



南京理工大学
NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

雷达信号处理 实验报告

组员 : 许晓明 学号 : 9161040G0734
组员 : 周世峰 学号 : 916104330154
学院 : 电子工程与光电技术学院
专业 : 电子信息工程
题目 : 雷达信号处理
实验报告
教师 : 张文青

2020 年 11月

目录

1 正交相干检波器	1
1.1 实验目的	1
1.2 实验仪器	1
1.3 实验原理	1
1.4 实验步骤	2
1.5 实验结果	3
1.5.1 波形记录	3
1.5.2 幅度平衡与相位平衡	4
1.5.3 中频本振振幅不平衡度	6
1.6 思考题解答	6
2 匹配滤波器	8
2.1 实验目的	8
2.2 实验仪器	8
2.3 实验原理	8
2.4 实验步骤	9
2.5 实验结果	9
2.6 思考题解答	12
3 动目标检测及相参积累	14
3.1 实验目的	14
3.2 实验仪器	14
3.3 实验原理	14
3.4 实验步骤	16
3.5 实验结果	16
3.6 思考题解答	18
利用MATLAB复现数据波形	19
复现原理	19
MATLAB代码	19
部分复现数据与示波器图片对比	19

实验一 正交相干检波器

在雷达信号处理中,由于信号与干扰混合波形的振幅和相位均含有信息,因此对信号最佳处理应在接收机的中频进行。但是,对信号进行数字处理时,在中频进行采样是很困难的。由于中频本身并无目标信息,目标信息包含在中频的复包络中。因此,须将中频信号变成等效的复数视频信号,以利于用数字处理。正交相干检波器就是一种将中频信号变换成复数视频信号的装置。

1.1 实验目的

1. 掌握正交相干检波的基本原理,实现方法和运用它检测信号(例如多普勒信号)。
2. 掌握正交相干检波器幅度一致性和相位正交性(幅度不平衡度)的测量方法。

1.2 实验仪器

信号源、示波器、直流稳压电源

1.3 实验原理

本实验的原理方框图如图1.1所示。

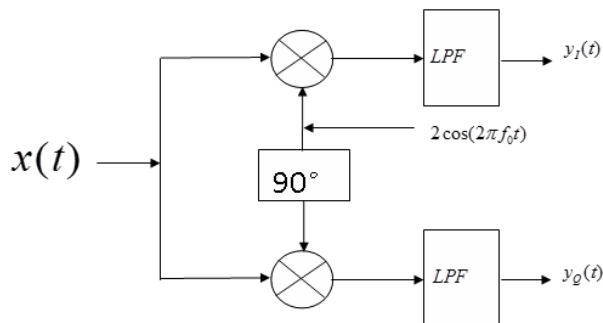


图 1.1 正交相干检波器原理方框图

假定图1.1中输入的实窄带信号为:

$$x(t) = a(t) \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)] \quad (1.1)$$

其中, $a(t)$ 为实窄带信号的幅度调制; f_0 为实窄带信号的中频 $\varphi(t)$ 为实窄带信号的相位调制。如果 $x(t)$ 用复指数表示,可写成:

$$x(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}e^{j2\pi f_0 t} = \mu(t)e^{j2\pi f_0 t} \quad (1.2)$$

其中, $\mu(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}$ 是复包络, $e^{j2\pi f_0 t}$ 是复载频。

$x(t)$ 中的信息全部包含在复包络 $\mu(t)$ 中，所以只要处理 $\mu(t)$ 就可以得到信号的全部信息。复包络 $\mu(t)$ 可进一步写成：

$$\mu(t) = a(t)e^{j\varphi(t)} = a(t)\cos\varphi(t) + ja(t)\sin\varphi(t) \quad (1.3)$$

参见图1.1，I支路乘法器的输出为：

$$x(t)x_L(t) = 2a(t)\cos[2f_0t + \varphi(t)]\cos(2\pi f_0t) = a(t)(\cos\varphi(t) + \cos[4\pi f_0t + \varphi(t)]) \quad (1.4)$$

经过低通滤波（LPF）后输出为：

$$y_I(t) = a(t)\cos\varphi(t) \quad (1.5)$$

同样，Q支路乘法器经过低通滤波（LPF）后输出为：

$$y_Q(t) = a(t)\sin\varphi(t) \quad (1.6)$$

用 $y_I(t)$ 作为实部， $y_Q(t)$ 作为虚部，组成一复信号恰好是中频 $x(t)$ 的复包络，即：

$$\mu(t) = y_I(t) + jy_Q(t) \quad (1.7)$$

因 $y_I(t)$ 和 $y_Q(t)$ 均为视频信号，而且包含了原信号的幅度和相位

$$\begin{cases} a(t) = \sqrt{(y_I^2(t) + y_Q^2(t))} \\ \varphi(t) = \tan^{-1} \frac{y_Q(t)}{y_I(t)} \end{cases} \quad (1.8)$$

经变换后，就可对信号进行数字处理。

1.4 实验步骤

1. 连接实验装置；

2. 幅相不平衡度测量方法；

(1). 从示波器上读取正交I、Q信号的电压幅度值为 A_I 和 A_Q ，按公式：

$$\Delta A = 20 \lg \frac{A_I}{A_Q} (dB) \quad (1.9)$$

计算幅度平衡值。

(2). 测量TA和TB的值，按公式：

$$\Delta\varphi = \left| \frac{TA - TB}{TA + TB} \right| \times 90^\circ \quad (1.10)$$

计算相位平衡度。

3. 记录波形；

4. 测数据；

1.5 实验结果

1.5.1 波形记录

各类输出波形情况见表1.1。

表 1.1 正交相干检波器波形记录

符号	含义	波形
QQ	Q路输出 (LPF后)	
II	I路输出 (LPF后)	同上，黄色为Q路输出，蓝色为I路输出
Q	Q路输出 (LPF前)	
I	I路输出 (LPF前)	同上，黄色为Q路输出，蓝色为I路输出
/FO	中频正交本振	
FO	中频本振	同上，黄色为中频正交本振，蓝色为中频本振
IN	中频输入信号	

1.5.2 幅度平衡与相位平衡

在计算相位平衡情况时，首先易知两路波形的周期应当一致，设为 T ；再设两路波形的相位差为 $\Delta\phi$ （单位：度），则 $TA = \frac{\Delta\phi}{360^\circ} \cdot T$ ， $TB = \frac{T}{2} - TA = \frac{180^\circ - \Delta\phi}{360^\circ} \cdot T$ ，化简相位平衡度计算公式可得：

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi &= \left| \frac{TA-TB}{TA+TB} \right| \times 90^\circ \\
 &= \left| \frac{\frac{\Delta\phi}{360^\circ} \cdot T - \frac{180^\circ - \Delta\phi}{360^\circ} \cdot T}{\frac{\Delta\phi}{360^\circ} \cdot T + \frac{180^\circ - \Delta\phi}{360^\circ} \cdot T} \right| \times 90^\circ \\
 &= \left| \frac{2\Delta\phi - 180^\circ}{180^\circ} \right| \times 90^\circ \\
 &= \left| \frac{2\Delta\phi - 180^\circ}{180^\circ} \times 90^\circ \right| \\
 &= \left| \frac{2\Delta\phi - 180^\circ}{2} \right| \\
 &= |\Delta\phi - 90^\circ| \\
 &= |90^\circ - \Delta\phi|
 \end{aligned} \tag{1.11}$$

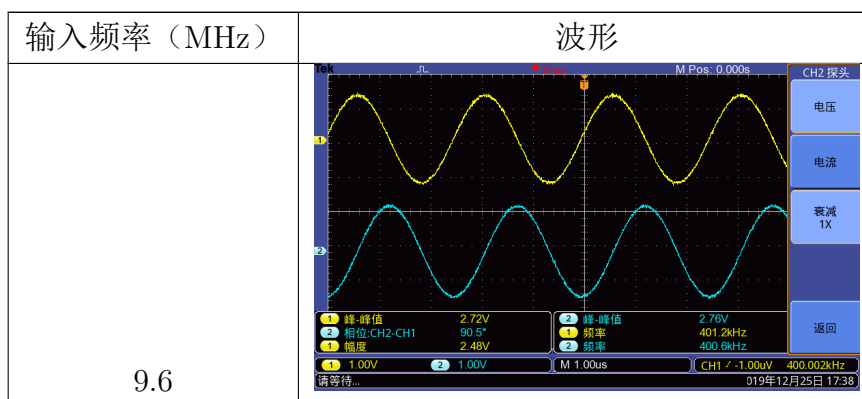
即，**可以通过计算两路波形相位差与 90° 的差来得到相位平衡度**，而幅度平衡与相位平衡数据见表1.2。

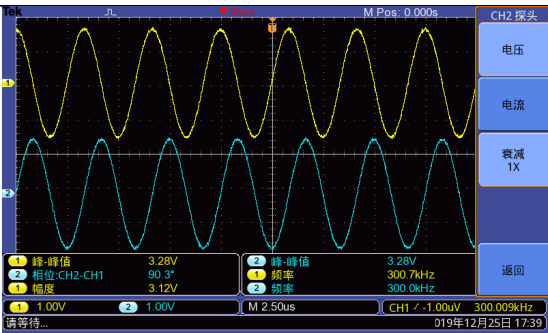
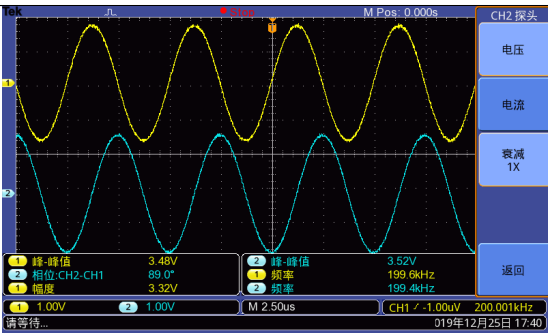
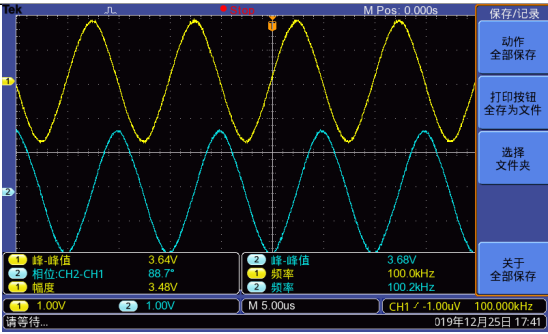
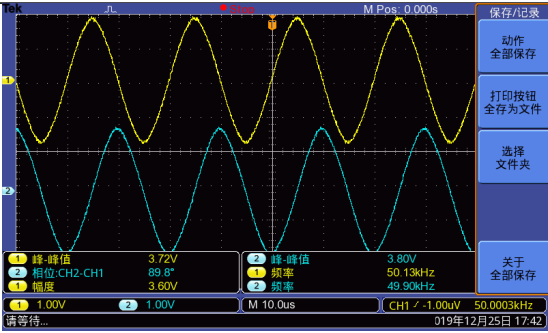
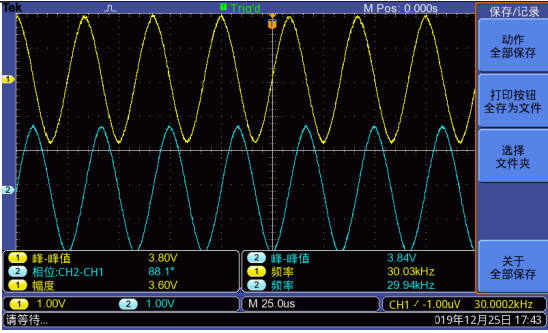
表 1.2 正交相干检波器幅度平衡与相位平衡测试数据

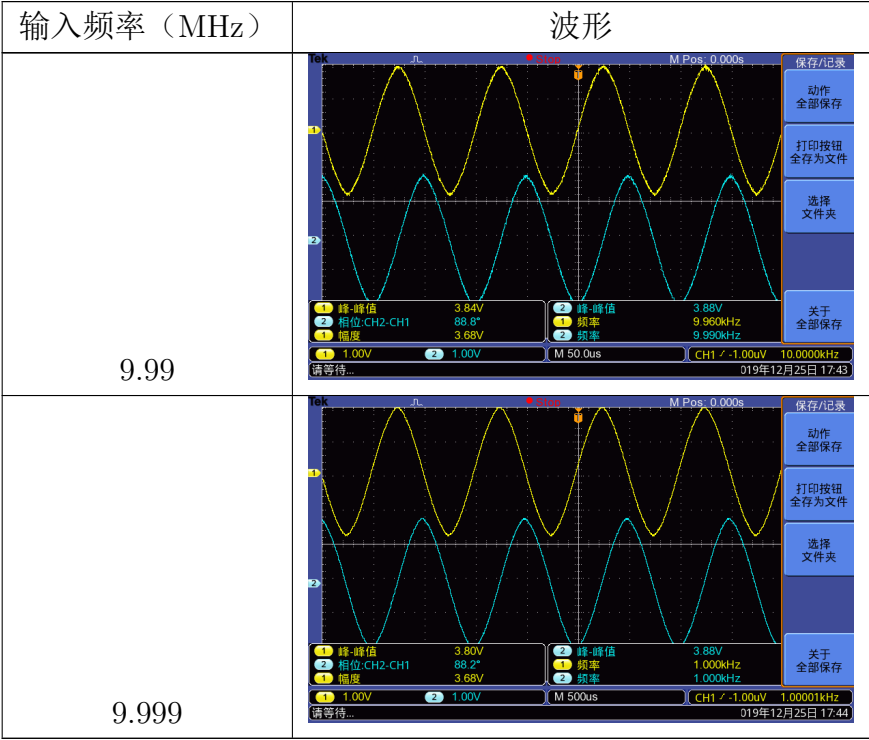
输入频率（MHz）	9.6	9.7	9.8	9.9	9.95	9.97	9.99	9.999
检波器输出频率（KHz）	400.6	300	199.4	100.2	49.9	29.94	9.99	1
ΔA 幅度平衡（dB）	-0.1268	0	-0.0993	-0.0949	-0.1848	-0.091	-0.09	-0.091
Δj 相位平衡（°）	0.5	0.8	1	1.3	0.2	2.9	1.2	2.2

对应的波形情况如表1.3。

表 1.3 正交相干检波器幅度平衡与相位平衡波形



输入频率 (MHz)	波形
9.7	
9.8	
9.9	
9.95	
9.97	



1.5.3 中频本振幅相不平衡度

中频本振幅相不平衡度数据见表1.4，对应的波形如图1.2 所示。

表 1.4 正交相干检波器中频本振幅相不平衡度测试数据

性能	ΔA 幅度平衡 (dB)	Δj 相位平衡 (°)
数据	-0.6737	6.2

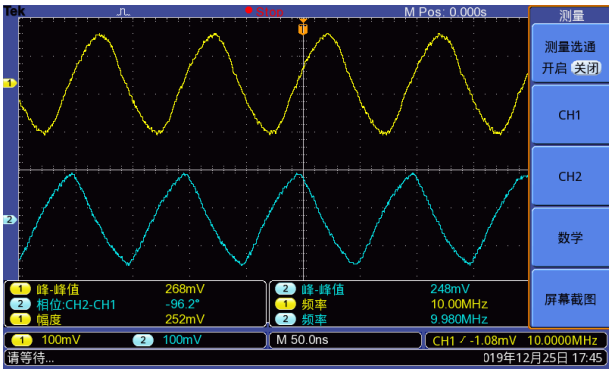


图 1.2 正交相干检波器中频本振幅相不平衡度波形

1.6 思考题解答

1. 幅相不平衡是什么原因造成的？

模拟移相器输出正交的sin和cos信号很难完全保证幅度完全相同，相位相差90度，使得输出信号存在误差；同时，实验中解调后，还需低通滤波、放大处理，由于模拟滤波器和放大器不可能做到电路元件参数完全一致，再加上温度等外界环境的影响，出现误差。

2. 幅相不平衡如何进行调整？

可以采用误差校正技术。接收机在检波前注入一个已知的理想信号，该号必须是已知其特性的合成多普勒信。经检波和处理后输出的信号可以反应检波器的幅相不平衡情况，对这个信号进行误差数据分析并整理出校正信息，则可在后续系统工作时，借助校正信息实现校正。

3. 不同频率下为什么幅相不平衡度不一致？

由于两通道的元器件是有源的，在不同频率下的偏差不一致，使得不同频率下幅相不平衡度不一致。

实验二 匹配滤波器

2.1 实验目的

1. 了解匹配滤波器的工作原理。
2. 掌握二相编码脉压信号的压缩比、主旁瓣比、码元宽度的测量方法。
3. 加深和巩固课堂所学有关距离分辨力、横向滤波器和匹配滤波方面知识。

2.2 实验仪器

示波器、直流稳压电源、万用表。

2.3 实验原理

二相编码信号的匹配滤波器为：

$$H(f) = \mu_1(f) \cdot \mu_2(f) \quad (2.1)$$

式中， $\mu_1(f)$ 为子脉冲匹配滤波器， $\mu_2(f)$ 为横向滤波器（即抽头加权延时线求和网络）。二相编码信号的匹配滤波器结构如图2.1所示。

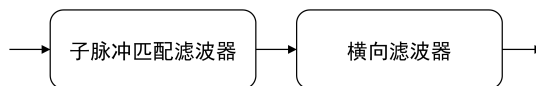


图 2.1 二相编码信号的匹配滤波器结构

子脉冲匹配滤波器频率特性为：

$$\mu_1(f) = \sqrt{\frac{T}{P}} \text{sinc}(fT) e^{j\pi fT} \quad (2.2)$$

横向滤波器频率特性为：

$$\mu_2(f) = \sum_{k=0}^{p-1} c_{(p-1)-k} e^{-j2\pi f(KT)} \quad (2.3)$$

式中，P为码长；T为码元宽度；CK为二相编码信号。

在此，采用数字信号处理省略了子脉冲匹配滤波器，所以脉压输出不再是三角波而是方波。横向滤波器（即抽头加权延时线求和网络）的结构如图2.2所示，在此采用超大规模集成电路完成。

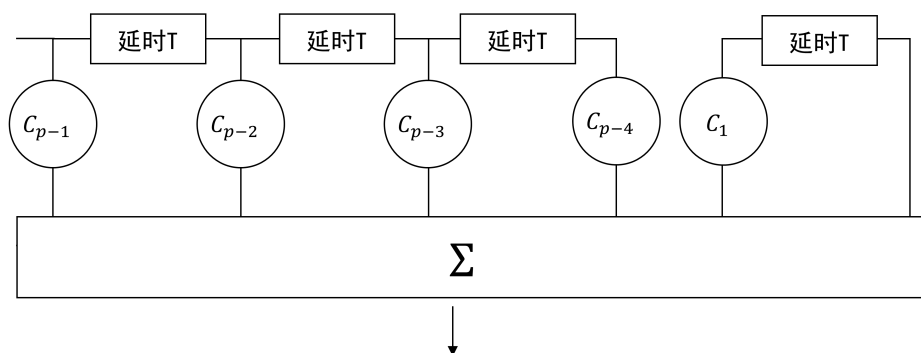


图 2.2 横向滤波器（即抽头加权延时线求和网络）结构示意图

2.4 实验步骤

1. 检查实验箱电源以及信号输出的连接方式。
2. 打开实验箱电源以及示波器，调整示波器使观察信号最佳。
3. 按键 K1，数码管显示 P，观察 OUT1 输出的单脉冲信号以及 OUT2输出的匹配滤波信号，记录输出波形。
4. 用示波器测量压缩比、主旁瓣比、码元宽度等参数。
5. 再次按键 K1，改变单脉冲信号码元宽度，LED4 显示带小数点。观察信号及匹配滤波输出的改变，测量各项参数。
6. 依次按键 K2~K7. 选择不同的输入信号，重复步骤 2~4，观察波形，记录数据。
7. 关闭实验电源，总结实验数据。
8. 记录实验数据数据，进行分析。

2.5 实验结果

匹配滤波器测试数据见表2.1，对应的波形情况可参加表2.2。

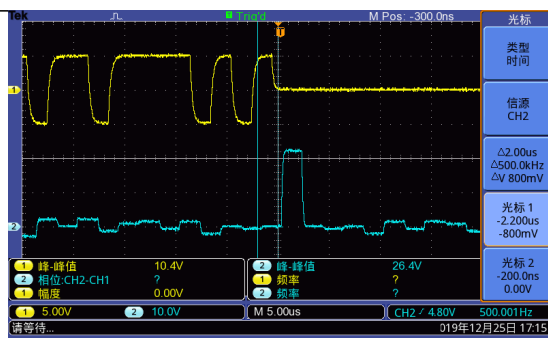
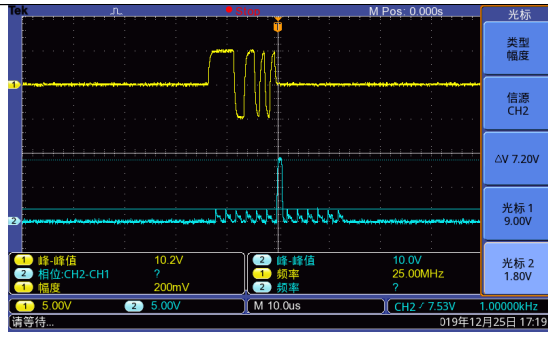
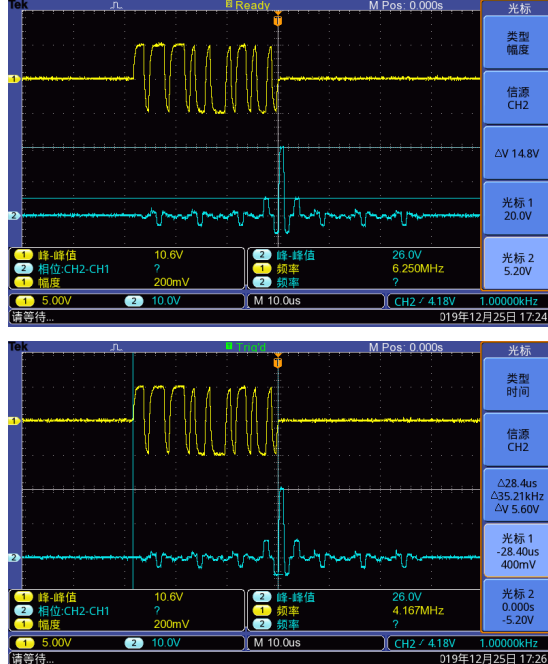
表 2.1 匹配滤波器测试数据

序号	信号波形	码元宽度	压缩比	主旁瓣比
1	单脉冲	30us	1	
		60us	1	
2	脉冲串	10us	1	
		20us	1	
3	31位M序列	1us	31	
		2us	31	
4	31位PN截断码	1us	31	16.9dB
		2us	31	16.9dB
5	13位巴克码	1us	13	13.98dB
		2us	13	13.98dB
6	4位/7位组合巴克码	1us	28	11.6dB

表 2.2 匹配滤波器测试波形

序号	信号	码元宽度	波形
1	单脉冲	30us	
		60us	

序号	信号	码元宽度	波形
2	脉冲串	10us	
		20us	
3	31位M序列	1us	
4	31位PN截断码	1us	

序号	信号	码元宽度	波形
		2us	
5	13位巴克码	2us	
6	4位/7位组合巴克码	1us	

2.6 思考题解答

1. 为什么脉冲压缩输出波形为方波而不是三角波？

因为采用数字信号处理省略了子脉冲匹配滤波器，所以脉压输出的是方波而不是三角波。

2. 主副瓣比的测量方法有哪些？

方法有：

(1). 通过示波器，测出幅度最大时的电压大小，再测出幅度第二大时的电压大小，两者的比值再换算成分贝，即为主旁瓣比值。

(2). 主旁瓣比 = (主瓣 - 副瓣) \times 24.2

3. **31位PN截断码（m序列中截取一个周期）与31位m序列的脉冲压缩输出波形为何不一样？**

截断序列是从M序列中截取一个周期所得到的序列，截取后的序列便失去了周期性，而非周期序列的自相关函数没有双电平性，而且截止位置不同的话会得到不同的截断序列码型，所以两者的脉冲压缩输出波形不一样。

实验三 动目标检测及相参积累

3.1 实验目的

1. 了解动目标检测（MTD）及相参积累的工作原理。
2. 掌握动目标检测（MTD）及相参积累的性能测试方法。

3.2 实验仪器

示波器、万用表。

3.3 实验原理

动目标检测（MTD）是利用了动目标雷达回波信号的多普勒频率偏移，采用滤波器组在复杂的雷达回波中检测出运动目标的多普勒频率，并以此来确定动目标的距离、速度和方位。其中，滤波器组具有不同的中心频率，其实质是相当于对不同多普勒通道进行相参积累处理。

当杂波功率谱 $C(f)$ 和信号频谱 $S(f)$ 已知时，最佳滤波器的频率响应是：

$$H(f) = \frac{S^*(f)e^{-j2\pi ft_0}}{C(f)} \quad (3.1)$$

这实际上就是基于有色噪声（这里称为杂波）白化处理的匹配滤波器。这一滤波器可分为两个级联的滤波器和，其传递函数分别为：

$$\begin{aligned} |H_1(f)|^2 &= \frac{1}{C(f)} \\ H_2(f) &= H_1^*(f)S^*(f)e^{-j2\pi ft_0} \end{aligned} \quad (3.2)$$

可以粗略的认为， $H_1(f)$ 用于杂波抑制，而 $H_2(f)$ 用于对雷达回波脉冲串信号匹配。对MTI而言，它要使杂波得到抑制而要让各种速度的运动目标信号通过，所以MTI滤波器即相当于 $H_1(f)$ ；至于和目标信号的匹配，对单个脉冲而言可用中频带通放大器来保证，而对脉冲串则只能采用对消后的非相参积累。所以实际能做到的大多数MTI滤波器，只能使其滤波特性的凹口对准杂波梳状谱的中心，且使二者宽度基本相当。有时也将这称为杂波抑制准最佳滤波。对于相参脉冲串信号 $H_2(f)$ 还可进一步表示成：

$$H_2(f) = H_{21}(f)H_{22}(f) \quad (3.3)$$

即信号匹配滤波器为 $H_{21}(f)$ 和 $H_{22}(f)$ 两个滤波器级联。式中 $H_{21}(f)$ 为单个脉冲的匹配滤波器，通常由接收机中放实现； $H_{22}(f)$ 专对相参脉冲串进行匹配滤波，它利用了回波脉冲串的相位特性而进行相参积累； $H_{22}(f)$ 是梳齿形滤波器，齿的间隔为脉冲重复频率，齿的位置取决于回波信号的多普勒频移，而齿的宽度则应和回波谱线宽度相一致。

要对回波相参脉冲串作匹配滤波，必须知道目标的多普勒频移以及天线扫描对脉冲串的调制情况（亦即信号的时宽，对简单信号而言它决定信号的频宽）。实际情况中，

多普勒频移不能预知，因此需要采用一组相邻且部分重叠的滤波器组，覆盖整个多普勒频率范围，这就是窄带多普勒滤波器组，如图3.1所示。

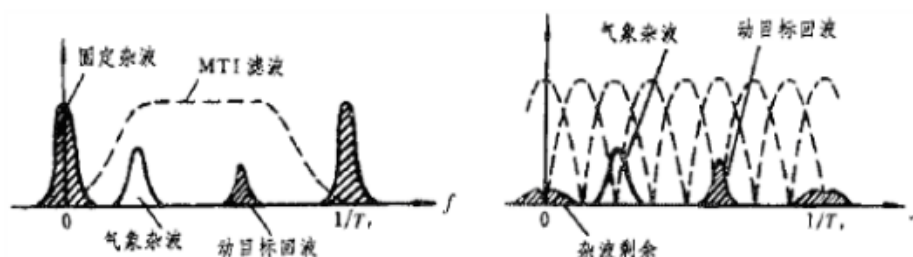


图 3.1 动目标显示和多普勒滤波器组的特性

从图3.1的对比，我们可以看出MTI滤波无法抑制图中具有多普勒频移的气象杂波，气象杂波干扰了动目标信号的检测；但MTD滤波时，气象杂波与动目标回波处于不同的多普勒通道，第5号滤波器通道取出了动目标回波，完全抑制气象杂波对动目标回波的干扰，同时我们也可以初步确定动目标回波的多普勒频移范围。

MTD滤波器具有N个输出的横向滤波器，经过各重复周期的不同加权并求和后，即可实现图1所要求的N个相邻的窄带滤波器组，其原理性结构框图如图3.2所示。

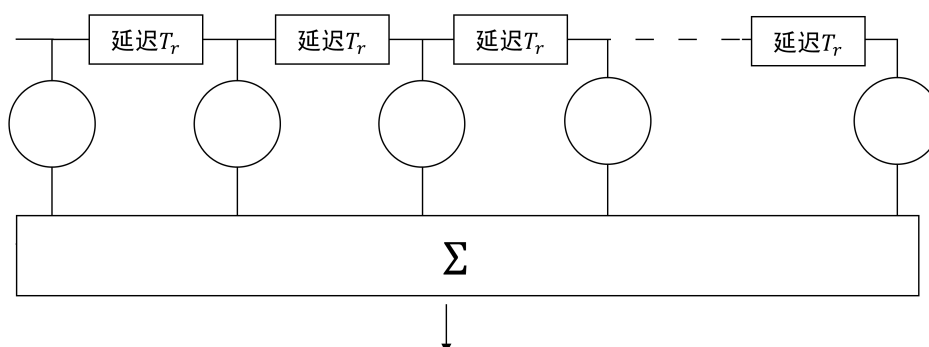


图 3.2 MTD横向滤波器组结构

由于离散傅里叶变换（DFT）是一种特殊的横向滤波器，可以等效成窄带滤波器组，所以若将图2的加权因子按DFT定义选择，并采用DFT的快速算法FFT，就可实现基于FFT的MTD滤波。所以MTD滤波器组既可以在频域利用DFT滤波器组实现也可以在时域采用FIR滤波器两种方法来实现。

图3.3为实际测量的MTD滤波器特性曲线。图中凹口宽度W1与总底部宽度W2之比定义为凹口相对宽度，它代表了抑制杂波的频谱宽度。越宽则抑制杂波的频谱宽度越宽，杂波抑制性能越好，但盲速越严重，丢失运动目标的可能性越大，信噪比损失越严重；反过来，MTD滤波器凹口相对宽度越窄则抑制杂波的频谱宽度越窄，杂波抑制性能越差，盲速越相对不严重，丢失运动目标的可能性越小，信噪比损失不严重。因此MTD滤波器凹口宽度要折中选择。

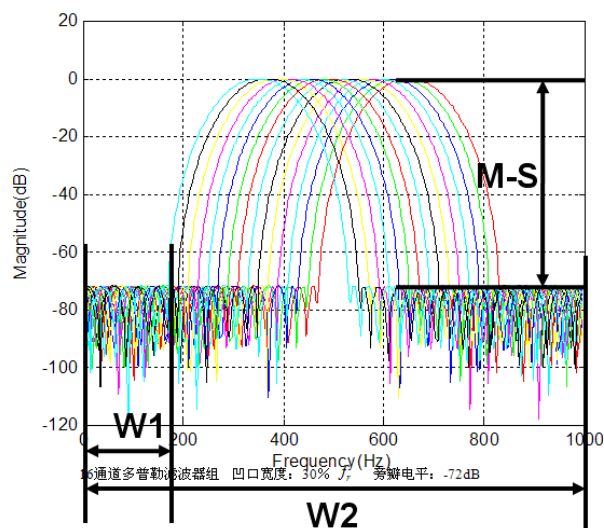


图 3.3 16脉冲MTD实测特性曲线（对数，滤波器组16根曲线叠加在一起）

3.4 实验步骤

1. MTD滤波器副瓣电平测量计算方法

$$\text{副瓣电平为: } 255C \frac{M-S}{F} = 96.9 \frac{M-S}{F}$$

凹口相对宽度为凹口宽度W1与总底部宽度W2之比: $\frac{W1}{W2}$

2. 连接实验装置

3. 测试MTD和FFT特性曲线，并记录数据

3.5 实验结果

测试的数据情况见表3.1，对应的波形情况见表3.2。

表 3.1 动目标检测及相参积累测试数据

	副瓣电平	凹口相对宽度
16点MTD	73.568	0.2
8点MTD	54.208	0.13

表 3.2 动目标检测及相参积累测试波形

项目	波形
16点MTD	
8点MTD	

利用MATLAB复现数据波形

复现原理

示波器将波形以图片形式保存在U盘的同时，也将波形数据信息保存在了一起。调用数据信息借助MATLAB的绘图工具绘图即可。

MATLAB代码

```
1  clc;close all;clear all;
2  M=42 %第M个保存的数据
3  A = xlsread(['E:\baogao\data\ALL00',num2str(M),'F00',num2str(M)
    , 'CH1.csv']);%数据存储位
    置
4  B = xlsread(['E:\baogao\data\ALL00',num2str(M),'F00',num2str(M)
    , 'CH2.csv']);
5  x1=A(:,3);
6  y1=A(:,4);
7  x2=B(:,3);
8  y2=B(:,4);
9  figure(1)
10 subplot(2,1,1)
11 plot(x1,y1,'r');
12 axis tight;
13 figure(1)
14 subplot(2,1,2)
15 plot(x2,y2,'b');
16 axis tight;
```

部分复现数据与示波器图片对比

部分复现的数据与示波器图片对比见表4.1

表 4.1 部分复现数据与示波器图片对比

复现数据	示波器波形
