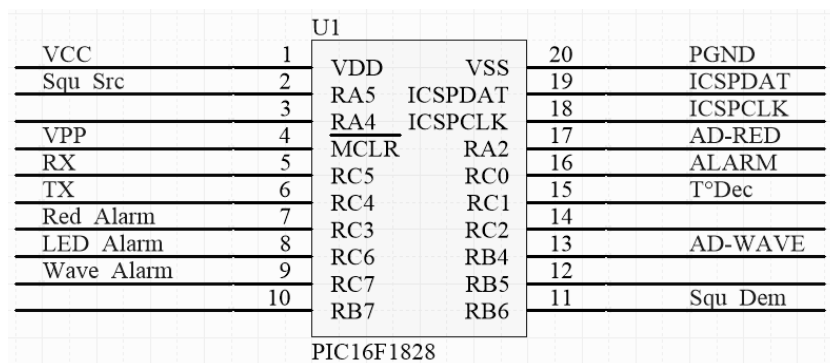


图 3-1 单片机的硬件接口

图 3-1 中，TX、RX 为与上位机通信的 UART 接口，Squ_Src 是用来生成驱动雷达模块的窄脉冲。Red_Alarm、LED_Alarm、Wave_Alarm 为报警灯的输出接口，分别为红外报警系统（用绿色灯表示）、联合报警系统（用红色灯表示）、微波报警系统（用蓝色灯表示），Squ_Dem 是微波探测系统的解调脉冲输出口，AD-WAVE 为微波探测系统的采样端口，T° Dec 为温度采集口用来采集环境温度传感器的信号，ALARM 为报警输出用于整个探测器的报警输出口，AD-RED 为红外探测系统的采样端口，ICSPCLK、

ICSPDAT 分别为单片机下载程序、调试的接口。单片机采用 5V 电源供电。

3.2.3 PIC16F1828 单片机软件开发环境

PIC16F1828 使用的是 MICROCHIP 公司开发的 MPLAB X IDE 作为集成开发环境，采用基于 Oracle 的开源 NetBeans IDE，能够快速的使用各种开发环境和功能。整体的开发环境如下图所示

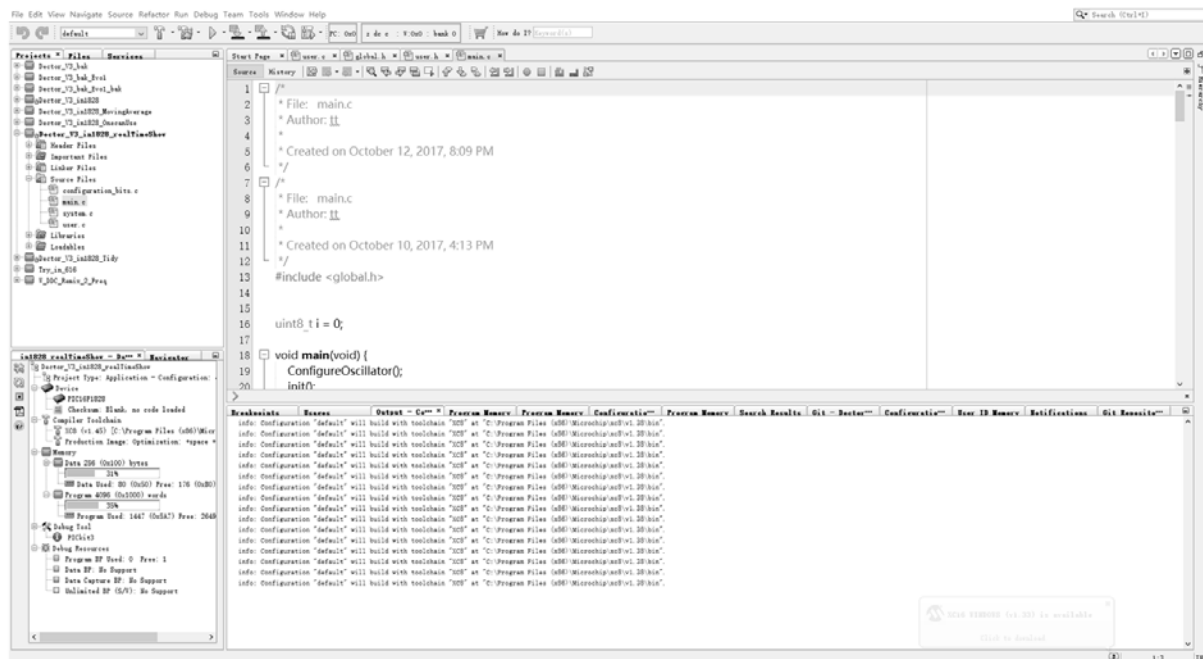


图 3-2 MPLAB X IDE 开发环境一览

开发环境的左上角为各个工程的管理界面，左下角为单片机内部资源的使用情况，中中间上方为代码的编辑区，下方是编译器的输出区。利用这个开发环境能够很方便的书写和调试单片机的代码，能够简单直观的配置单片机的各种不同的标志位。

3.3 红外微波双鉴探测器的软件支持系统设计

3.3.1 整体流程

整体的软件流程图可由下图所示

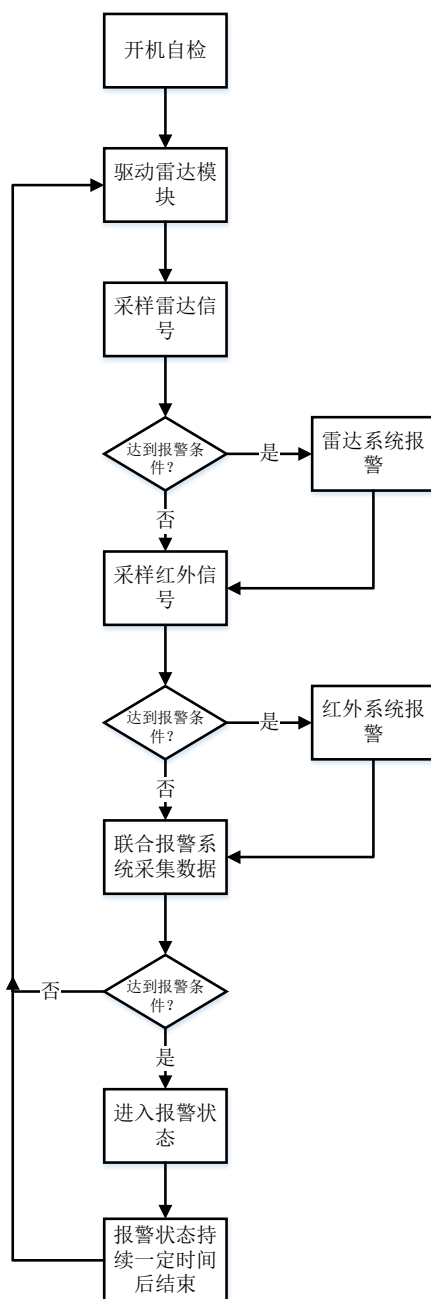


图 3-3 整体的软件流程

软件流程可以大体分为四个部分。第一大部分为开机自检。由于整套系统是单电源供电系统，额外的添加负电源转换模块会浪费成本而且给系统增加不稳定性，故需要这个直流偏置将雷达模块输出的探测信号的正负半周完整的取出来。自检中单片机系统将循环点亮各个报警灯，用以确认报警指示灯的工作状态是否良好。自检状态中单片机系统只对雷达模块提供解调脉冲保证采样系统的运作，而不提供驱动脉冲，目的是采样得到雷达中频放大解调系统的直流偏置。生产出来的每块板子，由于电容、电阻、有源器件等存在一定差异，这个直流偏置是会有变化的，需要单独采样。当雷达模块没有供电时，是不会有输出存在，这个时候就可以采样得到这个偏置。同时，会对温度探测器进行数据采样，用来实时动态调整红外探测系统的门限值。第二大部分为雷达系统的相关

操作。在这里将完成与雷达探测系统有关的驱动、解调、采样、报警处理等工作。第三大部分为红外探测系统的相关操作，包括了采样以及报警处理。第四大部分为联合报警系统的相关处理，当达到联合报警的要求时，联合报警系统会将整个系统转入报警状态并持续一定时间，超时后退出报警状态并返回第二部分开始新一轮的处理过程。

3.3.2 微波探测系统

本文所使用的雷达模块是连续波雷达，为了方便解调以及节省探测器的电源开销（据参考文献所述使用脉冲供电方式可节省电源开销 98%^[20]），雷达模块使用间歇性的工作方式工作，即雷达模块的驱动和解调都是使用脉冲方式进行。在实际的雷达探测系统测试中，分别利用频率为 500Hz、1.98KHz、4KHz 的占空比为 5.8% 的脉冲驱动和解调雷达模块，对比结果后发现，使用 1.98KHz 频率的脉冲得到的雷达信号解调的脉冲最佳。

软件中，利用定时器 1 作为这个解调脉冲的产生器。高电平和低电平分别往寄存器中设置不同的初始计数值，来达到高电平和低电平持续时间不同的效果，模拟出理想的脉冲。根据实际的硬件电路，这里得到的驱动和解调脉冲可以由下图表示出来。

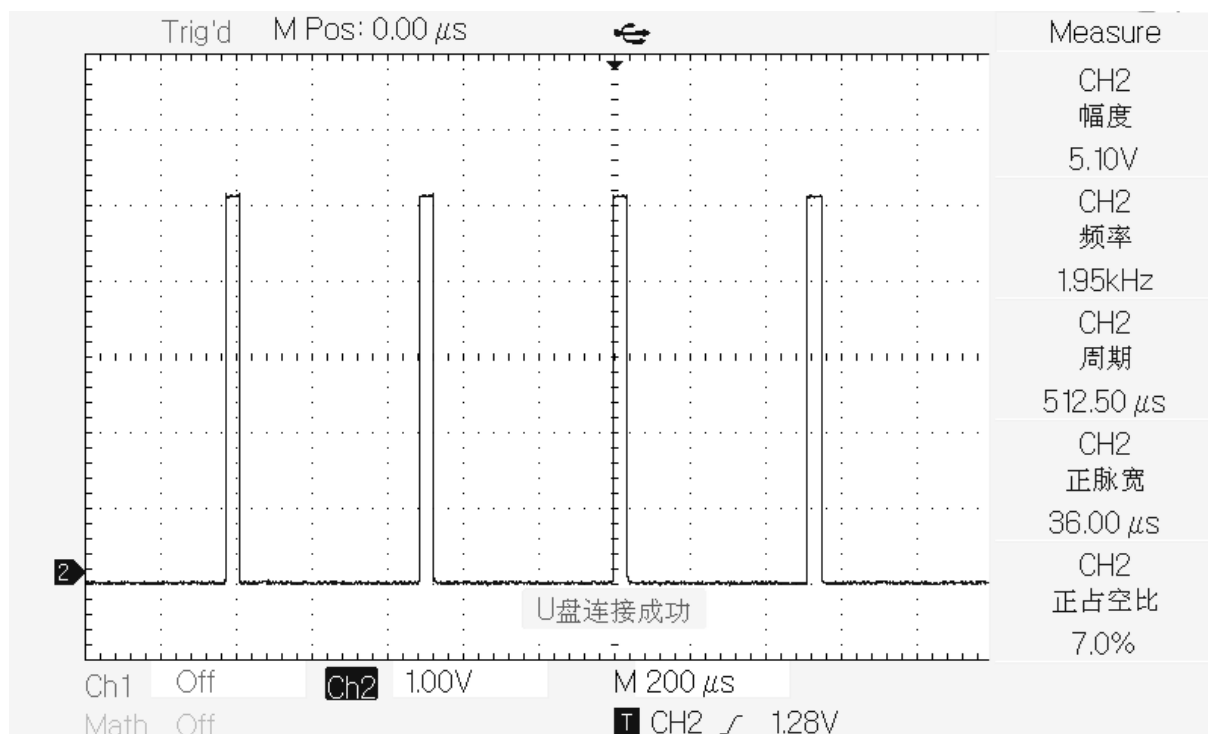


图 3-4 驱动脉冲实测图

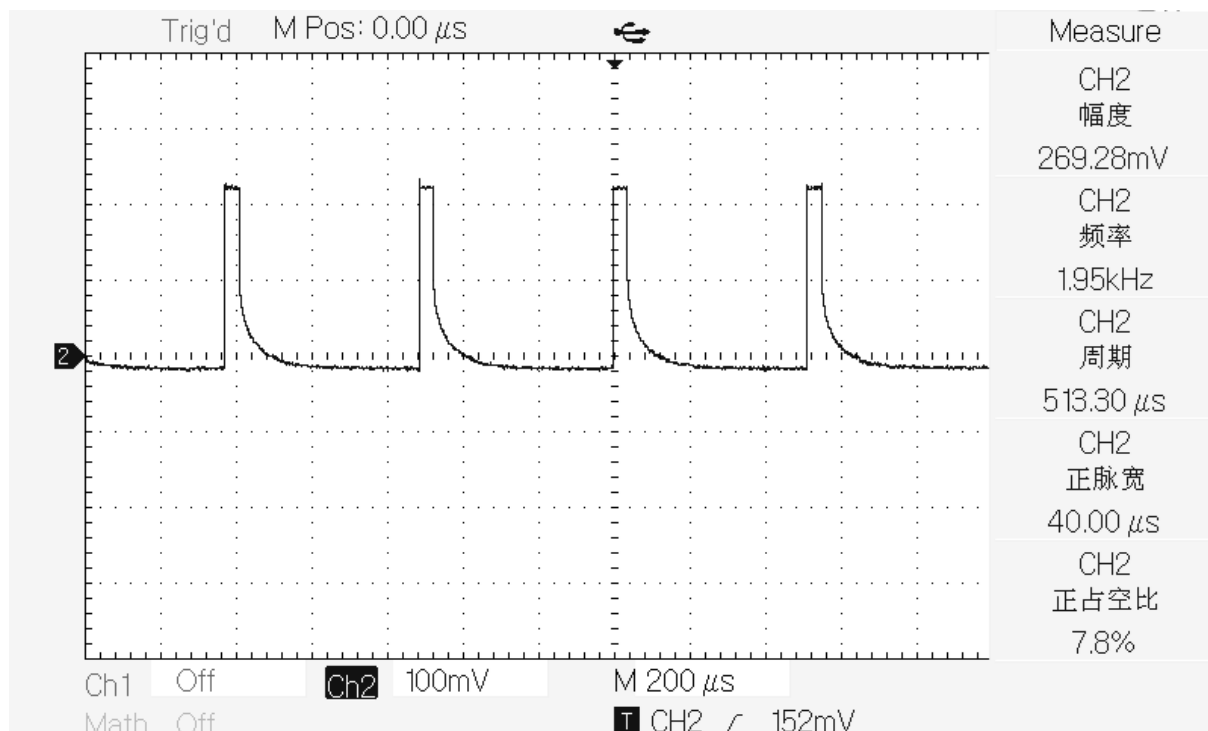


图 3-5 解调脉冲的实测图

图 3-4 与图 3-5 中测试的标称结果与设定结果略有出入，这是与示波器的算法有一定关系，当观察长度变化时标称的数值也会有变化。另外，这还与单片机的内部振荡器的精度有关系。

从图 3-5 中可以看出解调脉冲整体的时长在 500 μ s 左右。其中高电平的持续时间为 40 μ s，低电平的时间为 470 μ s。雷达的采样过程在高电平期间不工作，当驱动脉冲由高电平转为低电平时，采样系统开始工作。整个 ADC 转换、采样时间需要 11 个 ADC 周期，依据数据手册的要求，每个 ADC 周期的时间在 1 μ s~4 μ s 之间，考虑到实际单片机中时钟可能出现的为误差，这里选用 2 μ s 作为 ADC 周期，故整个 ADC 过程需要 22 μ s。接下来将采样得到的数据，与报警门限作比较，超过门限则报警，不超过门限就执行下一步的操作。

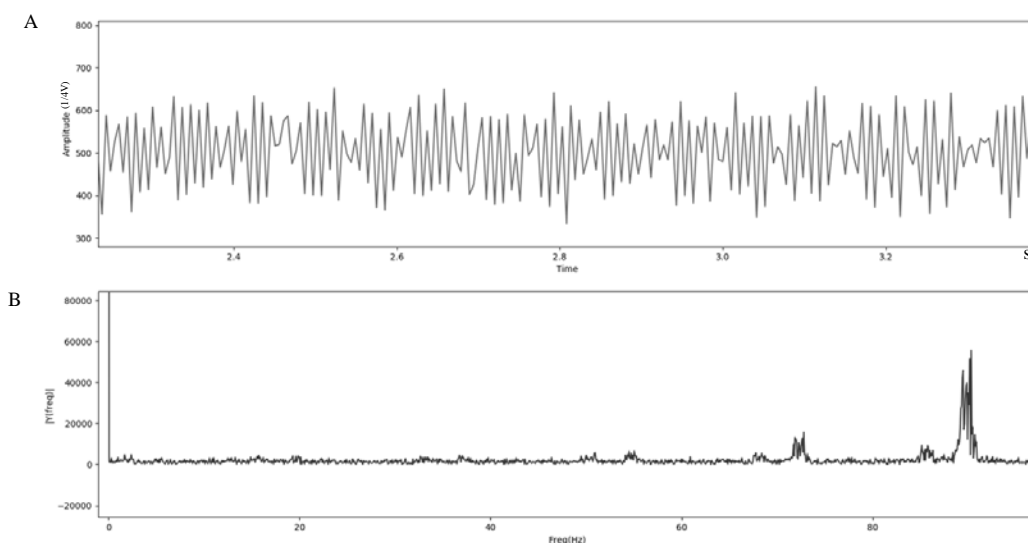


图 3-6 A 不稳定驱动下的雷达解调输出时域波形

B 不稳定驱动下的雷达解调输出的 FFT 结果

雷达的驱动解调脉冲的稳定性与雷达输出波形有很大的关系。当雷达的驱动解调脉冲占空比不稳定时，解调输出的波形会出现明显的噪声干扰如下图所示。图 3-6A 为实时时域波形，图 3-6B 为时域波形的 FFT 结果。

这个噪声干扰达到一定程度后会导致雷达系统的误报。故本文中的软件设计将雷达的驱动解调脉冲最为最高优先级进行设计和设计。在本文设计的软件支持系统下，微波红外双鉴探测器能够达到最低的误报率。

3.3.3 红外探测系统

红外探测系统主要由两个主要步骤构成，一个是采样温度校准门限，另一部分是依据校准后的门限判决是否需要红外系统的报警过程。

由于热释电传感器是将红外辐射转换为电压的元件^[21]，红外辐射具有变化相对缓慢的特点故其输出信号也是变化缓慢的信号，这里设计红外探测系统的采样时刻为每 10 次雷达探测系统处理结束之后，也就是雷达驱动的低电平期间。

红外探测系统首先采集温度探测器的信号。温度探测器用来检测环境温度。红外探测系统的输出幅度与人的红外辐射强度与背景红外辐射强度的差值有关系，而背景红外辐射强度则与环境温度息息相关，当环境温度与人的温度相近时，人的走动所产生的辐射水平变化会变得很小，相应的输出的红外探测信号也会变得很小。故程序中设定两种门限值，当感应到环境温度不同时自动切换相应的门限。

接下来红外探测系统将采样红外探测器的解调放大后的波形，采样周期与雷达探测系统的采样周期相同，都是 22us。之后将采样得到的数据与门限对比，达到报警门限则进行报警输出，否则执行下一步的操作。

3.3.4 报警显示系统的设计

报警的显示系统主要由三种颜色的灯组成。绿色代表红外探测系统的报警，蓝色代表微波探测系统报警，红色代表联合报警的系统的报警，指示最终是否有报警输出。LED灯由单片机的 IO 口直接驱动，根据数据手册的要求，灯的点亮和熄灭操作遵循“读取——修改——写入”的原则。

另外，最终的报警输出为保证远距离传送的有效性采用了光耦隔离，驱动方式同上。

3.3.5 红外微波双鉴探测器上位机系统的设计

上位机系统依据 Python 语言书写，使用 PySerial、matplotlib 库分别作为通信和显示组件的库。

单片机与电脑之间的串口通行使用 UART 的连接方式，使用本文自己设计的一种无校验的数据格式

原始数据 高8位	原始数据 低8位	滤波数据 高8位	滤波数据 低8位	校准数据 高8位	校准数据 低8位	标识位 0x57	停止位 0x20	停止位 0x20
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

图 3-7 微波探测系统回传数据格式

原始数据 高8位	原始数据 低8位	标识位 0x52	停止位 0x20	停止位 0x20
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

图 3-8 微波探测系统回传数据格式

使用连续的两个数据位作为停止位是考虑到这里的数据都是 16 位的，而采样值最大为 1024 也就是 0x0400，不会出现 0x2020 这种组合，因此设定这样的停止位是合理的。标识位是用来标识所传送的数据是属于红外探测系统还是微波探测系统。

上位机接收数据并将数据整合还原，可以实时显示出微波探测系统和红外探测系统的状态，以及计算相应的实时 FFT 结果。

3.4 本章小结

本章所设计的单片机驱动系统以及上位机系统，解决了微波探测系统和红外探测系统的驱动和采样问题，使用了让探测器误报率最低的中断脉冲驱动办法，能够采集数据并且进行一些简单的分析，为后面的建模分析和数据处理打下了基础。同时设计的报警显示系统能够直观的输出报警信息便于处理。

第四章 典型目标的微波探测模型

4.1 引言

接下来，本文要为微波红外双鉴探测器设计算法。首先是微波探测系统。本文的主要目的是降低探测器在树叶、摆动的衣物等室外的干扰源下产生的误报率，故本章将通过理论分析和实际测试两种方式对人、树叶、衣物和复杂室外模型的微波探测系统的输出波形作分析。

4.2 人体模型

4.2.1 人体步态多普勒模型

首先要分析人的多普勒模型。从整体上看，人体的径向运动会产生一个整体的多普勒频移，如第二章所述。但人又同时具有四肢和其他关节，每个关节的转动都会带动不同部位运动，会有径向速度的分量，进而产生不同而又唯一的多普勒频移，这个可以称为微多普勒效应^[22]。

人体是一种非刚体^[23]，可以分为几大部分：头、手臂、躯干、腿和脚。其中，人的头可以近似的用圆形的模型来代替，躯干、手臂、腿和脚则可以用椭圆形作为模型。由此可以得到一个如下图所示的人体反射模型：



图 4-1 人体的雷达反射模型

现在进行一些假设。假设人现在是沿径向朝探测器走去，向前的摆臂速度为 V_a ，向前方走路时踢腿的速度 V_l ，向前方移动的躯体速度为 V_b ，那么由第二章式(2-5)可以得到三者速度对应的多普勒频移为：

$$\Delta f_a = \left(\frac{2V_a}{c} \right) f_0 \quad (4-1)$$

$$\Delta f_l = \left(\frac{2V_l}{c} \right) f_0 \quad (4-2)$$

$$\Delta f_b = \left(\frac{2V_b}{c} \right) f_0 \quad (4-3)$$

由这些多普勒频移，当假设发射信号为 $S_{send} = \sin(2\pi f_c t)$ 时，为分析简便，假设混频后的结果以及经传播衰减、反射衰减、耦合度影响、混频系数等等造成的幅度上的变化为 A ，得到混频输出的结果为

$$S_a = \frac{1}{2} A \cos\left(2\pi \left(\frac{2V_a}{c}\right) f_0 t\right) - \frac{1}{2} A \cos\left(4\pi f_c t + 2\pi \left(\frac{2V_a}{c}\right) f_0 t\right) \quad (4-4)$$

$$S_l = \frac{1}{2} A \cos\left(2\pi \left(\frac{2V_l}{c}\right) f_0 t\right) - \frac{1}{2} A \cos\left(4\pi f_c t + 2\pi \left(\frac{2V_l}{c}\right) f_0 t\right) \quad (4-5)$$

$$S_b = \frac{1}{2A} \cos\left(2\pi \left(\frac{2V_b}{c}\right) f_0 t\right) - \frac{1}{2} A \cos\left(4\pi f_c t + 2\pi \left(\frac{2V_b}{c}\right) f_0 t\right) \quad (4-6)$$

当输出经过硬件电路中的放大滤波过后，高频分量被滤除而低频分量得以保留，最后采样得到的波形从频率上看与目标运动速度成正比的关系。

如果假设人走动的速度为 1m/s ，那么相应的多普勒频移大约为 70Hz 。但实际上人的走动过程中，由于大臂、小臂、大腿、小腿的速度与躯体速度不一，会产生很多其他频率下的分量^[23]。而根据参考文献所述，人的正常行走各个部位的速度可以由下一图表示

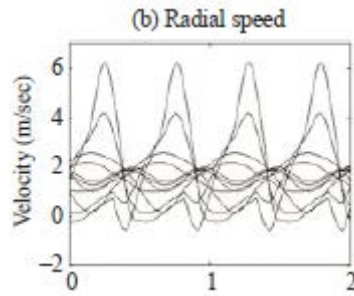


图 4-2 引文中估计的人体速度^[24]

因此，预估人走动所引起的多普勒频移主要存在 70Hz 一下，且频率分量应当较为丰富。

4.2.2 实际中测试的结果分析

在空旷的测试场上，人在距探测器 8 米左右做 0 度角方向的径向运动。首先考查没有目标下的状态

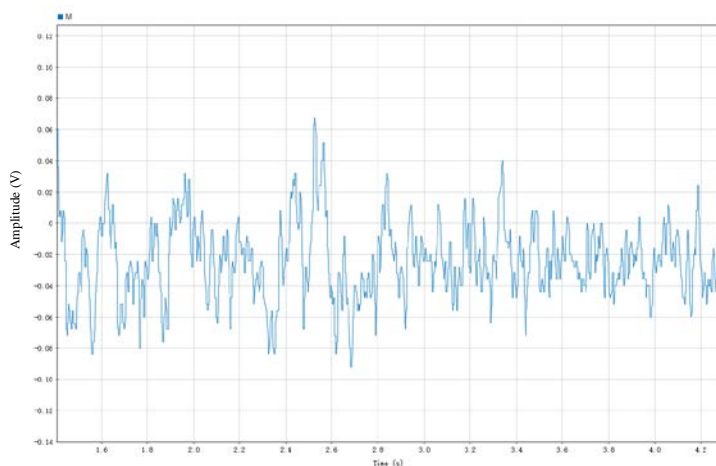


图 4-3 静息状态下的波形

从图 4-3 中可以看出，静息状态下的波形较为平静，其噪声基底的抖动幅度不超过 10mV。时频的分析结果如下图所示。

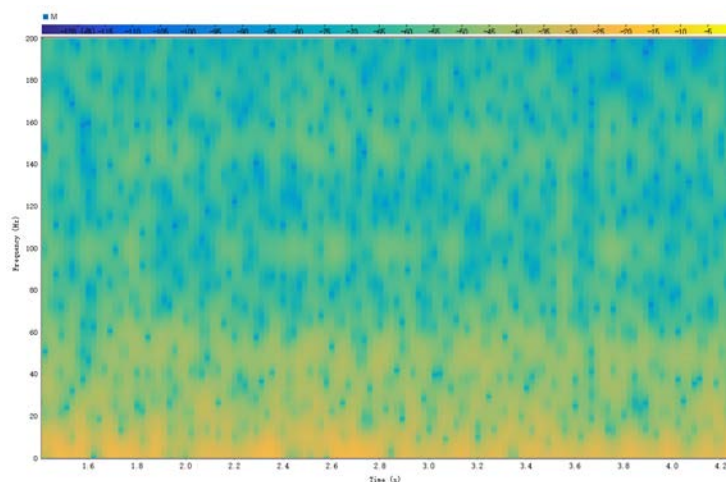


图 4-4 静息状态下的时频分析结果

从图 4-4 中可以知道，环境的背景噪声主要分布在 10Hz 级以下的空间中。这里的最大能量值设置为 0dB。

接下来本文在同样的噪声环境下，测试人站在 6 米远的位置摆动手臂所产生的波形。人摆动手臂的频率为 1 秒钟 1 次，幅度为 45 度角。

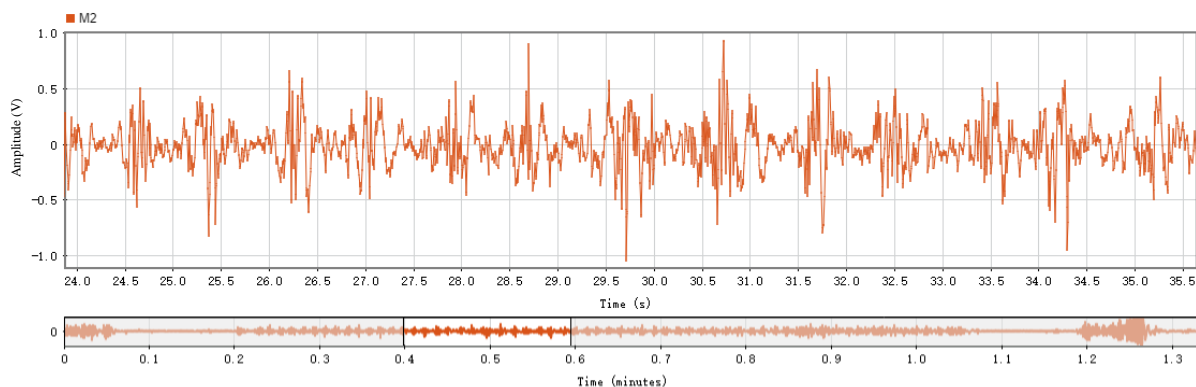


图 4-5 人的手臂摆动产生的波形

从图 4-5 中可以看出，手臂摆动产生的回波幅度在 $\pm 0.5\text{V}$ 左右，手臂摆动的速度为 1s 一下，在手臂摆动期间有明显的一簇一簇的波峰，当手臂摆到顶峰暂停下来时可以明显看到波形恢复较为平静的状态。

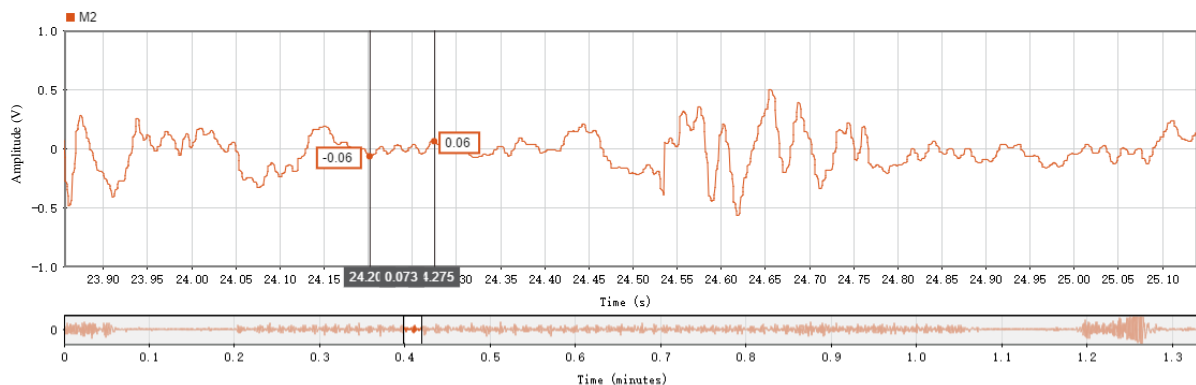


图 4-6 人摆动手臂间隔的静息状态

一种典型的手臂摆动间的静息波形可以由图 4-6 所示。

可以看到，波形的幅值最大处在 $\pm 0.06\text{V}$ 左右，与之前测试得到的背景噪音的幅值相近。

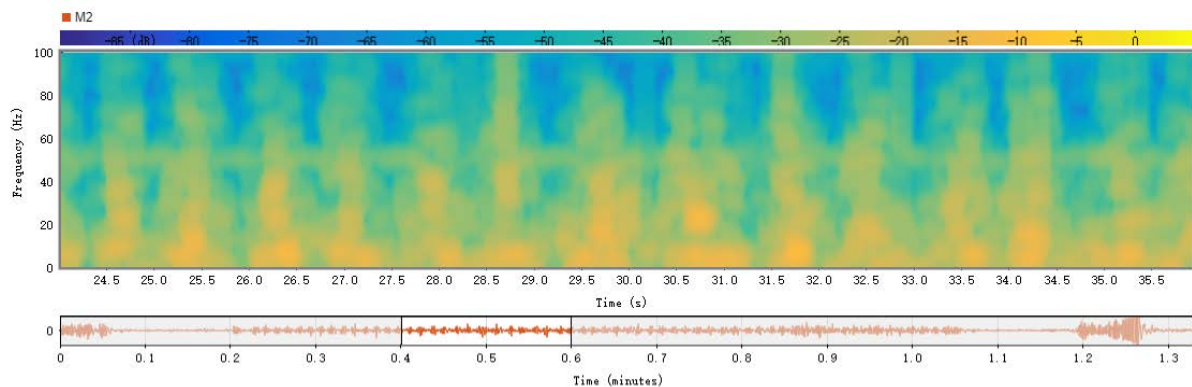


图 4-7 人摆动手臂的时频分析结果

由图 4-7 时频分析结果可以看出，在人摆动手臂的时间内，出现了丰富的频率分量，

其余时间是浅蓝色的能量较弱的区域。由此可以推测，人在行走中摆动手臂产生的多普勒效应是不连续的，频率主要分布在 20Hz 附近。

下面模拟人在走路时抬腿的情况。测试人在 6 米处抬腿所造成的微波探测系统的输出波形，抬腿的频率为 1 秒一下，高度为半个大腿的长度，大约 40 厘米。

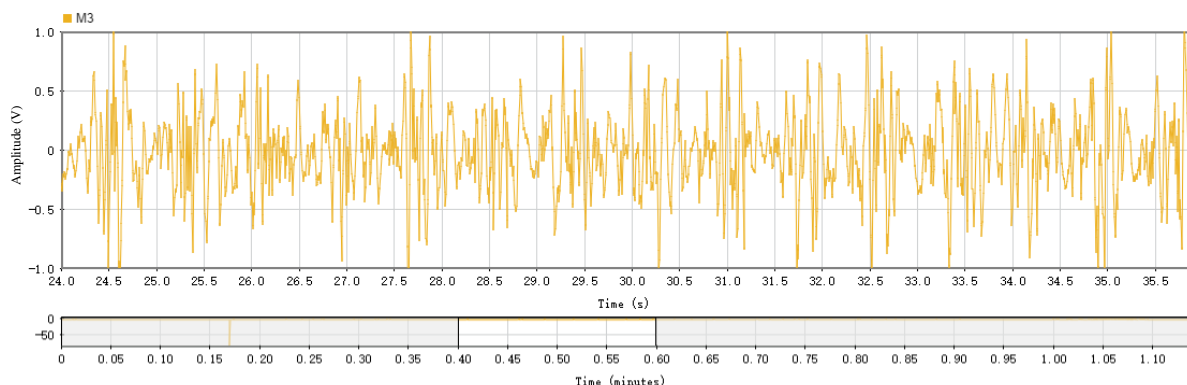


图 4-8 人抬腿的时域波形

从图 4-8 波形上分析，幅度较摆动手臂时要大，普遍在 $\pm 0.5V$ 以上，部分甚至达到了 $\pm 1V$ 。抬腿的间隔静息状态不如摆臂时候明显。

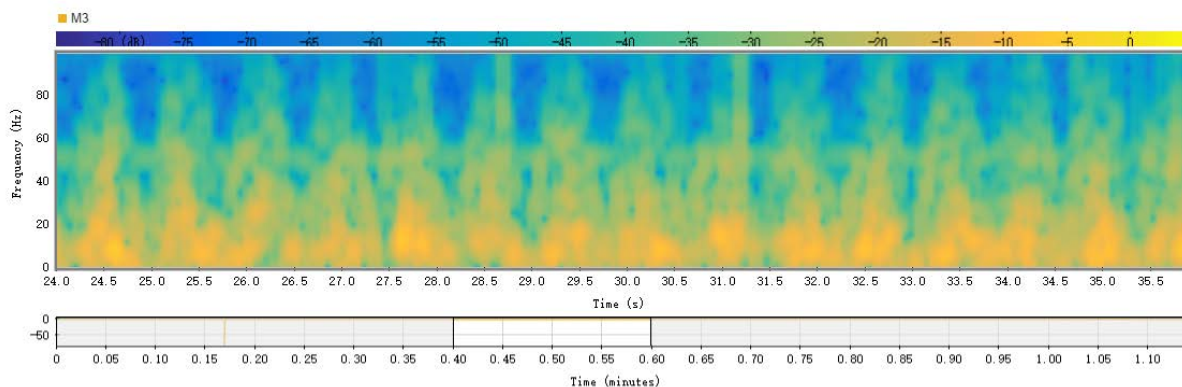


图 4-9 人抬腿的时频分析结果

从图 4-9 的时频分析的结果上看，其中的主要频率分量分布在 20Hz 一下，并且其频谱的峰值主要表现为一个圆弧状，与摆臂时的较为短促的峰值不同。

接下来测试当人以 0.5~1m/s 的速度从距探测器 8 米的位置沿 0 度角径直向探测器走来，到距探测器 2 米的地方折返，采样得到的时域波形为

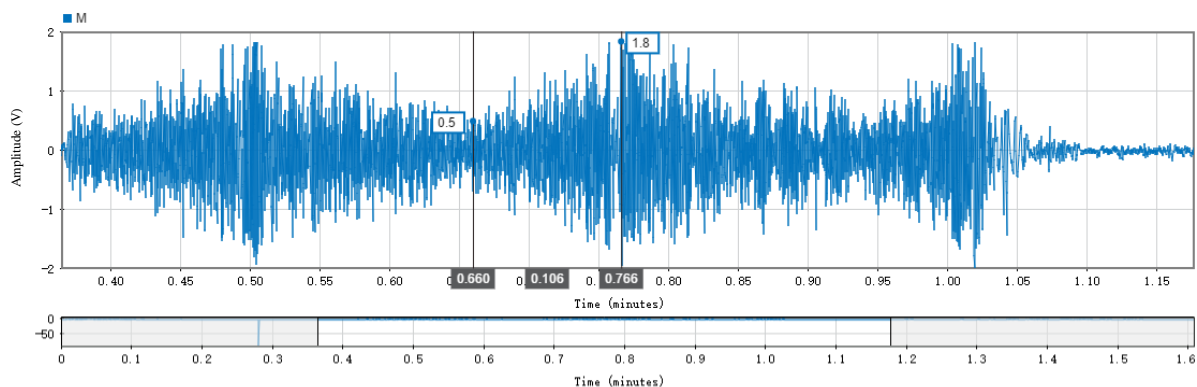


图 4-10 人的行走波形概览

图 4-10 中，是已经处理过信号幅值的数据并去掉了直流偏置，故结果的纵坐标范围为-2V~2V。从图中可以看出，人朝探测器方向的运动，微波探测系统输出的幅度是在有序递增的，当人远离探测器是回波的幅度在逐渐减小。同时发现波形的幅度最大处达到了 1.8V，最小处也有 0.5V。

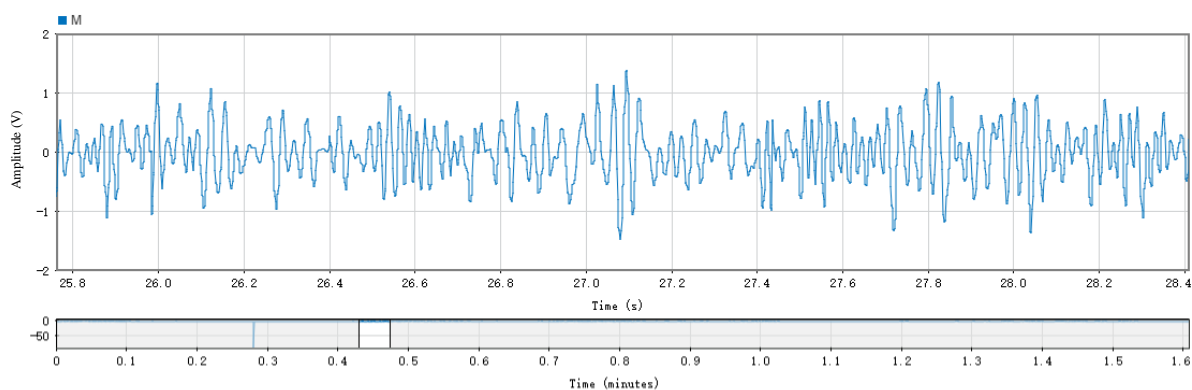


图 4-11 放大后的波形

如果将波形的横轴放大，可以发现波形的形状与正弦波的形状有点类似，如图 4-11 所示。

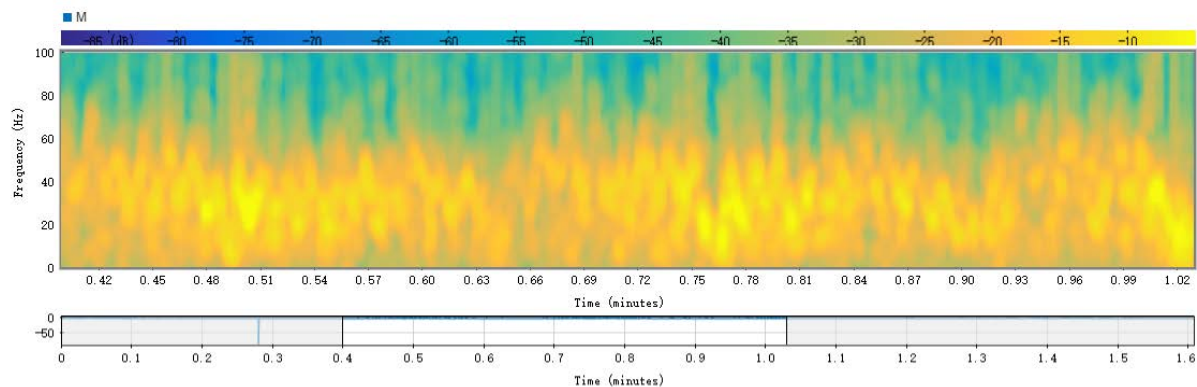


图 4-12 时频分析的结果

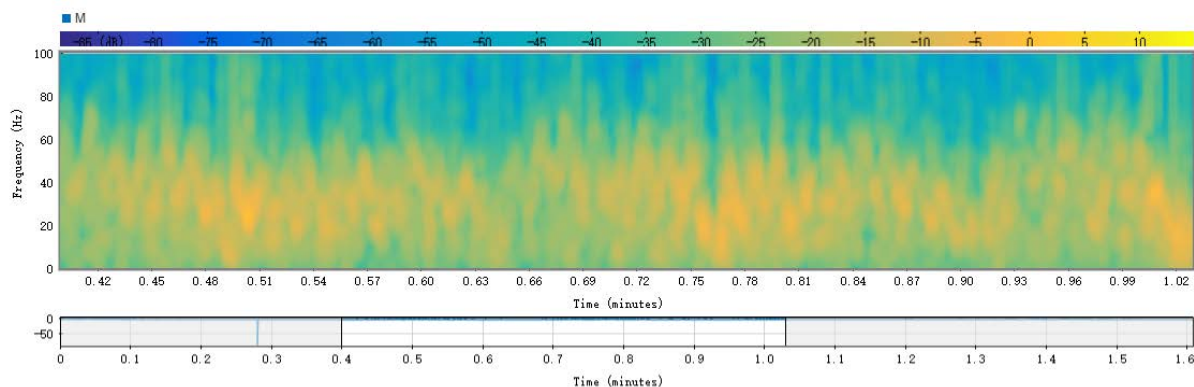


图 4-13 调整标色后的时频分析结果

图 4-12 是根据图 4-11 所采集到的数据进行的时频分析结果，图 4-13 是调整了图 4-12 的色标后的结果。从图中能够明显看出人体移动带来的频谱变化。

利用时频分析方法，可以发现，最主要的频率出现在 40Hz 附近，认为是人实际行走时最主要的行走速度所引起的雷达回波。仔细观察发现，每秒钟内频率的能量分布是有规律变化的。如图 4-13 所示，在修改了最大能量的标色后，能明显看到频率是在有规律的从 10Hz 以内向 70Hz 左右增加，之后又减小回来。根据前面的分析，人在移动过程中的主要频率分布在 70Hz 以内，这个测试是符合之前所建立的模型的。

之前进行的摆动手臂和抬腿的测试，发现其结果与人走路的测试结果在波形的频率、幅度上都有较大的区别。但是在图 4-12 以及图 4-13 中还是可以隐约看出，竖条状的频谱峰值与人摆动手臂时测试的结果相似，而时频上下端圆弧状的波形又与人抬腿时进行的测试结果相近。

室内的运用场景毕竟有限，本文还在室外做了相应的测试。人从 0 度角 11 米远的距离向探测器移动，使用的是 S 型的折回路线，模拟实际中人穿越探测区域的场景。得到的时域波形可如下图所示

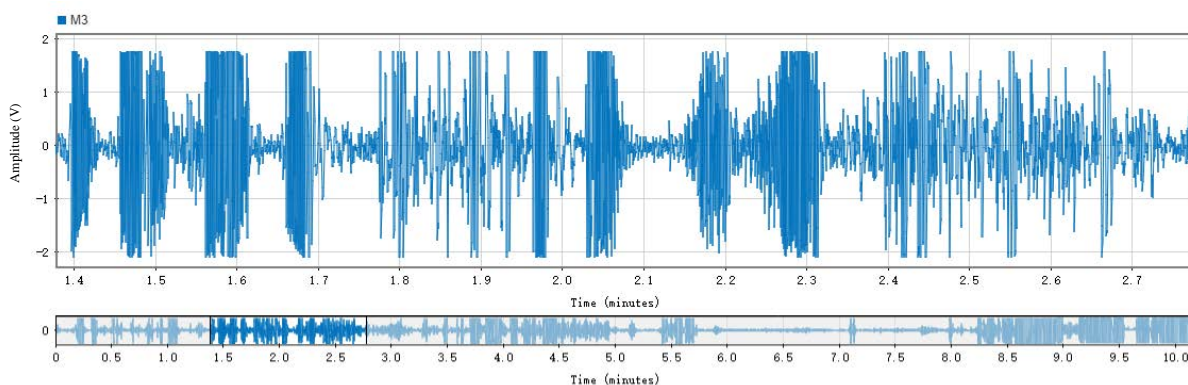


图 4-14 室外 S 行走的时域分析结果

从图 4-14 时域结果中看出，幅值达到了 2V，整体的波形看起来像一簇一簇波包的形状。微波探测系统本身是对径向运动的物体敏感，横向运动的物体其纵向的速度分量

很小，几乎没有，进而纵向的多普勒效应不明显，不能够引起足够强的输出波形。人在 S 形行走时，在拐弯处基本上只有横向运动和自身的转动，纵向运动较少，从波形上就反应为相对幅度要小得多的状态。

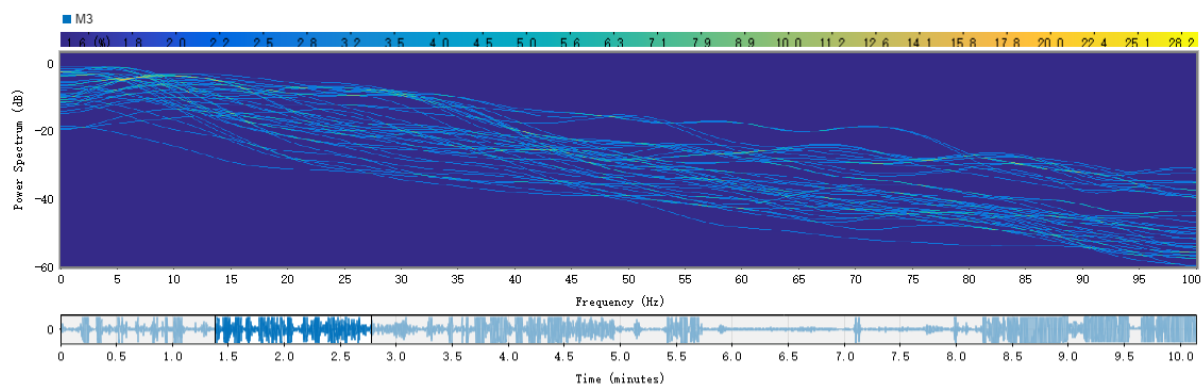


图 4-15 室外 S 行走的频域分析结果

同时，这从图 4-15 的频域分析中也可以看出，有一部分曲线有丰富的 30~40Hz 的频率分量，而另一部分则是集中在低频的 5Hz 左右，与静息相近。

4.3 树叶影响模型

4.3.1 树叶的多普勒模型估计

树叶的干扰也是本文所要提出并解决的一个会影响微波探测系统的显著假目标。本文以在学校中常见的杨树树叶为例，树叶大小在 $12 \times 20\text{cm}^2$ 左右。在树叶下落翻转过程中，叶面的翻转过程可以分解绕翻转轴心的转动和轴心的运动两个过程。转动过程中，叶面垂直于雷达模块的径向分量的部分，会由于转动在该径向分量上产生速度分量。当雷达信号碰撞到叶面上时，该速度分量会使雷达回波叠加多普勒频移，进而引起多普勒效应而被雷达模块中的混频二极管检测出，经过滤波放大后产生可被检测到的波形。树叶下落过程中轴心速度也可以分解出沿雷达探测模块径向分量的速度，该速度同样会产生多普勒频移。

4.3.2 实际中的测试结果分析

本文使用干枯的刚飘落的杨树树叶做测试，模拟树叶从树上飘落的过程，观察其对雷达探测器的输出波形的影响。

实际测试中，树叶放在探测器 0 度角 3 米处，高度为 2 米。开始测试时释放树叶，让树叶自然下落，可以观察得到如下图所示波形：

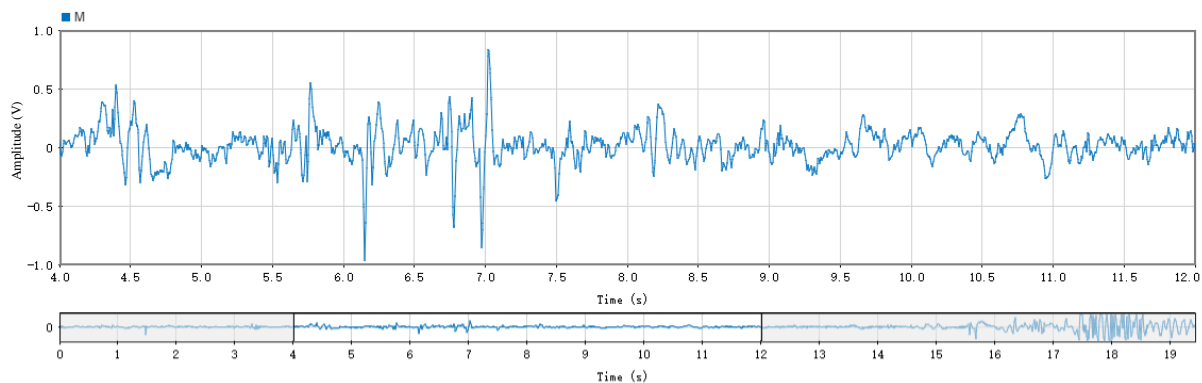


图 4-16 树叶飘落时的微波探测结果

从图 4-16 中可以知道，树叶下落引起的回波幅度在 500mv 以下，其多普勒波形表现为小幅度的高频振荡。这表示树叶下落过程中平行于探测器径向的速度分量较大，平均幅度可由统计直方图得到

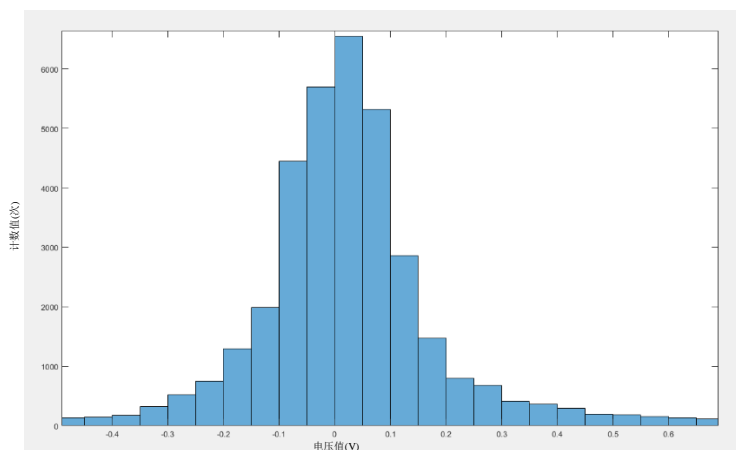


图 4-17 树叶飘落的探测结果统计直方图

从图 4-17 中可以看出，主要的幅度分布在 $\pm 0.1V$ 之内，超过 0.1V 范围的幅值分布较少。观察其频谱特性如下图：

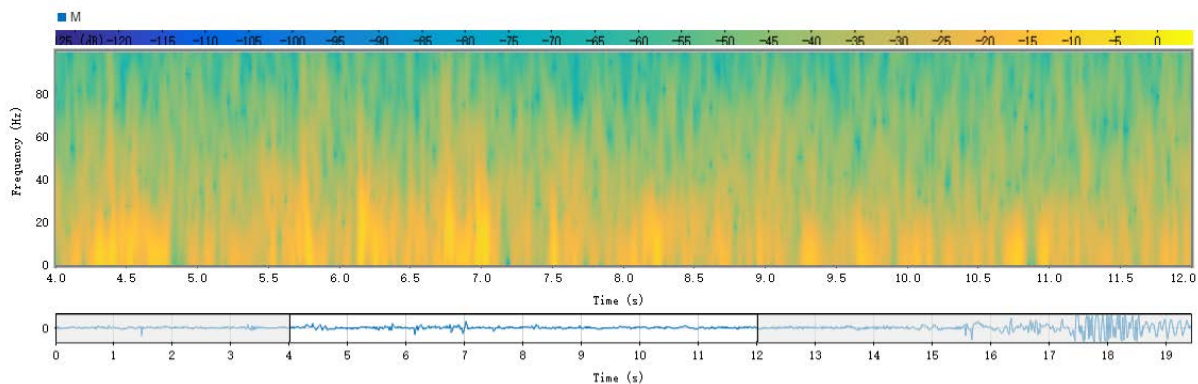


图 4-18 树叶飘落探测结果的时频分析

从图 4-18 中可以看到，分布在 20Hz 一下的信号分量最强，40Hz 以上的频率分量

降到了-40dB 一下，能量很小。高频分量也有但能量很小，这与硬件上的滤波放大上截频为 80Hz 左右有关。

4.4 衣物模型

4.4.1 衣物的多普勒模型

衣服与树叶有些类似。衣服本身的形状以及雷达反射 RCS 模型与人体的相近，如果衣服的摆动节奏和幅度与人体的行走动作相类似，本文所使用的雷达探测系统是难以将其分辨出来的。本文所考虑的是衣物垂直悬挂在空中，受到空气流动而产生摆动这种情况下产生的假目标干扰。

衣服可以分为上衣和下衣两种。上衣在空中的摆动可以分为袖子部分和中间部分。下衣的摆动主要是裤腿的部分。裤腿和袖子都属于长筒状的可弯曲的部分，可以把他们归为一类进行处理。而上衣的中间部分的摆动与其他两者不同，需要单独考虑。对于长筒状的裤腿或者衣袖，其受风摆动是围绕衣物的上部悬挂点进行的，可以假设其摆动时沿探测器径向的速度分量为 V_l ，那么由式 2-5 可以得到其多普勒频移的频率为

$$\Delta f_l = \left(\frac{2V_l}{c} \right) f_0 \quad (4-7)$$

由于其长度一般较长，摆动过程中各个点的速度均不相同，因此其速度 V_l 不是一个定值，应当有一个特定的范围，相应的多普勒频移也是一个具有变化范围的值。

上衣的摆动则要简单一些，其摆动可以利用一个反射面来模拟。当受空气流动而摆动时，反射面前后振动，依据多普勒效应这个振动就会产生一个频率的偏差。如果估计摆动的速度为 V ，那么也可以得到上述的类似的结论

$$\Delta f = \left(\frac{2V}{c} \right) f_0 \quad (4-8)$$

他们与人的步态多普勒不同的是速度不同以及能量分布不同。由于衣服是受空气流动摆动，其摆动速度与风力有很大关系。

4.4.2 实际中的测试结果分析

实际在测试的过程中，考虑到风速不易测量以及不稳定的概率，本文最终选择使用直接摆动衣服的方法来模拟实际中衣服的摆动。为了尽可能的或的准确的数据，本文选在室内空旷环境下进行测试，衣物据探测器直线距离 6 米且中间无遮挡，分别测试空旷环境下的背景噪音、摆动方式造成的微波探测结果以及摆动衣物的微波探测结果。

背景噪音的测试结果可由下面两张图反映。

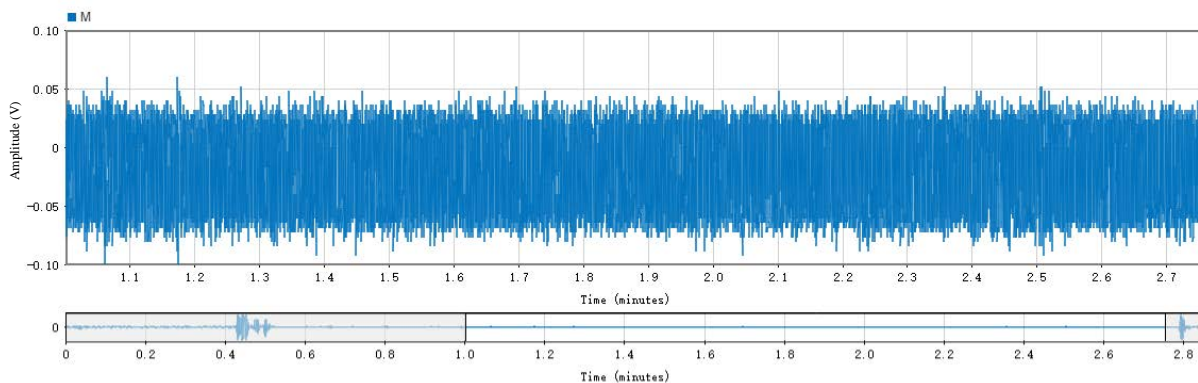


图 4-19 环境背景噪音测试结果的时域分析

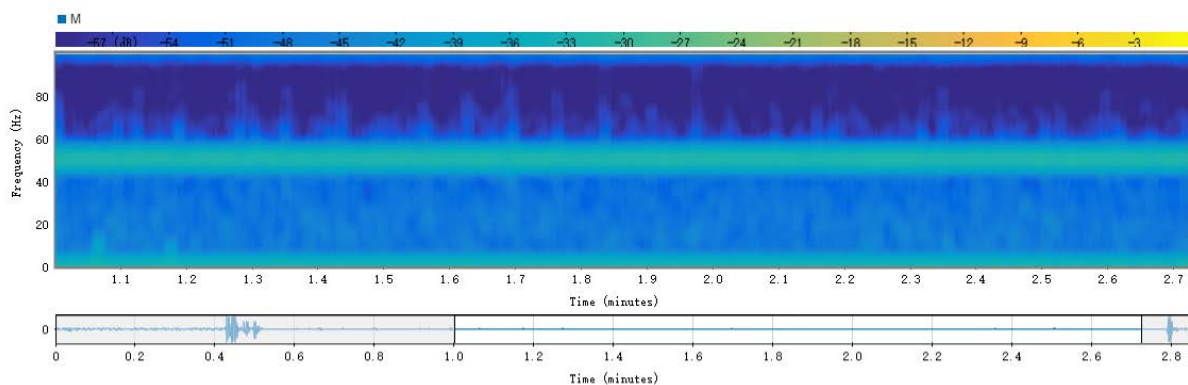


图 4-20 环境背景噪音测试结果的时频分析

从图4-19时域分析结果上看,背景噪声具有持续等幅分布的特点,幅度不超过0.05V,由图4-20时频分析结果中看出,主要的噪声频率分布在50Hz,在小于50Hz的范围内有随机噪声分布,能量主要在-33dB以下,高于50Hz的频率范围内能量分布很少,属于较为良好的测试环境。

接下来测试摆动衣服时会造成的回波。

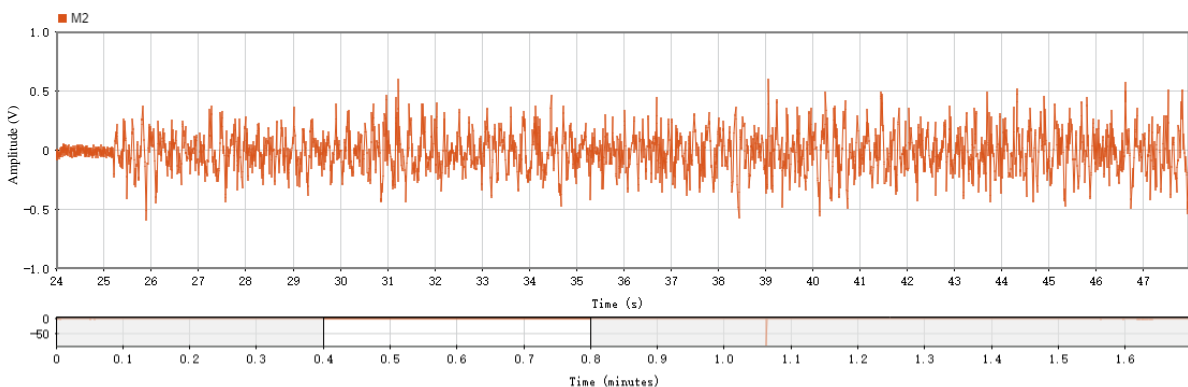


图 4-21 摆动方式测试结果的时域分析

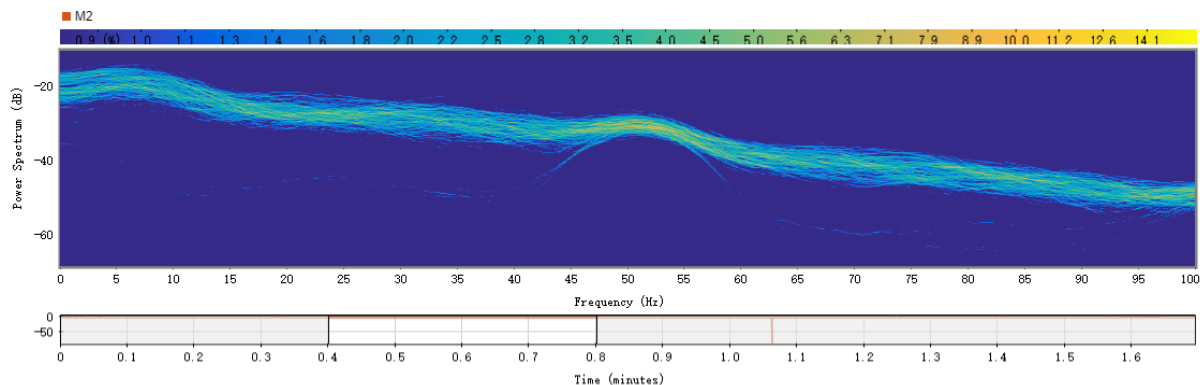


图 4-22 摆动方式测试结果的频域分析

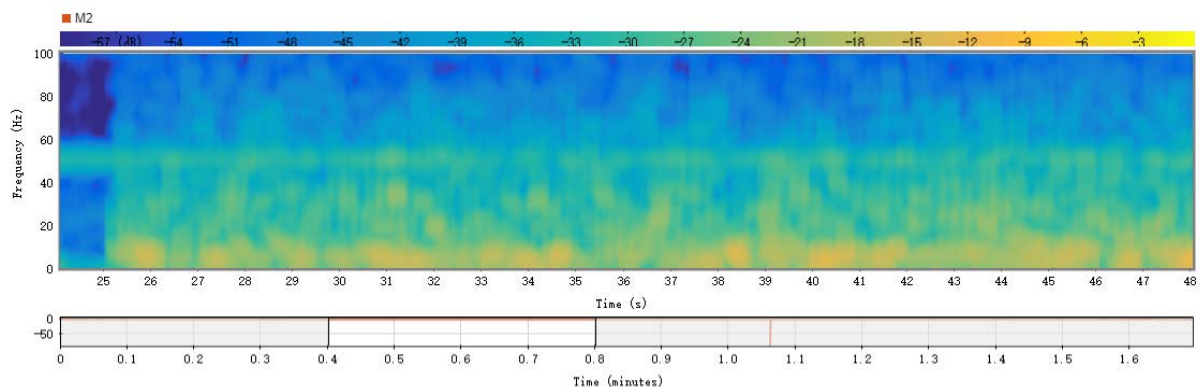


图 4-23 摆动方式测试结果的时频分析

从图 4-21 可以看出，摆动衣服的过程本身会造成一定的雷达回波，回波的幅度在 0.5V 以下，从图 4-22 看出频率主要分布在 5Hz 附近，从图 4-23 中能看出能量分布在 -9dB 左右。微波探测系统中的 50Hz 本身的干扰仍然存在。

下面利用上述摆动衣服的方式摆动一件 XXL 的上衣，测试的结果可如下图所示

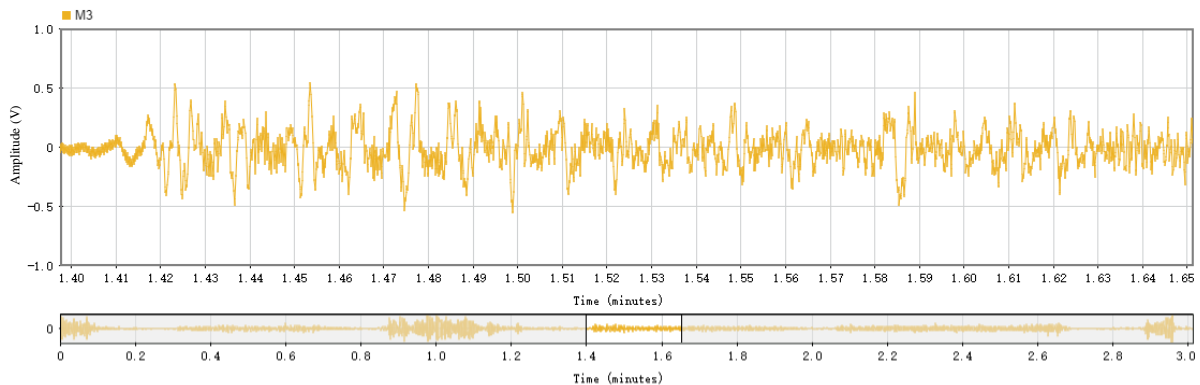


图 4-24 摆动衣服测试结果的时域分析

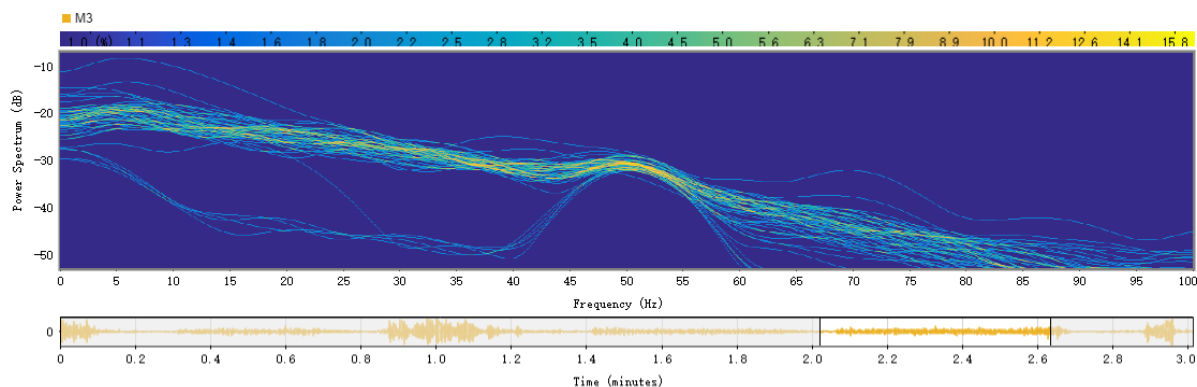


图 4-25 摆动衣服测试结果的频域分析

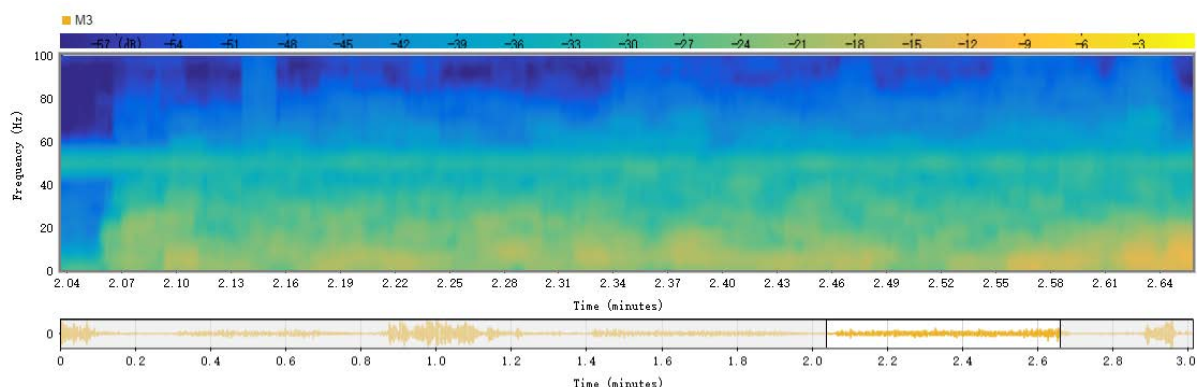


图 4-26 摆动衣服测试结果的时频分析

从图 4-24 的时域结果中知道，波形的幅度为 0.5V 以下，大的波峰有规律的出现，多数以在 0V 附近的振荡波形为主。观察图 4-25 以及图 4-26 的频域结果，可以看出结果中有两种明显的曲线，一种曲线其峰值位于 5Hz 左右与单独测试摆动衣服时候的结果相似，另一种曲线其在 5Hz 附近较为平缓能量较低，峰值位于 15-20Hz 之间。由于探测区域内只有衣服和摆动的方式这两种运动物体所造成的雷达回波，可以推测出这一条曲线是由于衣服的摆动而产生的多普勒频移所造成的。从时频分析结果中也可以看出波形的能量分布是在 20Hz 左右以及低频处较为丰富，其余地方则较少。

4.5 复杂室外环境模型

4.5.1 复杂室外环境综合模型分析

在室外环境中，除了前几节提高的衣服、树叶等影响物外，还存在着地表反射、空气流动以及电磁波干扰等原因产生的干扰^[25]。这些干扰通常具有长时间存在、反复测试结果大体相同等的特点。由于这些干扰不能忽略，本文接下来要测试在空旷的室外环境下微波探测系统的回波特点，并将其与室内的探测结果做比较分析。

4.5.2 实际中的测试结果分析

首先在室内环境，长 8 米宽 8 米的空间范围内，得到的波形为

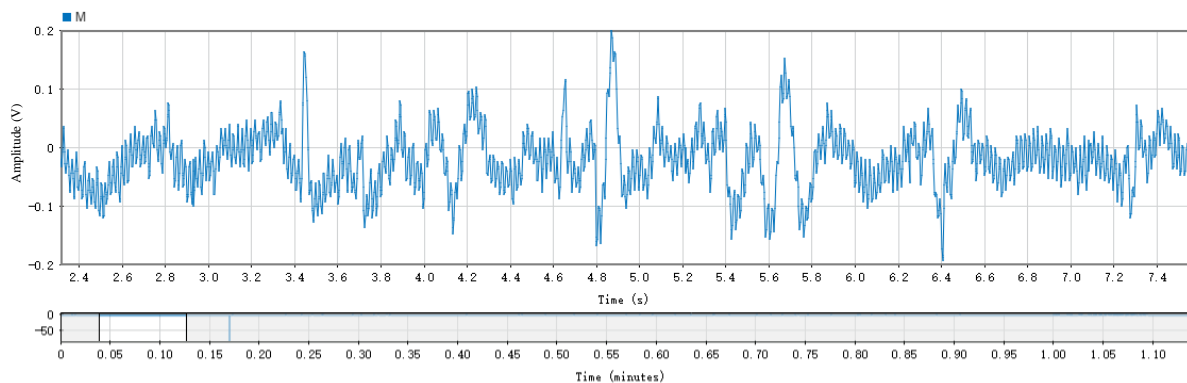


图 4-27 室内环境下的静息状态

从图 4-27 中可以看出，在没有明显目标的情况下波形表现为较为平静的状态，杂波的幅度很少会超过 0.1V 的范围，有部分杂波较大的也只是有一瞬间超过，没有本文第三章所提到的明显的正弦波波形。

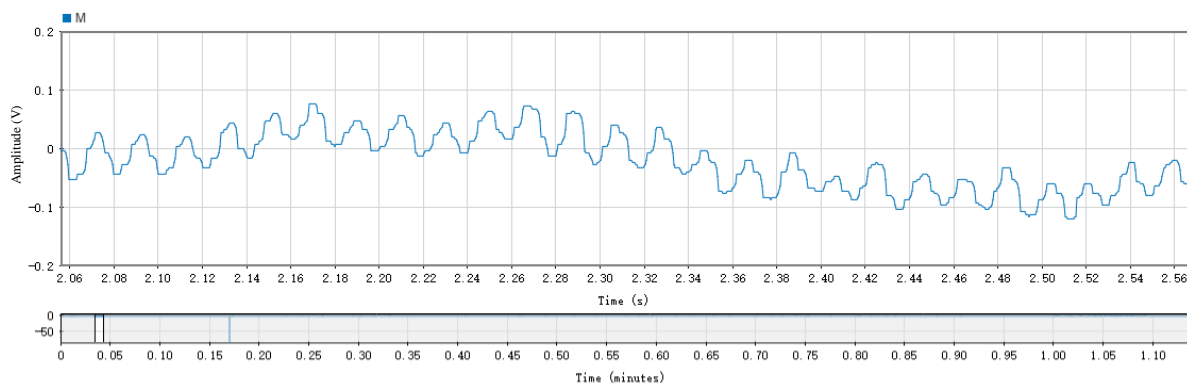


图 4-28 放大的静息波形

放大局部图来看得到图 4-28 所示的结果，发现波形中存在一个微小的正弦波存在，经过排查发现是本文所使用的雷达模块本身的问题。这里不做其他处理。

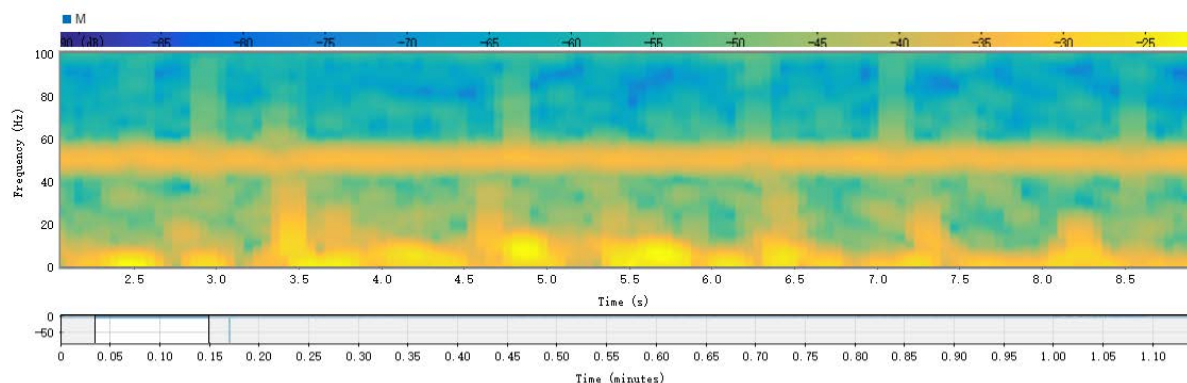


图 4-29 室内的静息状态下的时频分析结果

观察其频谱，如图 4-29 所示，可以看出来频率分量主要集中在 20Hz 一下，大部分分布在 10Hz 以下。

在室外环境要略微复杂，这里选取的地方是无人的足球场的东南侧，0 度角 15 米以上±55 度 10 米范围内没有物体遮挡，测试没有任何物体在探测区域内运动的情况下得到的时域波形和频谱分析结果可以由下面两张图所示

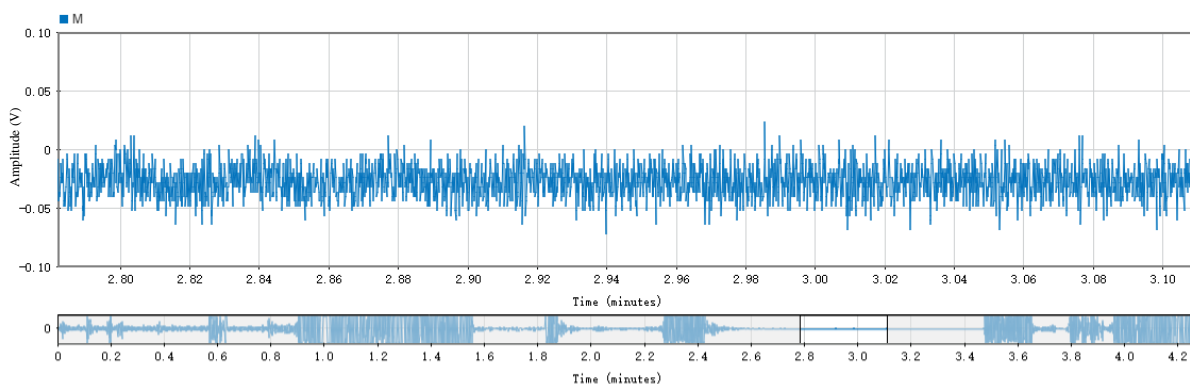


图 4-30 室外空旷环境下的静息波形

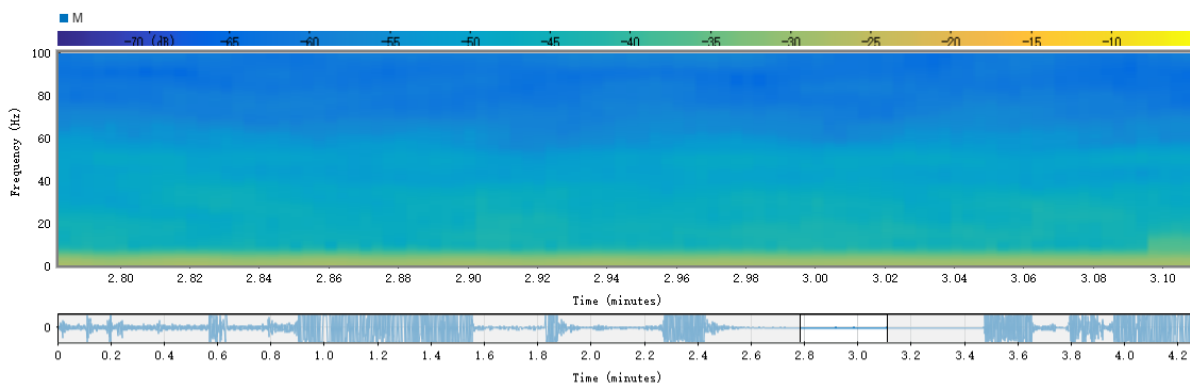


图 4-31 室外空旷环境下的时频分析结果

从图 4-30 中可以看出，室外环境下的静息波形要比室内的更好一些，波形的幅度基本上在 0.05V 以内，噪声很小，同时从图 4-31 的时频上分析的结果也可以看出来，静息状态下的干扰波形都是低频的分量，主要分布在 0Hz 附近的区域内。这里分析是在室内测试时，室内人员距探测器的距离太近，导致一些微小动作被放大后影响了室内探测的结果。

4.6 本章小结

本章主要通过对人体模型的建模和其他一些典型干扰源：树叶和摆动的衣物的简单建模，主要分析其对雷达探测系统的影响。另外，简要说明在室外中的复杂环境下的干扰模型。利用这些模型，了解了人的移动所产生的波形的特点，解决了干扰信号与人的信号的区别问题。

第五章 典型目标的红外探测模型

5.1 引言

接下来将讨论红外探测系统的模型。红外探测主要依据目标的红外辐射量的变化来决定输出，所以环境温度的变化以及白光的干扰就显得较为明显。由于菲涅尔透镜的作用，一部分的白光干扰可以得到消除，但是分析其对红外探测系统的影响仍然有助于降低探测系统的误报率。

5.2 人体模型

5.2.1 人体移动的红外探测结果估计

人体红外辐射波长在 $7\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 之间，峰值主要分布在 $10\mu\text{m}$ 左右^[26, 27]，处于本文所使用的热释电红外传感器的感应波长范围之内。人的步行频率大概处于 $0.1\text{Hz}\sim 10\text{Hz}$ 之间^[28]。当人从探测区域外进入探测区域内时，会引起相应的红外辐射水平的变化。本文所设计的红外探测系统具有菲涅尔透镜，而菲涅尔透镜对红外探测具有明暗分区的特点^[29]。当人从探测区域中走过，红外辐射水平总是持续不断变化的，进而红外探测系统就会输出连续变化的波形^[30]。

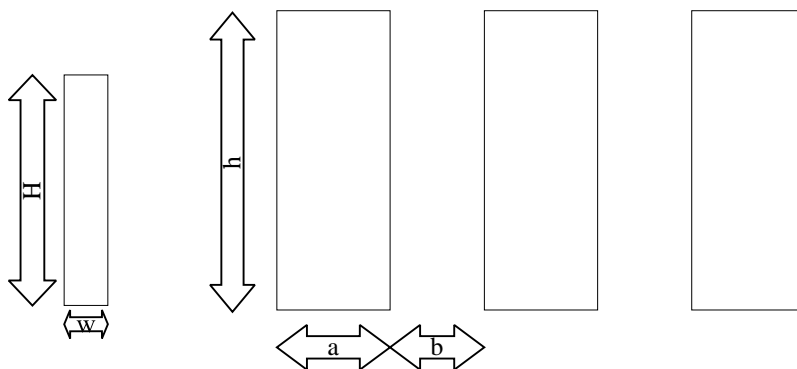


图 5-1 红外辐射分区示意图

可以假设人体的红外辐射目标是类似于一个矩形块的均匀辐射，假设该矩形块有宽度 w 、高度 H ，以速度 V 进入探测区域并穿过各个菲涅尔明暗分区，单位面积辐射水平为 k 。这里假设明区如图 5-1 中右侧的矩形框所示，可以完整的透过红外辐射并聚焦到红外探测器上，有宽度 a 长度 h 。假设暗区虽然也能透过红外辐射，但是聚焦不到红外探测器上，也就相当于探测不到，有宽度 b 长度为 h 。这里假设，暗区的宽度和明区的宽度都要大于假设的人体的宽度。假设红外探测器接收到的红外辐射为 f 。依据这些假设，并假定人是从左向右行进，起始位置在第一个明区的左边的边界上，于是可以得到如下分析。

当人进入第一个明区时，红外探测器接收到的辐射水平是处于上升状态。设定为过程 1，可以用数学表达式表示为

$$f_1 = kVHt \quad 0 \leq Vt \leq w \quad (5-1)$$

当人在明区中，红外辐射水平不会有明显变化。设定为过程 2，有数学表达式表示为

$$f_2 = kHw \quad w \leq Vt \leq a \quad (5-2)$$

当人离开明区时，红外辐射水平呈现逐渐下降的状态，设定为过程 3，可以用数学表达式表示为

$$f_3 = kHw - kH(Vt - a) \quad a \leq Vt \leq a + w \quad (5-3)$$

当人处于暗区中，红外辐射水平为 0，设定为过程 4，可以用数学表达式表示为

$$f_4 = 0 \quad a + w \leq Vt \leq a + b \quad (5-4)$$

之后随着人继续向右侧移动，红外辐射水平的变化与其中一种情况相同。总结上述表达式，可以预测当人穿过探测区域时，红外辐射水平的变化规律应该为先由低到高，保持一段时间后再由高到低，以此循环类推。

$$f = \begin{cases} kVHt & 0 \leq Vt \leq w \\ kHw & w \leq Vt \leq a \\ kHw - kH(Vt - a) & a \leq Vt \leq a + w \\ 0 & a + w \leq Vt \leq a + b \end{cases} \quad (5-5)$$

式 5-4 表明了整个过程。

红外水平辐射的变化能够引起红外传感器的输出变化，这里假设红外辐射水平变化引起的红外探测系统输出幅度变化的系数为 p ，于是红外探测系统的输出 H 就可以根据上式表示为

$$H = p \frac{df}{dt} = \begin{cases} pkVH & 0 \leq Vt \leq w \\ 0 & w \leq Vt \leq a \\ -pkHV & a \leq Vt \leq a + w \\ 0 & a + w \leq Vt \leq a + b \end{cases} \quad (5-6)$$

从式 5-5 中可以看到，过程 1 和过程 3 所引起的红外探测系统输出在数值上是相同的，而在符号上却是相反的。从公式中还可以预测，红外探测系统的波形正负变化先后顺序可以表明人在探测区域内行走的水平方向。

如果人体的宽度 w 大于暗区的宽度 b 而小于明区的宽度 a （这是在实际中更为可能的一种情况），那么上述的过程需要修正。

当人开始进入探测区域中，红外辐射水平同样是在增加的。称为过程 0，用数学表达式表示为

$$f_0 = kVHt \quad 0 \leq Vt \leq w \quad (5-7)$$

当人进入到第一个明区内部时，红外辐射水平暂时没有变化，称为过程 1，用数学表达式表示为

$$f_1 = kHw \quad w \leq Vt \leq a \quad (5-8)$$

当人离开第一个明区进入到其向邻的暗区时，红外辐射水平在缓慢下降，称为过程 2，用数学表达式表示为

$$f_2 = kHw - kH(Vt - a) \quad a \leq Vt \leq a + b \quad (5-9)$$

当人在穿越暗区时，右侧边界进入了第二个明区，而左侧边界仍然处于明区内时，红外辐射水平将保持不变，称为过程 3，用数学表达式表示为

$$f_3 = kHw - kHb \quad a + b \leq Vt \leq a + w \quad (5-10)$$

当人的左侧边界离开第一明区，并且逐渐离开第一暗区时，红外辐射水平将继续升高，称为过程 4，用数学表达式表示为

$$f_4 = kH(Vt - a - b) \quad a + w \leq Vt \leq a + b + w \quad (5-11)$$

之后将不断重复过程 1~4 的循环，并且由于叠加的距离表达式与上述不完全相同，但是上述表达式还是可以很好的表示人在探测区域中引起的红外辐射水平的变化趋势。直到人在离开探测区域时，红外辐射水平的下降量随着右侧边界离开最右侧的明区边界，将以 $kVHt$ 的量下降而不再反复。同样的，可以联合表示为下式

$$f = \begin{cases} kVHt & 0 \leq Vt \leq w \\ kHw & w \leq Vt \leq a \\ kHw - kH(Vt - a) & a \leq Vt \leq a + b \\ kHw - kHb & a + b \leq Vt \leq a + w \\ kH(Vt - a - b) & a + w \leq Vt \leq a + b + w \end{cases} \quad (5-12)$$

式 5-11 表示了过程 0~4 的整体情况。

同理，依据之前的分析可以得到红外探测系统的输出变化表达式为

$$H = p \frac{df}{dt} = \begin{cases} pkVH & 0 \leq Vt \leq w \\ 0 & w \leq Vt \leq a \\ -pkHV & a \leq Vt \leq a + b \\ 0 & a + b \leq Vt \leq a + w \\ pkVH & a + w \leq Vt \leq a + b + w \end{cases} \quad (5-13)$$

可以看出，在这种情况下红外探测系统的输出变化趋势与 b 大于 w 时基本一致，不同的是两者的波形宽度不同。

红外探测系统本身是对横向的目标敏感的，对于径向的目标由于目标的红外辐射水平在探测区域内基本不会有变化而变得不敏感。但是由于菲涅尔透镜的明暗分区效果，使得径向移动目标也有可能产生红外辐射水平的变化。

同样利用上述分析所假设的模型，假设人体原本就处于明区，称该状态为状态 1，红外辐射水平可由表达式表示为

$$f_1 = kHw \quad (5-14)$$

当人匀速径向朝探测器走来，等效的红外辐射区域展宽，为分析简便假设单位面积辐射量 k 不变，展宽的速度假设为 g 。当展宽的两侧边界位于明区相邻的两个暗区内，

则红外辐射水平在逐渐减少可以由数学表达式表示为

$$f_2 = kHw - 2kHgt \quad 0 \leq gt \leq b \quad (5-15)$$

当超越两个暗区时红外辐射水平又会上升，从而得到

$$f_3 = kH(w - 2b) + 2kHgt \quad b \leq gt \leq b + a \quad (5-16)$$

由此循环往复，一段时间内辐射水平增加另一段时间内减少，于是可以得到红外探测系统的输出数学表示式为

$$H = p \frac{df}{dt} = \begin{cases} -p2kHg & 0 \leq gt \leq b \\ p2kHg & b \leq gt \leq b + a \end{cases} \quad (5-17)$$

从表达式上看，在径向运动的过程中红外探测系统得到的信号应当是正负均有。但是只是理想的分析，实际上人体的总辐射量并不会发生改变，也就是说单位面积内的辐射量 k 实际上是会随着人的径向运动，等效的辐射面变宽而逐渐降低的，不仅如此，红外辐射在空气中传播是有一定的衰减的，当人距离探测器的直线距离发生改变时红外辐射的衰减也随之改变，也就是说随着人越来越靠近探测器单位面积内的辐射量 k 是会随着人的径向运动而逐渐增大。两者的趋势相反，本文后续可以从实际测试的结果上看， k 的变化确实会导致在径向方向上的移动所产生的红外探测系统的输出略微偏小，但是并不影响分辨目标的有无，故这里不作深入探究。

5.2.2 实际探测结果分析

探测环境选择在室内中进行。室内长 5 米宽 6 米，测试人在 5 米处左右横向移动产生的红外探测系统的输出。

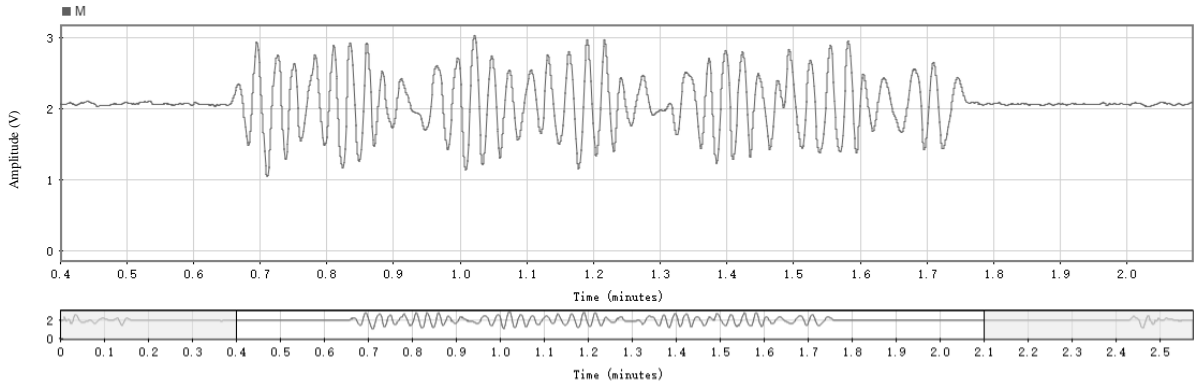


图 5-2 人体横向移动的红外探测时域结果

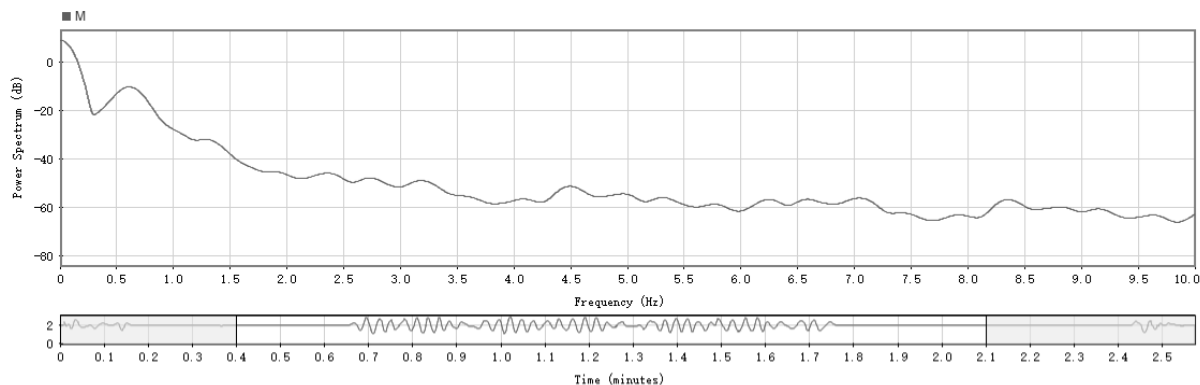


图 5-3 人体横向移动的红外探测频域结果

从图 5-2 的时域结果中可以看出，人体移动时产生的波形幅度为 1V 所有，与静息状态下有较大的区别，从图 5-3 的频域结果可以看出频率在 0.5Hz~1Hz 之间，而且产生的是一个一个波峰。人的左右移动产生的初始波峰的正负不同，这一点从图中两个起始位可以看出来。

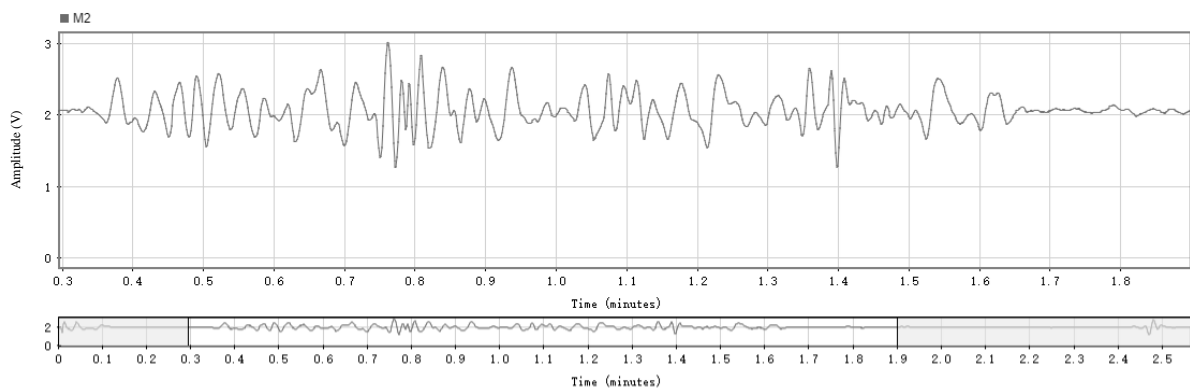


图 5-4 人体纵向移动的红外探测时域结果

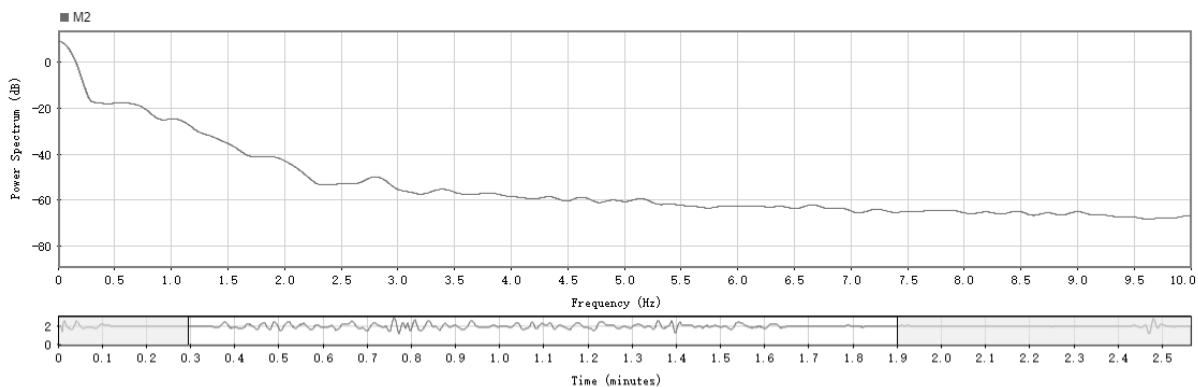


图 5-5 人体纵向移动的红外探测频域结果

当人是纵向移动时，时域结果可以由图 5-4 所示，从中可以发现，波形的幅度要明显小一些，而且不如横向移动时有规律。但是波形的幅度也至少有 0.5V。从图 5-5 的频域上看，0.5~1Hz 期间有一定的频率分布但不如横向移动时明显。

5.3 白光模型

5.3.1 白光对红外探测结果的影响

这里的白光指的是包含可被热释电红外探测器探测到的红外线的来源，主要包括太阳光、部分手电筒的来源等。白光在照射时，到达热释电红外传感器的红外辐射水平有增加，假设增加的量为 Δf ，于是有红外探测系统的输出被表示为式 5-18

$$H = p \frac{df}{dt} \quad (5-18)$$

当白光光源出现后辐射的强度不随时间的变化而变化，此时不会有红外探测系统的输出，可见能够引起红外探测系统输出变化的是在白光光源从无到稳定的期间内。可以说，当白光光源是以较快速度出现时，例如灯瞬间点亮，输出的波形应当为一个窄脉冲，脉冲的幅度与光源的点亮速度有关系，脉宽则与硬件滤波电路的带宽有关系。

本文所使用的热释电红外传感器本身使用了两个极性相反的感应晶体，理想状态下当白光均匀照射在感应窗上时感应效果互相抵消从而不会产生输出。但在实际上，两者之间会存在平衡误差，探测器的灵敏度通常在几千伏每瓦，再加上中频电路上千倍的放大作用最终会使平衡误差能够被明显的检测出来，尤其是在白光照射下。

5.3.2 实际探测结果分析

实验选择在室内进行，利用强烈的太阳光作为白光光源，用纸板遮挡与去遮挡来模拟白光光源存在与不存在。

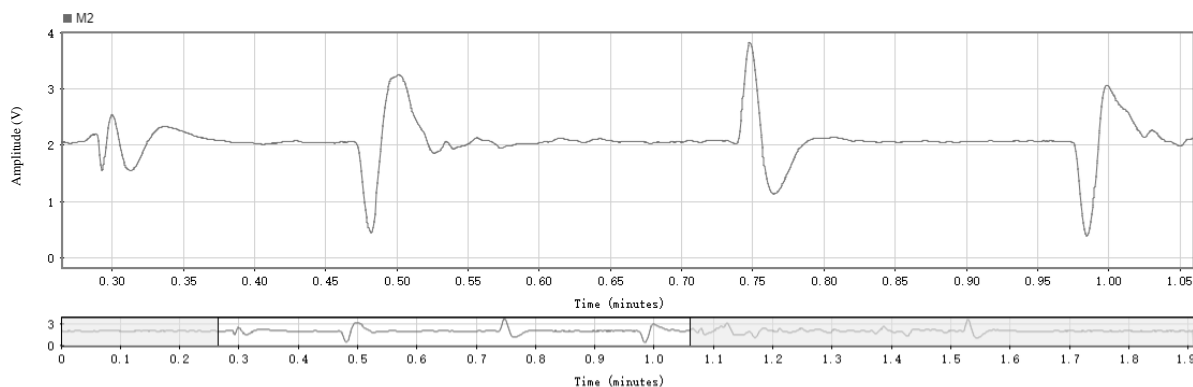


图 5-6 白光测试的红外探测时域结果

从图 5-6 中看出，白光存在和去除时会引起红外探测系统的输出。这些波峰的峰值可达 2V，持续时间在 3.6 秒左右，且其波形峰值的特点是出现一次后后续的拖尾较少，不会像人体移动所产生的红外波形是连续的峰值连续起来。

5.4 本章小结

经过本章的分析，了解到红外探测系统的特点，采集到并分析了红外探测结果。红

外的探测结果表明该信号具有低频、响应时间长的特点，为后续章节继续分析和设计算法打下了基础。

第六章 微波探测系统算法设计

6.1 引言

本章是第 4 章的后续章节。从第 4 章可以知道，人体、树叶、衣物和室外场景下，微波探测系统的输出有很大的不同，本章接下来将利用这些不同之处去完成微波探测系统的算法设计。

根据第 3 章软件系统的设计，算法所得到的数据输入是采样率为 1980Hz 的 10 位精度的 ADC 采样原始数据，原始数据的取值范围为 0~1024，对应的实际采样电压 0~4.096V，有 1/4 的缩放比例。算法的时间要求是要在下一个雷达模块驱动的低电平到来之间完成，时间长度在 400us 左右，这是因为下一个雷达模块驱动的低电平到来时，新一轮 ADC 采样就会开始，算法所利用的暂存 ADC 数据就会被覆盖而导致误差。同时，最佳的算法状态是有极快的响应时间，能够达到人在有效探测范围内一动就输出报警信号的效果。区分的算法首先考虑从频域上分析，因为区分是否为人的目标最直接的办法就是使用短时傅里叶变化（Short-Time Fourier Transform, STFT）^[31]来观察人的微多普勒特征，再加以区别就可以了。但是单片机系统中存储空间以及计算能力都是有限的，短时傅里叶变换所要求的三角变换、小数乘法以及复数运算都明显的超出了单片机的处理能力，使用 FFT 受限于嵌入式系统有限的存储空间也是难以得到高精度的结果。出于这些考虑，将频域上的分析转移到时域上来，时域结果中的波形幅值可以大概的对应频域结果中的能量，而波形的在一定时间内越过某些特殊值的次数则可以用来代表主要峰值频率，利用这两个门限的组合使用以达到一个较低的误报效果。本章接下来将要依据这两个特点得出相应的幅度门限和频率门限，组成本文的在单片机上实现的增强幅度门限算法。

6.2 幅度门限

幅度门限的设置是以期望目标和非期望目标的波形幅度差值为主要依据设置的。经由第四章的测试分析，能够发现无论是在室内还是室外，当探测区域内没有活动目标存在时，微波探测系统输出波形的幅度一般不超过±100mV，当有活动目标存在时通常会超出±200mV，有的甚至可以达到满幅的量程。因此可以据此初步设定一个幅度门限值。实践中，使用这个门限值会产生不少误报情况，因此幅度门限还需要有一定的容纳噪声的能力。据本文测试期间的数据，部分雷达模块的输出噪声（50Hz 左右的正弦噪音）幅度可达 50~100mV，在这种基础上环境中只要有任何一点振动就有可能超过幅度门限。同时，波形中夹杂着的高频噪声，当波形处于门限边缘时会造成反复触发门限的情况。为了解决这些问题，本文在算法中引入了滑动滤波算法。滑动平均滤波算法，是一种将测量到的数据分成若干个不同的子集来求子集均值的有限脉冲响应(Finite impulse response, FIR)低通滤波器^[32]。如果将输入脉冲序列表示为 $x_1, x_2, x_3 \dots$ ，那么滑平均滤波算法就可以表示为

$$y = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n} \quad (6-1)$$

滑平均滤波的计算结果可以在每个新值的载入待测序列时立即计算出新值，因此它的实时性较与固定的均值滤波要好很多。滑平均滤波能够有高于效的抑制小幅高频分量。根据本文的实际需求，选择长度为 10 的滑平均滤波能够刚好适用于缓存的微波探测系统结果的长度，无需增加额外的存储开销或者代码复杂度。因此，实际用于判决的波形表达式为

$$y_k = \frac{x_{1+k} + x_{2+k} + x_{3+k} + x_{4+k} + x_{5+k} + x_{6+k} + x_{7+k} + x_{8+k} + x_{9+k} + x_{10+k}}{10} \quad (6-2)$$

$k = 0, 1, 2, \dots, n$

其中 k 表示第 k 次结果。

根据反复的实际测试，当门限值设置为 $\pm 100\text{mV}$ 时，微波探测系统在室内可以达到良好的静息状态，但是室内稍微有一些仪器风扇转动等，就会出现误报。最终，根据测试结果，选定幅度门限值为 $\pm 160\text{mV}$ 。这是综合了探测距离考量和一定的误报率的结果，同时还考虑了硬件上设计有调节微波探测系统距离和灵敏度的旋钮，需要选择一个相对中间的结果。

表 6-1 门限设定测试结果

设定门限	13m	11m	静息误报情况
100mV	误报大	误报大	相对误报大
120mV	可以	可以	相对偶有误报
140mV	可以	可以	相对误报少
160mV	可以	可以	相对误报少
180mV	可以	可以	相对误报少
200mV	略有不灵敏	可以	相对误报少

此时，室内的误报率已经较低，但是在室外的效果还不尽如人意，因此需要引出频率门限来进一步降低误报率。

6.3 频率门限

频率门限是以期望目标（人）与非期望目标（树叶、衣物等）所产生的多普勒频移频率不同为基础划分的。经过第四章的测试结果分析，可以看出所产生的多普勒效应的频率在 70Hz 左右，探测到的频率峰值在 30~70Hz，而衣物、树叶等干扰源的频谱峰值大多在 20Hz 一下。要能够完整的收集这些信号，就需要尽可能长时间的保留采样数据，但是单片机中没有如此大的空间处理存储数据也不允许这么长的时间来处理（有可能难以满足实时性的需求）。本文以 11 米的探测距离为标准，人在 11 米附近以 S 型正常行走，观察探测器的漏报效果并记录数据。

表 6-2 选择观察长度时的测试

观察长度	11m 处漏报效果	延迟性能
10ms	有漏报	-
50ms	略有漏报	感觉不到
100ms	基本无漏报	略有延迟
200ms	基本无漏报	明显的延迟
300ms	基本无漏报	延迟接近 1s

根据表 6-2 所示的实际测试的结果，选择了观察 100 毫秒的数据长度。其中，存在漏报的不宜区分是延迟较大导致类似于漏报的效果还是本身就是漏报，故结果不计。

考虑好观察时间后，就可以设计频次的门限了。为了避免使用傅里叶变换，从时频上使用计数的方式来粗略的判断主要频率。100ms 内超过正负门限 4 次可以粗略认为是 40Hz，3 次对应 30Hz，2 对应 20Hz，依次类推。使用的门限最好是在 30~40 之间，这个是人体目标与本文所说明的假目标的分界点。测试的结果如表 6-3 所示，当选择门限为 2 时，室外的误报仍然严重。而当加到 3 时，虽然短时间内误报减少了，但是雷达仍然在一段时间后就报警，还是不够稳定。加到 4 时，较为合适，测试过程中没有出现明显的误报问题。加到 5 时，和 4 的误报差不多，但是能感觉出来系统有一定的延迟性。而如果将结果加到 6，就会发现延迟感很强，而且远距离下需要不停的动才能被探测到。设计测试，以 11m 和 13m 处的探测效果为标准进行测试。

表 6-3 选择频率门限时的测试

门限设定	11m	13m	灵敏性
2	-	-	有误报，且严重
3	可以	可以	有时误报，误报间隔约 1 分钟左右
4	可以	可以	误报少
5	可以	可以	误报少，略有延迟感
6	可以	可以	有延迟感

根据测试的结果趋势，最终选择了 4 作为频率门限。

6.4 实验结果分析

最终，设计好的微波探测算法需要在室内室外环境下分别研究。室内环境，选择空旷的室内矩形场地，长 10 米宽 10 米，正负 55 度角布局 6 米，0 度角布 10 米^[33]，测试的结果发现，3 米、6 米处，可以做到一步动作就能够报警的灵敏度（就是人刚要走迈出脚或者摆手臂就能引发微波探测系统报警），在 10 米、9 米处，需要人踏出一步才能出发系统报警。这个是由于距离原因导致的，距离越近，小动作就能引发大幅度的信号从而产生报警，而在距离较远的地方就需要比较完整的行走动作才会触发报警。正负 55

度角两侧，3 米处与 0 度角的探测效果相似，6 米处与 0 度角 10 米处相似，最远能触发报警的距离是 7 米。测试误报率，收集地上的干枯树叶，置于 2 米高，距探测器 5 米远，缓慢洒落，未见微波探测系统报警。选几件衣服，站在 5 米远的距离，置于 1.8 米的高度，分缓慢抖动、中等抖动、剧烈抖动三种方式进行。缓慢抖动的抖动速度为 0.2m/s ，中等强度的抖动为 0.8m/s ，剧烈抖动为 2m/s ，抖动的长度为 20cm 。其中缓慢抖动偶尔可见微波探测系统报警，增加距离到 8 米时不见报警，中等和剧烈抖动均未见报警。可以认为该算法能够抵抗一定程度的衣物抖动目标。

在室外探测，选择在操场的一角进行，探测器摆放高度 2 米，0 度角探测标尺 15 米，两侧 55 度角探测标尺 10 米长。采用人穿行的方式进行。可测得结果，0 度角探测距离 12 米之内能够做到人走一步就报警的灵敏度，12~14 米需要人走两步以上，而且发现人从 12 米走向 14 米需要走四步才能出发报警，而从 14 米走向 12 米两步即可触发报警。两侧的有效探测距离为 6~7 米。经过分析，认为是当人径向靠近探测器时回波幅度会有几个较大的峰值，这些峰值触发了报警。同样的测试树叶飘落，在室外场景下未见报警，但当树叶是在 2 米处释放的，有时会触发报警。衣服抖动的测试与室内相同。室外还增加了一项模拟测试，使用 1.5 米的衣架将衣服挂起来，放置于探测器 0 度角 5 米处的位置，当时根据气象记录，地区最大风力达到了 6 级，观察了 2 分钟，没有发现报警。可以认为防误报的效果较好。

6.5 本章小结

本章设计了微波探测系统相应的增强幅度门限算法，并给出了一些具体的测试方法及测试结果。根据最终的结果分析，该算法能够在本系统中使用，能够达到室内室外安静环境下不误报，落叶基本不误报，衣服在防区内 5 米外误报率低，基本达到设计的要求。

第七章 红外探测系统算法设计

7.1 引言

本章是第五章的后续章节。从本文前面的章节可以知道，红外探测器主要依靠红外辐射水平的变化来判断是否存在目标，其产生的波形以脉冲式波形为主。

由第 3 章的软件设计，留给 ADC 的采样速率是微波探测系统的 1/10，为 198Hz，ADC 转换精度与时间都与微波探测系统相同。但是红外探测系统的幅度门限依赖于环境温度的状态，每次采样之前都需要先采集温度探测器的结果来确定幅度门限，之后才是采集红外探测系统的信号。红外探测的结果波形脉宽都在 1~2 秒的长度，如果完整采样后再进行判决，系统的判决时间太长是不能忍受的。因此，本文打算采用直接的幅度门限来实时的确定报警。

7.2 幅度门限

温度探测使用的是热敏电阻，通过热敏电阻和固定电阻分压电源电压得到温度值。测试点的电压值与热敏电阻的温度呈反比。当手按在热敏电阻表面一段时间（1 分钟）后，认为热敏电阻表面温度为 37 摄氏度，得到一个实际的采样值，并考虑一定的误差最终确定下了幅度门限。

观察第 5 章的测试结果能够发现，类似于人体这种有明显的热量目标在红外探测区域内出现或者移动，将会导致红外探测系统输出波形幅度在 0.5V 以上。如果幅度门限设置的过小，环境温度的一些变化就可能导致误报，设置的过大则探测的距离又会明显降低。本文通过实验的方法，考虑到要保证探测距离要在 11 米附近，最终选择 0.2V 作为报警门限。测试地点选择在室外，在不同距离下横向走动，观察 0 度角下最远能够触发红外探测系统报警的距离。当探测区域内没有人时，允许有不强烈的风（3 级及以下），观察一段时间内（至少 1 分钟）是否出现误报，并记录数据。

当环境温度接近人体温度时，需要的另一种门限，参考了市场上的一些红外报警模块（在夏天室温接近体温的状态下测试过能够达到 10 米左右的测试范围），故设定门限值为 0.1V。

7.3 实验结果分析

根据上一节设计的算法，在室外的环境下进行了相应的测试。室外测试场地标尺 0 度角 13 米，左右 47 度角各标 10 米，人采用横向移动的方式单独测试红外探测系统效能。第一次测试采取在室外荫蔽处进行，即测试场地与探测器均处于无阳光直射的位置。测试结果为 0 度角 11 米，左右 47 度角达到 7 米。同时，测试了误报效果，即测试一段时间内，探测区域内没有人或者其他明显热源移动，在当天气象记录风速在 3 级时，2 分钟内，未出现误报情况。认为红外探测系统在静息条件下误报率低。第二次测试是在

室外条件下，探测器以及探测场地均有阳光直射，探测人的横向移动，结果与在荫蔽处测试结果相同。另有一次测试，场景相同，但当天最大风力达到 7 级，且有明显的降温感觉，红外探测系统在风速非常大时发生了误报，推测是由于冷空气流动引发了探测区域内红外辐射水平的动态变化，导致红外探测系统报警。

7.4 本章小结

本章主要设计了红外探测系统的探测算法，用的是最基本的幅度门限来探测，以求响应速度最快。由于这种单一门限带来的误报，本文采用后续联合探测系统探测的方法予以解决。

第八章 微波红外联合探测系统

8.1 引言

到这里，本文已经设计的一套系统中，既包含有红外探测系又包含有微波探测系统，并且他们相应的算法实现都已经设计了。对于微波探测系统而言，它的好处在于能够分辨物体的运动与否，并且能利用探测到的物体运动信息来简要的区分目标是不是包含人的步态多普勒特征，虽然它对本文所认为的树叶、摆动的衣物等假目标有一定的防误报特性，同时也对室外的复杂环境下具有一定抵抗噪声的能力，但不可否认的是，它对与人有着相同或者相似的多普勒频率的目标误报率会很高，这是由于本文的算法局限性所致。因此，微波探测系统不能够单独使用。红外探测系统，得益于菲涅尔透镜和热释电红外传感器本身的结构特性，其对白光干扰有一定的抑制作用，再加上幅度门限能够很好的滤除大部分的白光干扰，但是当探测区域中存在发热物体，例如计算机机房等场景下，携带明显不同于环境温度的热量的空气这种干扰源的干扰作用仍然是不可忽视的。另一方面，根据大量的参考文献以及市面上一些已有的单被动红外探测产品来看，其误报问题仍然没有低成本的有效解决方法。可见联合探测算法是有必要的。本章接下来就要研究设计这样的一套算法。

8.2 算法设计

人这种目标，既能够引起红外探测系统的报警输出，又能够被微波探测系统探测到，将两个系统联合起来确认目标在理论上是可行的。而两个系统，当运动物体出现引起微波探测系统报警时，物体(不考虑发热大型动物)通常不会产生额外的红外辐射进而不会引发红外探测系统报警，因而最后不产生报警输出。反过来如果物体只是红外辐射水平变化而没有运动或运动的多普勒频率与人不相似，同样只能引发一种探测系统报警而达不到最终报警的要求，因此该联合报警的算法还能显著降低这个探测系统的误报率。既然两个系统探测人目标是简单的“与”关系，因此本章的算法核心就是红外和微波探测系统报警结果作“与”。

要达到最终的报警输出，需要两个系统均被触发报警。在实际测试中，发现人在探测区域内行走触发红外和微波探测系统是有先触发和后触发的差别的，主要体现在如果是完全的横向运动则红外探测系统先被触发，报警灯亮后大概延迟 1 秒左右微波探测系统的报警灯才亮起，而当人是完全的纵向运动时，红外探测系统又延迟于微波探测系统被触发，这些现象是符合这两个系统各自的敏感特征的。基于此，使用延迟报警的办法是可行的，即延长两个报警系统的报警时间，使得即使存在触发延迟也能够达到最终报警的条件。延迟时间过短，达不到消除漏报的效果，时间过长又会恶化联合探测系统降低的误报率。因此，本文决定采用实验的方法测量最佳的延迟时间。恶化误报率的效果与延迟时间呈现正相关的特性，越长的时间会将原本两个不相关的红外和微波探测结

果人为的关联到一起，从而引发误报。延迟时间在满足漏报的效果后尽可能越短越好。实际测试漏报是让人在 11 米到 9 米之间呈 S 形穿越探测区域，观察系统的报警情况。

8.3 实验结果

设计好该系统的整体算法后，需要对系统的整体算法性能作测试。测试场地选择在室外进行，场地的 0 度角标尺选择在 15 米，左右 55 度标尺标识到 10 米。人采用 S 形行走的方式进行测试。测试的结果，在 0 度角 11 米之内可以做到人走 1 步就可以有效报警的效果，在 11 米至 13 米之间，需要人走 2 步以上才能触发报警，13 米之外基本只有微波探测系统报警，红外探测系统不报警。左右 55 度角只有微波探测系统报警，无红外探测系统报警。左右 47 度角可见整体报警，距离在 7-8 米，灵敏性同样达到一步报警。

接下来本文比对了几种干扰源条件下的误报情况

表 8-1 微波探测系统的干扰比对

品牌	树叶干扰	衣服干扰
国内厂商 1	5m	11m
国内厂商 2	5m	11m
本文设计的	3m	3m

表 8-2 红外探测系统的干扰比对

品牌	白光干扰
国内厂商 1	会误报
国内厂商 2	会误报
本文设计的	会误报

由测试结果表 8-1 以及表 8-2 可以发现，本文设计的微波探测系统有着更好的防误报的性能，在保证一定探测距离下降低了在树叶干扰和衣服摆动干扰下的误报率。虽然正对红外探测系统的白光，三种探测器均存在有误报，但是当联合探测时，单纯的红外探测系统误报并不会引起联合探测系统的误报，出于这方面考虑，本文暂时没有着手解决这个问题。

在此基础上，本文又依据国家标准 GB10408.6—2009 对上述探测器以及另外几个国内外厂商的类似探测器进行了测试，测试的结果可以有下表表示

表 8-3 按照国家标准的测试结果

		国内厂 商 1	国内厂 商 2	国内厂 商 3	国外厂 商 1	国外厂 商 2	国外厂 商 3	本文 设计
0.3m/s(边界内移动探测)	0°	8.5m	12m	9m	10m	11m	7m	11m
	±20°	8m	12m	9m	10m	10m	7m	11m
	±40°	8m	11.5m	8m	9m	10m	7m	11m
1m/s(边界穿越探测)	0°	7.5m	12m	9m	8m	10m	6m	9.5m
	±20°	7.5m	11m	9m	7m	10m	7m	9.5m
	±40°	7m	11m	8m	6m	9.5m	7m	9.5m
2m/s(快速移动探测)		通过	通过	通过	通过	通过	通过	通过
备注		无	易误报 远处物体	阵风易 报警	无	无	红外不 灵敏	无

从测试结果表 8-3 中，可以看出本文设计的探测器，对人体运动的快速或者慢速移动探测都有效，且探测距离在同类产品中处于上游水平的同时还具有优良的低误报率。具体的测试过程描述读者可以参考国家标准 GB10408.6—2009 以及由李昱冰撰写的《小型化微波红外双鉴探测器信号板开发》，本文不再赘述。

8.4 本章小结

本章设计使用联合探测算法，达到了减小在单一系统误报下整体系统的误报率的效果。同时经过与一些同类产品的比较，可以确认出本文所设计的系统拥有较好的防误报效果。

第九章 总结与展望

9.1 总结

红外微波双鉴探测器在民用安防市场有着巨大的应用前景，提高此类安防产品的使用效果，降低产品的误报率有着重要的意义。本文针对低误报红外微波双鉴的探测器的算法进行研究，给出一种简单的低误报微波探测算法，以解决微波探测系统在特定的场景下误报率高的问题。本文针对人体的多普勒效应，使用简单的幅度与频率探测门限，达到了区分人体目标与非人体动目标的效果，并利用红外探测系统进一步降低整体系统的误报率。由于算法简单易于实现，能够在低成本单片机上运行，可以有效地降低探测器的物料成本、降低算法复杂度的同时也降低了计算开销，对整体功耗的需求也就相应的减小了，使其更容易达到小型化、轻便化的特点。本文还研究了单片机的系统，使整个采样、处理、控制的流程可以在一块芯片上完成，提高了产品的集成度。

9.2 展望

尽管本文设计了低误报红外双鉴探测器的一种实用算法，并实现了出来，但该算法还存在一些不足，仍然存在一些问题以待后续的研究：

首先是红外探测系统针对白光的干扰，防误报的效果仍然不够理想，本文受限于个人水平以及时间等关系，没有深入的探究如何在保证探测速度的同时达到减小白光干扰带来的误报率问题，这有待后续的研究。

其次是微波模块的采样结果有时候会出现 50Hz 的噪声干扰，有时候会在 100Hz，这个也会干扰到微波探测系统的正常运作，尽管本文使用了滑动平均滤波算法来减小干扰，但是干扰源的原理尚不明晰，有待下一步的探究。

最后为联合探测系统现在还只是简单的与关系，虽然在测试中误报率已经明显降低了，但是是否还存在红外探测系统与微波探测系统报警的另一种联合关系，可以获得更低的误报率，这也有待进一步的研究探讨。

未来，本文所设计的算法除了可以运用在入侵探测器上，还能够运用在智能设备中用来区分人与非人目标的场景上。例如在智慧楼宇中判别人体目标可以使用本文设计的算法和系统，在节能灯的开关控制上也能够使用这套系统进行区分，在智能家居中也能够使用这套系统来判断区域内有无人的运动等等。本文的算法基于单片机系统实现，能够很方便的集成到各种嵌入式系统中去实现各种不同的应用，该算法未来的广阔运用场景可见一斑。

参考文献

- [1] 戚振兴. 浅议我国智能家居发展[J]. 广西轻工业, 2009(10):63-64.
- [2] 梁亚林, 张永立, 沈天健. 基于PIC12F675的低误报智能入侵探测器设计[J]. 测控技术, 2003(09):22-24.
- [3] 宋燕星, 高琴, 姚振静, 等. 主动红外探测式视觉生命探测系统[J]. 红外技术, 2012(09):521-524.
- [4] 李侠. 常用入侵探测器浅析[J]. 数字技术与应用, 2013(03):254.
- [5] 杨旺严. 主动红外入侵探测系统研究与设计[D]. 华南理工大学, 2011.
- [6] 黄传明. 中心频率为10.525GHz的DZ9861微波探测器模块及微波红外双鉴控制器DZ9862[J]. 国外电子元器件, 2002(06):56-58.
- [7] 张月桥, 杨小平. 降低误报的三鉴智能探测器的硬件和软件设计[J]. 现代电子技术, 2007(12):4-5.
- [8] GIORDANO N. College Physics: Reasoning and Relationships[M]. Cengage Learning, 2009: 421-424.
- [9] 魏萌. 微多普勒效应分析及参数提取[D]. 电子科技大学, 2010.
- [10] 刘国岁, 孙光民. 连续波雷达及其信号处理技术: 中国电子学会;95雷达新体制及雷达控制技术研讨会, 西安, 1995[C].
- [11] WOLFF C. Continuous Wave Radar[EB/OL]. [2017年9月12日].
<http://www.radartutorial.eu/02.basics/Continuous%20Wave%20Radar.en.html>.
- [12] 李博雅. 基于PIR传感器的目标跟踪系统的设计与实现[D]. 武汉理工大学, 2015.
- [13] 易金桥, 黄勇, 廖红华, 等. 热释电红外传感器及其在人员计数系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2015(04):1186-1192.
- [14] PIR SENSOR CO. L. Pyroelectric Infrared Radial Sensor[Z]. 2005.
- [15] 李等. 基于热释电红外传感器的人体定位系统研究[D]. 武汉理工大学, 2015.
- [16] 孙华, 李扬. 热释电红外传感器原理及其应用[J]. 内江科技, 2010(12):116-160.
- [17] 陈志明. 菲涅尔透镜聚光性能研究[D]. 中国计量学院, 2013.
- [18] 海大鹏. 菲涅尔透镜的加工工艺研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.
- [19] 吕璠. 热释电红外报警器的设计[D]. 河北工业大学, 2011.
- [20] 蔡晓艳, 胡爱娜, 王照平. 基于Atmega8低功耗智能微波探测器的设计[J]. 电子设计工程, 2013(22):178-181.
- [21] 谢白玉. 户外被动红外探测器的设计[J]. 办公自动化, 2013(12):34-36.
- [22] 李坡. 雷达目标微动信号分离与参数估计方法研究[D]. 南京理工大学, 2012.
- [23] 黄斌科, 李飞. 基于微多普勒特征的运动步态识别[J]. 四川兵工学报, 2010(12):56-58.
- [24] VICTOR C. CHEN D T W J. Radar Micro-Doppler Signature: Processing and applications[M]. The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, Six Hills Way, Stevenage, Herts,

- SG1 2AY, London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2014: 139-186.
- [25] 方红光. 微波探测器在实物保护系统中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2015(13):157-158.
- [26] 薛召军, 曹继华, 丁学文, 等. 基于人体红外辐射的身份识别新方法[J]. 天津职业技术师范大学学报, 2012(01):1-5.
- [27] 程素平. 热释电红外传感器及其报警电路[J]. 建材技术与应用, 2007(10):16-17.
- [28] 周健. 基于MSP430单片机的低功耗智能入侵探测器设计[J]. 福建广播电视大学学报, 2015(04):52-55.
- [29] 刘永敬. 用于人体目标感知与定位的被动式双红外探测系统研究[D]. 天津大学, 2014.
- [30] 陈龙. 基于无线热释电红外传感器人体目标识别的研究[D]. 武汉理工大学, 2013.
- [31] 胡巍. 基于多普勒雷达的非接触式生命体征检测技术研究[D]. 中国科学技术大学, 2014.
- [32] 吴忻生, 唐萍, 秦瀚. 数字滤波技术在称重系统信号采集中的应用[J]. 传感器与微系统, 2010(09):131-134.
- [33] 杨润丰, 卞建勇, 杨洋. 基于ATmega16的红外微波双鉴GSM报警器[J]. 微计算机信息, 2011(07):35-37.

致 谢

值此论文即将结束之际，我首先要感谢李秀萍老师，她给予了论文工作大力的支持，并指导了我的工作，感谢李老师在本科最后两年的时间内给我锻炼的机会，养我能够尽早的参与到实验室的项目中，才取得了今天的成长。感谢杨农军老师，他对本文的研究工作也提供了大力支持，并一直给予我攻克问题的心。同时要感谢本科期间执教过我的老师们，老师们对待学术严谨的态度和对我的谆谆教导我始终铭记在心。

其次要感谢给予本文大力支持的李昱冰同学，李昱冰同学作为我大学期间的挚友，与我一同参与完成了这个项目，并在硬件设计上倾注了大量心血，可以说如果没有他的支持，我所设计的这些软件也就无从实现。同时也要感谢他陪伴了我大学四年，以及一直给予我学习上的帮助。接下来还要感谢李江涛，论文中的大量测试都是由李江涛协助完成的，保证了数据的采集准确而又快速。再者还要感谢北邮射频研究实验室的学长学姐，他们的研究 10.525G X 波段雷达模块是本文设计的基础，同时还要感谢他们在本文研究期间无私的帮助。感谢李剑菡学姐在我进入实验室后的帮助和支持。感谢陈德阳同学一起参与研究工作，并提出了许多有用的建议。感谢黄泽萌同学和章怡师姐在外场测试时候的协助。感谢赵文禹同学和祁振国同学为论文的测试方案出谋划策。

在本科期间，要感谢我的室友达周、李昱冰、肖龙立林、谭柯、李博涵、林昊、卫帅、罗琦、陈子杰、吴世鑫，他们在我的学习和生活上给予了我莫大的支持。同时还要感谢我的同伴同学们，他们在我的本科学习期间一同留下了美好的记忆。

感谢我的父母始终支持我、鼓励我，在我成长期间始终指导着我，不论是从学习还是生活上，都使我得以健康成长。

最后还要感谢各位评审老师，他们对论文的研究工作提出了诚恳、宝贵的建议，并指出了研究工作的提高方向。在以后的学习生活中，我将不忘老师和同学们给我留下的深刻回忆，并继续努力向前奋进。