

# MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

## 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 中文摘要 .....                    | 1  |
| 英文摘要 .....                    | 2  |
| 1 引言 .....                    | 3  |
| 1.1 研究背景及意义 .....             | 3  |
| 1.2 国内外研究现状 .....             | 4  |
| 1.3 本设计的指导思想和主要工作 .....       | 4  |
| 2 动目标检测(MTD)雷达基本原理 .....      | 6  |
| 2.1 多普勒效应 .....               | 6  |
| 2.2 动目标检测(MTD)雷达的工作原理 .....   | 8  |
| 2.2.1 动目标显示(MTI)雷达的工作原理 ..... | 8  |
| 2.2.2 动目标检测(MTD)雷达的工作原理 ..... | 10 |
| 3 MTD 多普勒滤波器组的设计 .....        | 13 |
| 3.1 加权 DFT 实现 MTD 滤波 .....    | 13 |
| 3.1.1 DFT 滤波器分析 .....         | 13 |
| 3.1.2 窄带滤波器组信号处理的优点 .....     | 15 |
| 3.2 FIR 实现 MTD 多普勒滤波器 .....   | 16 |
| 3.2.1 设计思路 .....              | 17 |
| 3.2.2 MTD 多普勒滤波器组的设计 .....    | 17 |
| 3.3 MTD/MTI 雷达的性能评价指标 .....   | 20 |
| 4 MTD 雷达中预处理模块设计 .....        | 23 |
| 4.1 乒乓操作 .....                | 23 |
| 4.1.1 乒乓操作的处理流程 .....         | 23 |
| 4.1.2 乒乓操作的特点 .....           | 23 |
| 4.1.3 乒乓操作的应用 .....           | 25 |
| 4.2 MTD 雷达匹配滤波器的总体结构 .....    | 26 |
| 4.3 MTD 雷达中预处理模块设计 .....      | 27 |
| 4.3.1 多路选择器的设计 .....          | 28 |
| 4.3.2 计数器的设计 .....            | 30 |
| 4.3.3 MTD 雷达预处理模块设计 .....     | 32 |
| 总 结 .....                     | 34 |
| 谢 辞 .....                     | 34 |

## MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

参考文献35 **摘要**: 在高科技战争中, 探测敌方的进攻 LI 标(如飞机、导弹、舰艇等)是一个重要问题。它实际上是一个解决在密集的杂乱回波中发现感兴趣的 U 标的问题, 即所谓的动目标检测(MTD)。

本文对 MTD 雷达技术的核心(多普勒滤波器组)进行了深入的研究和设计。

文章主要分为以下四个部分:

首先, 本文对研究课题的背景及其意义进行了一个大概的说明。其次, 对动 U 标检测(MTD)雷达的基本原理进行了全面而详细的介绍, 如 MTD 的主要功能, 其中, 对于与 MTD 极其相关的动 LI 标显示(MTI)也进行了一个简要的介绍。再次, 对 MTD 雷达技术的核心(多普勒滤波器组)进行了设计和分析, 文中应用了加权 DFT 和 FIR 这两种方法实现 MTD 滤波, 并给出了 MTD 性能评价指标。最后, 对 MTD 滤波器输入数据的存储这一问题用预处理乒乓操作进行了设计, 并对仿真结果进行了分析和说明。

**关键词**: 动 LI 标检测(MTD), 动 LI 标显示(MTI), 滤波器, 乒乓操作, 设计

# MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

**Abstract:** In high-tech warfare, detecting enemy's offensive goals (such as aircraft, missiles, ships, etc.) is an important issue. In fact, it is a solution about how to find the interesting objectives in the intensive mess echo, the so-called Moving Target Detection (MTD).

In this paper, I spent much time and many words on the research of the core of MTD radar technology—the design of Doppler Filter Team. The article is divided into four main parts:

First, There is a general description about the background of this topic and its significance. Secondly, the basic principles of the Moving Target Detection (MTD) radar are comprehensive and detailed introduced, such as the main function of MTD. In addition, the Moving Target Indication (MTI) which is extremely relevant with MTD is also conducted a brief introduction. Thirdly, There are some design and analysis that I did on the MTD radar technology core (Doppler Filter Team), and the two approaches — DFT and FIR were applied in achieving MTD filter. At the same time some of the MTD performance evaluation indicators were given. Finally, how to store the input data of MTD filter in the design was designed with the ping-pong operation, and the simulation results were analysed and described.

**Keyword:** Moving Target Detection (MTD), Moving Target Indication (MTI), Filter, Ping-pong operation, Design

## 1 引言

### 1.1 研究背景及意义

雷达是用来发现目标 and 测量目标的无线电电子系统。雷达工作的物理基础是物体对电磁波的反射现象。雷达的两个主要特征是，它具有远距离探测目标 and 对目标进行高精度定位的能力。虽然雷达技术主要因军事应用而得到发展，但它也在许多民用领域中得到了应用，比如船舶和飞机的导航就是典型的例子。

# MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

从 50 年代末以来，由于航空与航天技术的飞速发展，飞机、导弹、人造卫星及宇宙飞船等采用雷达作为探测和控制的手段，尤其是在 60 年代研制的反洲际弹道导弹系统，对雷达提出了高精度、远距离、高分辨率及多目标测量等要求。由于解决了一系列的关键性问题，雷达进入蓬勃发展的新阶段，如脉冲压缩技术的采用；单脉冲雷达和相控阵雷达研制的成功；脉冲多卜勒雷达体制的研制成功，使雷达能测量目标的位置和相对运动速度，并具有良好的抑制地物去干扰等的能力；由于雷达中数字电路的广泛应用和计算机与雷达的配合使用，使雷达的结构组成和设计发生了根本性的变化。雷达采用这些先进技术后，工作性能大为提高。60 年代相控阵雷达技术大量用于战术雷达，这期间研制成功的主要相控阵雷达，包括美国陆军的“爱国者”、海军的“宙斯盾”等。进入 90 年代，尽管冷战结束，但局部战争仍然不断，特别是由于海湾战争的刺激，雷达又进入了一个新的发展时期；对雷达观察隐身目标的能力、在反辐射导弹(ARM)与电子战(CEW)条件下的生存能力和工作有效性提出了更高的要求，对雷达测量目标特征参数和进行目标分类、目标识别有了更强烈的需求。随着微电子和计算机的高速发展，雷达的技术性能也在迅速提高，在军事上的应用进一步扩大。雷达是在不断发展变化的：一方面它综合应用各种新技术、新器件来完善和提高自身的性能，另一方面不断出现的各种新技术的应用，也促使雷达不断的改善。

在现代高技术战争条件下，雷达所面临的电磁信号环境越来越复杂，雷达在复杂电磁环境下的生存能力便成为衡量雷达性能指标的重要标志。为了抵御各种有源和无源干扰，现代雷达采取了各种各样的抗干扰措施，概括起来，可以归纳为时域抗干扰、频域抗干扰和空域抗干扰三个方面。

雷达信号的频域抗干扰措施主要包括动目标显示(MTI)、动目标检测(MTD)和脉冲多普勒(PD)技术等。广义讲，MTD 是 PD 的一种特例，一般认为 MTD 是一种低重复频率的 PD 处理。但 MTD 与 PD 处理的基本原理是相同的。现在，MTD 处理已成为雷达抗干扰（尤其是抗杂波干扰和箔条干扰）的重要手段，在现代雷达中得到了广泛的应用，发挥着不可替代的作用。

## 1.2 国内外研究现状

1974 年美国麻省理工学院林肯实验室研制出了新型的雷达信号频域处理装置——动目标检测器，为第一代 MTD。它主要由一个传统的三脉冲 MTI 对消器级联一个 8 点

# MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

FFT 构成,这一 8 点 FFT 等效为一组相邻有覆盖的窄带滤波器组,它 实际上就是用作脉冲串回波相参积累的匹配滤波器。

第二代 MTD 在 70 年代末推出,它的主要改进是:其一,在匹配滤波处理后 对同一单元不同滤波器频道的输出分别进行自适应门限调整,即分频道 CFAR 处 理;其二,增加了所谓“饱和/干扰”试验电路,用于封锁特别强干扰的对应距 离单元的输出;其三,具备了一定的气象估测能力,这主要是 ATC 雷达所要求的。

更新一代的动 LI 标检测是自适应 MTD (AMTD) ,其关键是实时检测杂波的存在,判定杂波强度(如强/中/弱)其至特性,据此对存储的杂波图进行修正,并自动产 生或选择滤波器加权因子,以期在保证对地杂波的高度抑制的前提下,尽量减小 对气象(如雨)杂波的灵敏性(低的多普勒旁瓣),并具有最小的主瓣宽度和最小的 信噪比(SNR)损 失。

U 前 MTD 技术已成为雷达数字信号处理机的核心技术。伴随着视频数字集成 电路,特别是 FFT, DSP 以及 PLD 硬件的发展,使 MTD 技术得以在脉冲多普勒(PD) 雷达引 信信号处理机的硬件上实现,并使引信在 1-加 s 内完成对背景干扰下动 LI 标的三维探测和 对回波更具细节的检测与识别成为可能,这大大提高了系统的信 噪比和信干比。

## 1.3 本设计的指导思想和主要工作

本文对 MTD 的核心技术(多普勒滤波器组)进行了设计,多普勒滤波器组的设 计首先要解决的问题是滤波器的设计,而滤波器的设计方法多种多样,其中最常 用的方法有三种:窗函数设计法、频率抽样设计法和切比雪夫加权设计法。本文 在设计滤波器时应用了窗函数法,选择了相对理想的窗口(汉明窗),从仿真出来 的结果看,还很理想,其旁瓣较低,主瓣宽度也比较窄。各个滤波器设计好之后,接下来就是对各个滤波器进行加 权处理,实现多普勒滤波器组。实验结果表明,所设计的多普勒滤波器组,具有滤波精度 高、处理速度快、可编程特性好的特点。

多普勒滤波器组的实现另一个比较核心的问题是滤波器输入数据的存储,山 于 MTD 雷达原理的别样性,文中采用了预处理乒乓操作对 MTD 滤波器输入数据进 行存储。由于预处理乒乓操作通过“输入数据选择单元”和“输出数据选择单元” 按节拍、相互配合的 切换,所以经过缓冲的数据流没有停顿地送到“数据流运算 处理模块”进行运算与处理。 这样不仅节省了很多等待的时间,而且也节约了缓 冲区空间。

## MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

在对 MTD 预处理模块设计时,设计一个具有控制功能的多路选择器和计数器 是本课题的关键,所以这两个小模块的设计是 MTD 预处理模块设计中心问题。

## 2 动目标检测(MTD)雷达基本原理

雷达要探测的 U 标，通常是运动着的物体，例如空中的飞机、导弹，海上的舰艇，地面的车辆等。但在 U 标的周围经常存在着各种背景，例如各种地物、云雨、海浪及敌人施放的金属丝干扰等。这些背景可能是完全不动的，如山和建筑物，也可以是缓慢运动的，如有风时的海浪和金属丝干扰，一般来说，其运动速度远小于 U 标。这些背景所产生的回波称为杂波或无源干扰。

当杂波和运动 U 标回波在雷达显示器上同时显示时，会使 U 标的观察变得很困难。如果 U 标处在杂波背景内，弱的 U 标湮没在强杂波中，特别是当强杂波使接收系统产生过载时，发现 U 标十分困难。U 标不在杂波背景内时，要在成片杂波中很快分辨出运动 U 标回波也不容易。如果雷达终端采用自动检测和数据处理系统，则由于大量杂波的存在，将引起终端过载或者不必要地增大系统的容量和复杂性。因此，无论从抗干扰或改善雷达工作质量的观点来看，选择运动 U 标回波而抑制固定杂波背景都是一个很重要的问题。

区分运动 U 标和固定杂波的基础是它们在速度上的差别。由于运动速度不同而引起回波信号频率产生的多普勒频移不相等，这就可以从频移上区分不同速度 U 标的回波。在动 U 标显示(MTI)和动 U 标检测(MTD)雷达中使用了各种滤波器，滤去固定杂波而取出运动 U 标的回波，从而大大改善了在杂波背景下检测运动 U 标的的能力，并且提高了雷达的抗干扰能力。

### 2.1 多普勒效应

在阐述 MTD 雷达原理之前，我们先来看一下多普勒效应这一概念。

多普勒效应是指当发射源和接收者之间有相对径向运动时，接收到的信号频率将发生变化。这一物理现象首先在声学上由物理学家克里斯顿·多普勒于 1842 年发现的。1930 年左右开始将这一规律运用到电磁波范围。雷达应用日益广泛及其性能要求更加提高，推动了利用多普勒效应来改善雷达工作质量的进程。

下面研究当雷达与 U 标有相对运动时，雷达站接收信号的特征。为方便计，设目标为理想“点”目标，即目标尺寸远小于雷达分辨单元。

这里我们只考虑雷达发射连续波的情况，这时发射信号可表示为

$$E = E_0 \cos(2\pi f_c t) \quad (2-1)$$

## MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

式中， $\omega$ 为发射角频率； $\varphi$ 为初相； $A$ 为振幅。

在雷达发射站处接收到由 U 标发射的回波信号 (1) 为

$$s(t) = kA \cos[\omega(t - t_r) + \varphi] \quad (2-2)$$

式中， $t_r = 2R/c$ ，为回波滞后于发射信号的时间，其中  $R$  为目标和雷达站间的距离； $c$  为电磁波传播速度，在自由空间传播时它等于光速； $k$  为回波的衰减系数。

如果固定 U 标不动，则距离  $R$  为常数。回波与发射信号之间有固定相位差  $\omega \cdot 2R/c = \omega \cdot 2R/c$ ，它是电磁波往返于雷达与目标之间所产生的相位滞后。

当 U 标与雷达站之间有相对运动时，则距离随时间变化。设 U 标以匀速  $v$  相对雷达站运动，则在时间  $t$  时刻，U 标与雷达站间的距离  $R(t)$  为

$$R(t) = R_0 - vt \quad (2-3)$$

式中， $R_0$  为初始距离； $v$  为目标相对雷达站的径向运动速度。

式(2-2)说明，在  $t$  时刻接收到的波形 (1) 上的某点，是在  $t - 2R/c$  时刻发射的。由于通常雷达和 U 标间的相对运动速度  $v$  远小于电磁波速度  $c$ ，故时延  $t_r$  可近似写为

$$t_r \approx 2R_0/c$$

回波信号比起发射信号来，高频相位差  $\omega \cdot 2R_0/c$  (2-4)

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{2R_0}{c} \right)$$

是时间  $t$  的函数，在径向速度  $v$ ， $R_0$  为常数时，产生频率差为 (2-5)

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{2R_0}{c} \right) = \frac{2v}{c}$$

(2-6)

这就是多普勒频率，它正比于相对运动的速度  $v$  而反比于工作波长  $\lambda$ 。当 U 标飞向雷达站时，多普勒频率为正值，接收信号频率高于发射信号频率，而当 U 标背离雷达站飞行时，多普勒频率为负值，接收信号频率低于发射信号频率。

多普勒频率可以直观地解释为：振荡源发射的电磁波以恒速  $c$  传播，如果接收者相对于振荡源是不动的，则他在单位时间内收到的振荡数  $N$  与振荡源发出的



# MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

相同，即二者频率相等。如果振荡源与接收者之间有相对接近的运动，则接收者在单位时间内收到的振荡数  $U$  要比他不动时多一些，也就是接收频率增高；当二者作背向运动时，结果相反。

## 2.2 动目标检测(MTD) 雷达的工作原理

上面我们引出了多普勒频率这一概念，下面我们来介绍一下运动目标检测 (MTD) 雷达的基本原理。首先我们先来看一下与动目标检测(MTD)极其相关的动目标显示(MTI) 雷达的工作原理。

### 2.2.1 动目标显示(MTI)雷达的工作原理

MTI (Moving Target Indication)即运动目标显示,其本质含义是：基于回波多普勒信息的提取而区分运动目标与固定目标(包括低速运动的杂波等)。当脉冲雷达利用多普勒效应来鉴别运动目标回波和固定目标回波时，与普通脉冲雷达的差别是必须在相位检波器的输入端加上基准电压(或称相参电压)，该电压应和发射信号频率相参并保存发射信号的初相，且在整个接收信号期间连续存在。工程上，基准电压的频率常选在中频。这个基准电压是相位检波器的相位基准，各种回波信号均与基准电压比较相位。从相位检波器输出的视频脉冲，有固定目标的等幅脉冲串和运动目标的调幅脉冲串。通常在送到终端(显示器或数据处理系统)去之前要将固定杂波消去，故要采用相消设备或杂波滤波器，滤去杂波干扰而保存运动目标信息。

因此，MTI 通常包括两个最基本的部分，即完成多普勒信息提取的相参处理与完成目标区分的对消处理(有时又称滤波处理)。下面主要介绍一下固定杂波消除这个问题。

在相位检波器输出端，固定目标的回波是一串振幅不变的脉冲，而运动目标的回波是一串振幅调制的脉冲。将它们加到偏转调制显示器上，固定目标回波是振幅固定的脉冲，而运动目标回波呈现上下“跳动”的“蝴蝶效应”。可以根据这种波形特点，在偏转显示器上区分固定目标与运动目标。如果要把回波信号加到亮度调制显示器或终端数据处理设备，则必须先消除固定目标回波。最直观的一种办法是将相邻重复周期的信号相减，则固定目标回波由于振幅不变而互相抵

## MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

消；运动 I] 标回波相减后剩下相邻重复周期振幅变化的部分输出。

由相位检波器输出的脉冲包络为

$$w = U_0 \cos(\theta) \quad (2-7)$$

式中， $\theta$  为回波与基准电压之间的相位差，

$$\theta = \frac{2\pi}{c} \Delta R = \frac{2\pi}{c} \Delta R \quad (2-8)$$

回波信号按重复周期  $T_r$  出现，将回波信号延迟一周期后，其包络为

$$w' = U_0 \cos[\omega_d(t - T_r) - \theta] \quad (2-9)$$

相消器的输出为两者相减，

$$w - w' = 2U_0 \sin(\theta) \sin(\omega_d t - \dots) \quad (2-10)$$

输出包络为一多普勒频率的正弦信号，其振幅为

$$2U_0 \sin(\theta) \quad (2-11)$$

也是多普勒频率的函数。当  $\theta = \pi/2$  (即  $\Delta R = \lambda/4$ ) 时，输出振幅为零。这时的

I] 标速度正相当于盲速。盲速时的运动 I] 标回波在相位检波器的输出端与固定 H 标回波相同，因而经相消设备后输出为零，如图 2.1 延迟相消设备及输出响应曲

# MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

线所示。

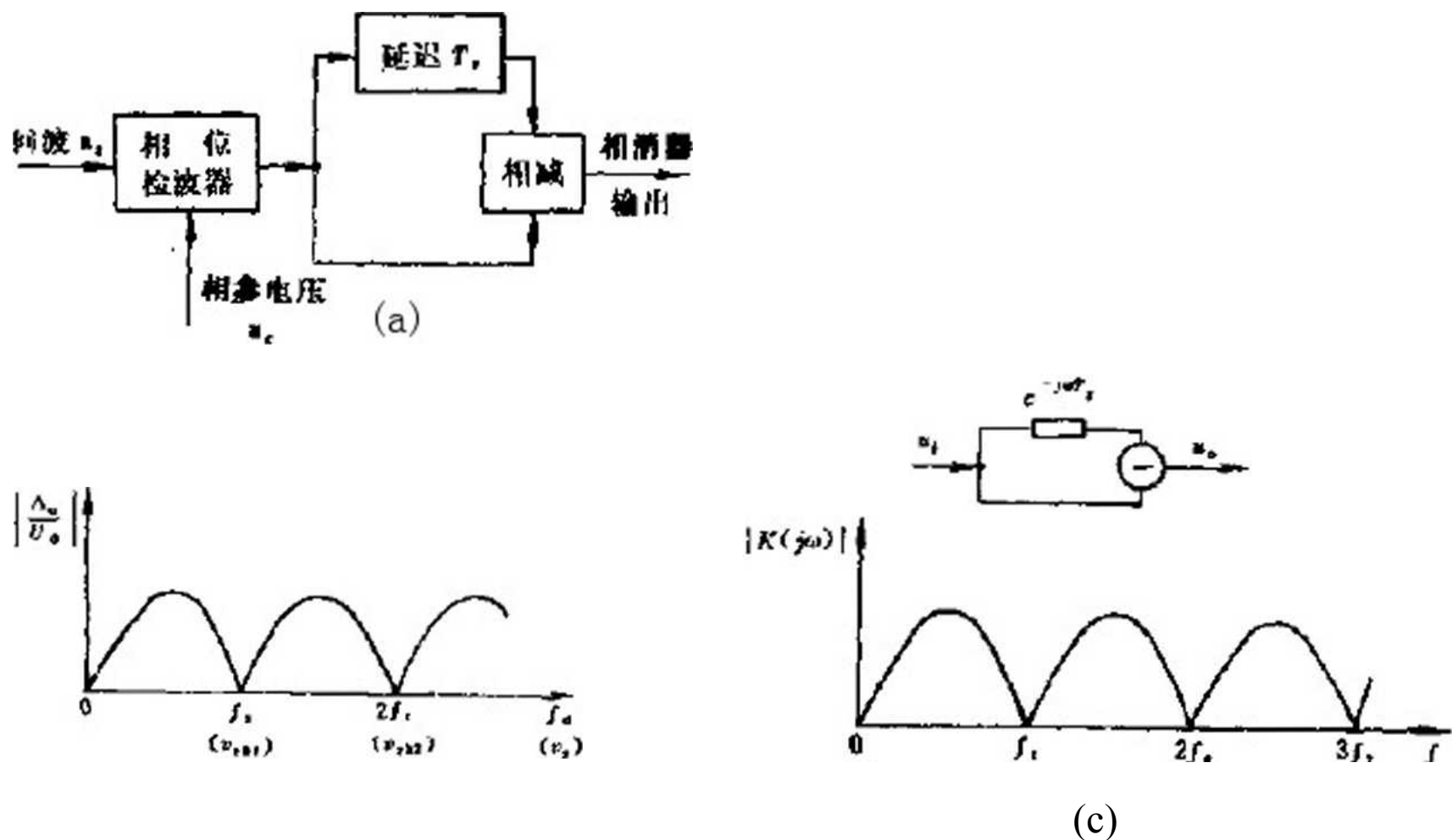


图 2.1 延迟相消设备及其输出响应

(a)组成框图；(b)速度响应；(c)频率响应特性

相消设备也可以从频率域滤波器的观点来说明，而且为了得到更好的杂波抑制性能，常从频率域设计较好的滤波器来达到。下面求出相消设备的频率响应特性。输出为

$$U_o = U_i (1 - e^{-j\omega T_r}) \quad (2-12)$$

网络的频率响应特性为

$$K(j\omega) = \frac{U_o}{U_i} = (1 - e^{-j\omega T_r}) = (1 - \cos \omega T_r) + j \sin \omega T_r = 2 \sin \frac{\omega T_r}{2} e^{j\frac{\omega T_r}{2}} \quad (2-13)$$

其频率响应特性如图 2.1(c)所示。

相消设备等效于一个梳齿形滤波器，其频率特性在  $f = nf_r$  各点均为零。固定 LI 标频谱的特点是：谱线位于点上，因而在理想情况下，通过相消器这样的梳齿滤波器后输出为零。当 LI 标的多普勒频率为重复频率整数倍时，其频谱结构也有相同的特点，故通过上述梳状滤波器后无输出。

## 2.2.2 动目标检测(MTD)雷达的工作原理

### 1、MTD 的主要功能和要求

上一节讨论了动 LI 标显示(MTI)的原理，这一章将系统介绍动口标检测(MTD)技术。

## MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

MTD 与 MTI 虽同属雷达信号的频域处理范畴，但一般意义上说，MTD 是 MTI 的改进或更有效的频域处理技术。这种基于杂波与运动目标多普勒频率差别的信号处理大致经过了一个由模拟 MTI 到数字 MTI(DMTI) 到线性 MTI 到自适应 MTWMTDT 到自适应 MTD(AMTD) 的发展里程。而广义地讲，MTD 处理又是脉冲多普勒(PD)处理的一种特殊形式。与传统 MTI 相比，MTD 主要依鼎信号处理的潜在能力，在以下三个方面作了改进：

- (1)、改善滤波器的频率特性，使之更接近于最佳(匹配)线性滤波，以提高改善因子；
- (2)、能够检测强地物杂波中的低速 U 目标至切向飞行的大 U 目标；
- (3)、不仅能抑制平均多普勒频移通常等于零的固定杂波，而且还能抑制如气象、鸟群等引起的运动(慢动)杂波。

## MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

早期的动 U 标显示雷达性能不高，其改善因子一般在 20dB 左右。这是由多方面因素造成的：锁相相参系统的高频稳定性不够、接收系统的非线性限幅、采用模拟延迟线时通常只能作一次相消且性能不稳亦不能实现最佳滤波等。由雷达原理所知，当雷达高频系统稳定性不高时，将使固定杂波回波谱产生一部分接近均匀谱的杂散分量，而限制改善因子可能达到的更大值。当雷达采用全相参体制或者是用信号处理的方法(如 DSU)来改善锁相相参系统的高频稳定性后，其性能会有明显的提高。从目前情况来看，全相参系统的高频稳定性已可做到不再成为改善因子的障碍。在信号处理方面当采用数字延迟线代替模拟延迟线实现 MTI 后，其工作稳定、可靠，这种 DMTI 系统还广泛采用了 I,Q 正交双通道处理和高阶数字滤波器来得到合适的滤波特性。DMTI 已比早期模拟 MTI 在性能上有了较大的改善。但它的滤波特性还不是最佳线性滤波特性，且非线性中放限幅制约了改善因子的进一步提高。围绕着这两个问题的研究，提出了具有信号匹配滤波特性的窄带多普勒滤波器组及具有大动态范围的线性 MTI 的处理技术，再加上高速集成电路技术的发展和 FFT 算法的实际应用等，促成了动 U 标检测处理器的研制成功。实质上，MTD 的核心就是线性 DMTI 加窄带多普勒滤波器组。

### 2、雷达信号的最佳滤波：窄带多普勒滤波器组处理

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

$$\overline{C(f)} \quad (2-14)$$

这实际上就是基于色噪声(这里称为杂波)白化处理的匹配滤波器。这一滤波器可

分成两个级联的滤波器  $H_1(f)$  和  $H_2(f)$ ，其传递函数分别为

$$|H_1(f)|^2 = \frac{C(f)}{S(f)} \quad (2-15)$$

$$H_2(f) = S(f) \quad (2-16)$$

可以粗略地认为， $H_1(f)$  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，这由式(2-10)的要

## MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

求差距较大。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

$$H_2(f) = H_{21}(f)H_{22}(f) \quad (2-17)$$

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。根据有关回波脉冲串的频谱分析可以想象  $H_{22}(f)$  应是梳齿形滤波器，齿的间隔为脉冲重复频率  $f_r$ ，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，必须知道目标的频率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  $f_d$  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。见图 2.2。

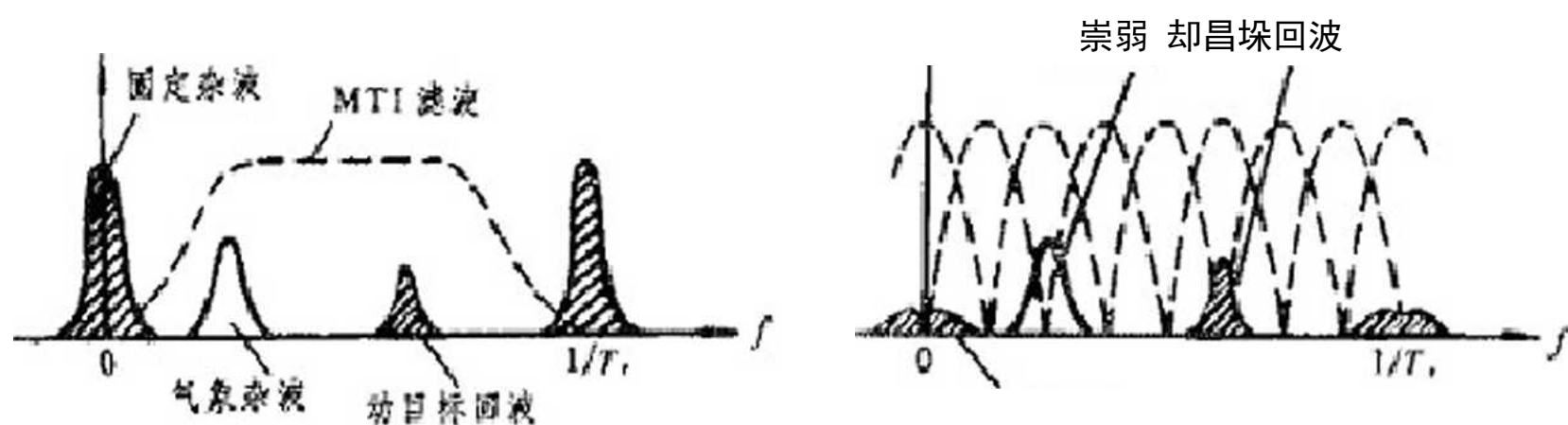


图 2.2 动目标显示滤波器和多普勒滤波器组的特性

(a) 动目标显示滤波；(b) 多普勒滤波器组的特性

### 3 MTD 多普勒滤波器组的设计

上一章我们对 MTD 雷达原理进行了比较深刻的阐述，这一章我们来研究一下 MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计。

多普勒滤波器组是 MTD 系统的核心，其性能决定 MTD 的性能，其最简单的实现方法是采用离散傅里叶变换(DFT)。但 DFT 滤波器组中的滤波器在零附近没有零陷，因而无法很好地抑制地杂波，使滤波器组输出的检测性能受到影响。所以，后来人们又在 DFT 滤波器组之前加了 MTI 处理，这样可以先用 MTI 消掉地杂波，再用 DFT 滤波器组进行滤波处理，由于 DFT 滤波器组可以用快速傅里叶变换(FFT)实现，所以这种方法又称为 MTD 的 MTI 加 FFT 实现法。因为 FFT 可以节省很大的运算量，所以这种方法至今仍在大量使用，尤其是 MTD 滤波器阶数较大时。由于 FFT 的阶数一定要是 2 的整数幂，使得

## MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

MTI 加 FFT 实现法的应用受到了一定的限制，并且 DFT 滤波器组位于 MTT 之后，滤波器组的各滤波器增益受到 MTT 滤波器频率响应的调制。所以以前人们感兴趣的 MTD 滤波器组实现方法是采用 FIR 滤波器组。尽管采用 FIR 滤波器组要比 MTT 加 FFT 实现法的运算量大，但由于大规模集成电路和数字信号处理技术的飞速发展，目前 FIR 滤波器组的实现已不成问题。对于 FIR 滤波器组来说，可以灵活设计每个滤波器的权系数，使其幅度频率响应都在零频附近有较深的零陷，用于抑制地杂波。

下面来分别讨论一下快速傅里叶变换(FFT)和有限冲激响应(FIR)实现多普勒滤波器组这两种方法。

### 3.1 加权 DFT 实现 MTD 滤波

具有  $X$  个输出的横向滤波器( $N$  个重复周期和  $N-1$  根延迟线)，经过各重复周期的不同加权并求和后，即可实现图 2.2 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 3.1 所示。注意：实际实现中的延迟线是下一章将要介绍的输入缓存器。由于 DFT 是一种特殊的横向滤波器，所以若将图 3.1 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。

#### 3.1.1 DFT 滤波器分析

如图 3.1 所示，横向滤波器有  $N-1$  根延迟线，每根延迟线的延迟时间为  $T_r = 1/f_r$  对一串由  $M$  个脉冲组成的雷达回波信号作 FFT,若考虑矩形窗加权的

# MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

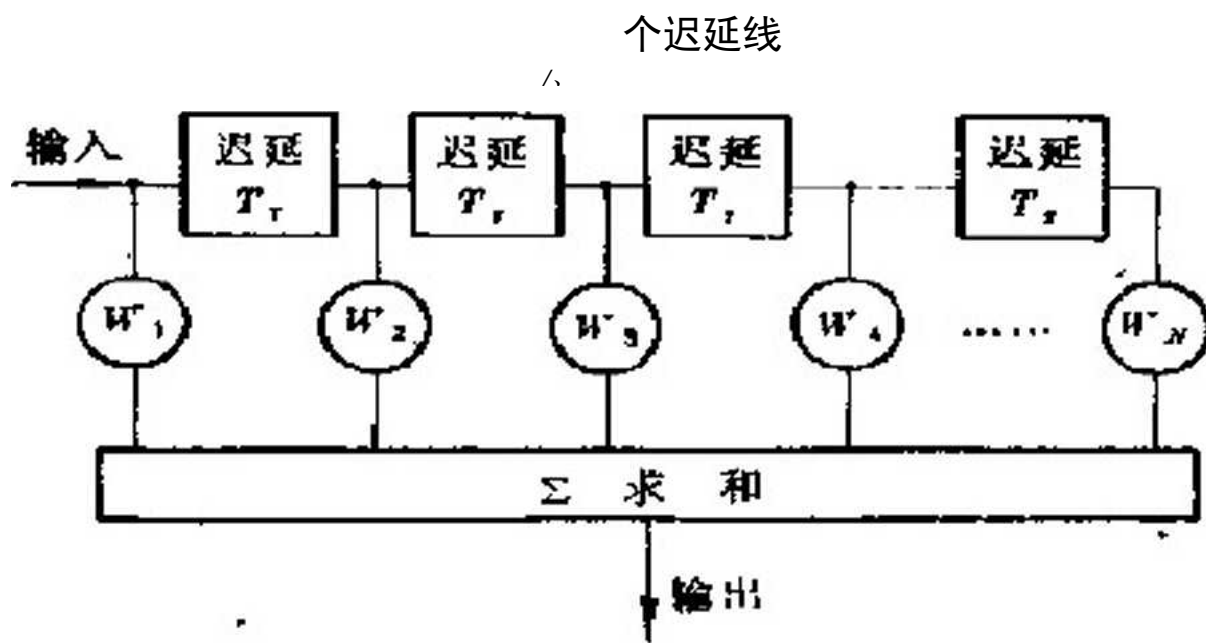


图 3·1 MTD 横向滤波器结构

情况，则第  $k$  个 FFT 滤波器的输出端头加权值可表示为

$$(3-1)$$

式中， $i$  表示第  $j$  个抽头； $k$  表示  $0$  到  $2-1$  的标记，每一个  $k$  值对应一组不同的 加权值，相应地对应于一个不同的多普勒滤波器响应。这样， $N$  个相互相邻的滤波器即形成一个滤波器组，它覆盖了从  $0$  到  $($ 的频段。

由(3-1)可写出第  $k$  个 FFT 滤波器的冲激响应表示为

$$h_k(f) = \sum_{r=1}^N w_r e^{-j2\pi f T_r + K(N-r)T_r} \quad k \text{ 如 } s$$

其傅立叶变换就是频率响应函数

$$(3-2)$$

$$H(f) = \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^N w_r e^{-j2\pi f T_r + K(N-r)T_r} = \sum_{r=1}^N w_r e^{-j2\pi f T_r + K(N-r)T_r} = \sum_{r=1}^N w_r e^{-j2\pi f T_r + K(N-r)T_r}$$

$$H(f) = \sum_{r=1}^N w_r e^{-j2\pi f T_r + K(N-r)T_r} = \sum_{r=1}^N w_r e^{-j2\pi f T_r + K(N-r)T_r}$$

滤波器的幅频特性为

其中  $k$  表示滤波器号，每个滤波器均有形状相同、中心频率(即  $f_c$ ， $f_c$  取峰

值的频率)不同的幅频特性，根据式(3-4)结果，其形状为一主瓣与两侧各个旁瓣

$$|H(f)| = \sum_{r=1}^N w_r e^{-j2\pi f T_r + K(N-r)T_r} \times \frac{\sin(\pi(f - f_c)T_r)}{\sin(\pi(f - f_c)T_r / N)} = \frac{\sin(\pi(f - f_c)T_r)}{\sin(\pi(f - f_c)T_r / N)} \quad (3-4)$$



## MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

的组合。图 3.2 给出了 28 时 DFT 等效横向滤波器振幅特性的主瓣。

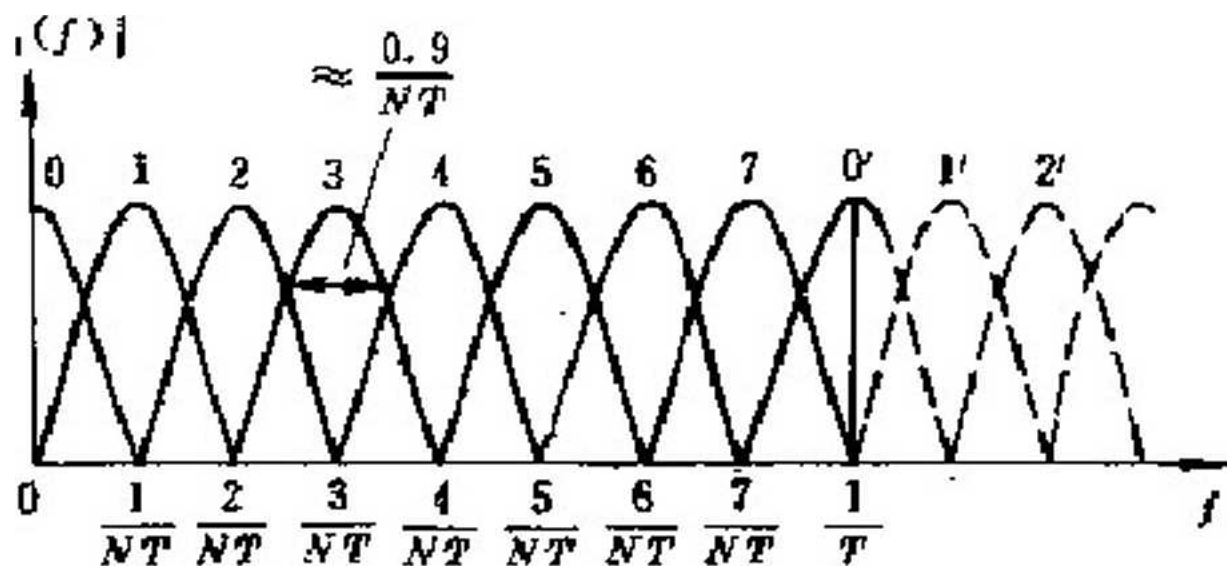


图 3.2 N 二 8 时 DFT 等效横向滤波器的幅频响应

滤波器的峰值产生于  $\sin[\pi f T_r - k/N] = 0$  或者  $\pi f T_r - k/N = 0, \pi, 2\pi, \dots$  当 R

二 0 时，滤波器峰值位置为  $f = \frac{k}{NT_r}$ ，即滤波器的中心位置在零频率以

及重复频率的整数倍处，这个滤波器可通过没有多普勒频移的杂波，因此对地杂波没有抑制能力。然而，它的输出在某些 MTD 雷达中可以作提供杂波地图之用。这个滤波器的第一个零点出现在式(3-4)分子第一次取零值时，即  $f = \frac{k}{NT_r} \pm \frac{1}{NT_r}$  时。

在第一对零点之间的频带宽度为  $\frac{2}{NT_r}$ ，而半功率带宽近似为  $0.9/N T_r$ ；

当  $k=0$  时，峰值响应产生在  $f = 0$  以及  $f = \frac{1}{T_r} + \frac{1}{NT_r}, f = \frac{2}{T_r} + \frac{1}{NT_r}, \dots$  依此类推。因而每一个  $k$  值决定一个独立的滤

波器响应。全部滤波器响应覆盖了从零到的频率范围，由于信号的取样性质，其余的频带按同样的响应周期覆盖，因而会在频率上产生模糊。每个滤波器的形状和  $k=0$  时的相同，只是滤波器的中心频率不同。图 3.2 所示的滤波器有时称为相参累积滤波器，因为通过该滤波器后，它将  $N$  个相参脉冲累积，使信噪比提高  $N$  倍(对噪声而言)。

### 3.1.2 窄带滤波器组信号处理的优点

如上所述，由于每个窄带滤波器只占延迟线对消器通频带的大约  $1/N$  宽度，因而其输出端的信噪比有相应的提高。对于噪声，采用窄带滤波器组后信噪比应提高近  $N$

# MTD 雷达中多普勒滤波器组的设计与实现

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/247134010152006101>