

线性调频脉冲雷达仿真 实验教程

@调皮连续波

一 实验目的

在MATLAB上实现线性调频信号(LMCW)的脉冲压缩(PC)、动目标显示(MTI)和动目标检测(MTD)、解速度模糊以及恒虚警率检测(CFAR)等信号处理算法。(本实验原内容为DSP与MATLAB实验对比,目前不考虑DSP部分,文中所涉及DSP部分读者自动过滤)

二 实验内容

2.1 模拟目标回波数据

本实验采用线性调频的脉冲信号作为发射波形,通过设定雷达的工作参数、波形参数以及目标特性,在MATLAB中模拟雷达的目标回波信号。具体参数设定如下:雷达工作参数

射频(脉冲发射的载频): 1.57GHz

中频信号采样频率: 2MHz

中频信号信噪比: -12dB

2) 雷达波形参数

发射信号带宽: 2MHz

发射信号时宽: 42us

发射脉冲重复周期: 240us

模拟的目标回波脉冲数: 16 个脉冲

3) 目标特性参数

程序中根据学号的末尾三位来决定目标的仿真参数。学号的后三位为 920,即 $X=9, Y=2, Z=0$, 相应的目标参数如下:

目标反射功率: $[1, 1, 0.25, 1]$ 。

目标距离: $[2800, 8025, 8025, 9000+(Y*10+Z)*200]=[2800, 8025, 8025, 13000]$, 单位: 米 (m)。

目标径向速度: $[50, -100, 0, (200+X*10+Y*10+Z)]=[50, -100, 0, 310]$, 单

位：m/s。分别对应低速、负高速、静止和高速目标。

2.2 MATLAB 仿真

2.2.1 脉冲压缩

在 MATLAB 中对回波信号分别进行频域脉压和时域脉压。

2.2.2 动目标显示 (MTI)

相邻两脉冲做 MTI，即一次对消，产生 15 个脉冲。

2.2.3 动目标检测 (MTD)

16 个脉冲到齐后，做 MTD，输出 16 个多普勒通道。

2.2.4 恒虚警率检测 (CFAR)

采用平均单元选大法(GO-CFAR)进行处理，对 16 个参考单元取平均，左右各 1 个保护单元。

2.3 DSP 实现

将 MATLAB 产生的回波信号和脉压系数导入 Visual DSP++ Environment 中，完成脉冲压缩、MTI、MTD 和 CFAR，将处理结果分别与 MATLAB 中各算法的处理结果进行比较和分析。

三 实验原理

3.1 线性调频信号(Chirp Signal)

雷达分辨率是指在各种目标环境下区分两个及两个以上的临近目标的能力。根据雷达的目标分辨理论，包括距离分辨率和速度分辨率。

距离分辨率的表达式为

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (3-1)$$

其中， c 为光速， B 为频谱持续宽度，即信号带宽。

从式 (3-1) 可以看出雷达的距离分辨率仅仅取决于发射波形的频谱宽度, 发射波形的带宽越大, 距离分辨率越高。因此, 为了提高距离分辨率, 要求发射信号具有大带宽特性。

速度分辨率的表达式为

$$\Delta V = \frac{\lambda}{2T} \quad (3-2)$$

其中, λ 为载波波长, T 为时间持续宽度, 即脉冲信号的脉宽。

从式 (3-2) 可以看出雷达的速度分辨率主要取决于发射波形的时域结构, 发射波形的脉宽越大, 速度分辨率越高。因此, 为了提高速度分辨率, 要求发射波形具有大时宽。

综合以上论述, 为了提高雷达系统的分辨能力, 要求发射信号具有大时宽、大带宽的特性, 但是这是一个矛盾的要求, 一般的信号不可能同时满足很大的时宽和带宽, 而线性调频信号是满足大时宽带宽积的典型波形, 可以解决这个矛盾, 这就是为什么要选择线性调频信号的原因。

线性调频矩形脉冲信号的表达式为

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j(2\pi f_0 t + \mu t^2)} \quad (3-3)$$

其中, $\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & |t| > T/2 \end{cases}$ T 为脉冲宽度, $\mu = \frac{B}{T}$ 为调制斜率, B 为调频带宽。

3.2 脉冲压缩 (Pulse Compression)

雷达系统为了满足提高探测距离和距离分辨率的双重要求, 在发射端发射大时宽的线性调频脉冲, 由式 (3-2) 可知发射大时宽大带宽信号具有很高的速度分辨率, 而在接收端对回波信号进行脉冲压缩处理就是将接收的宽脉冲信号压缩为窄脉冲信号, 以保证雷达的距离分辨率。因此可以很好解决雷达系统距离分辨率和速度分辨率之间的矛盾。

脉冲压缩就是实现信号的匹配滤波, 实质是构建一个与输入信号相匹配的最佳滤波器, 即匹配滤波器。匹配滤波器是当输入端为信号和加性白噪声时, 使其输出信噪比最大的滤波器, 即一个与输入信号相匹配的最佳滤波器。

设线性时不变滤波器的输入信号 $x(t)$ 为：

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (3-4)$$

其中， $s(t)$ 为输入信号，其傅里叶变换用 $S(\omega)$ 表示； $n(t)$ 为零均值平稳加性白噪声，其功率谱密度为 $P_n(\omega)$ 。设线性时不变滤波器的系统函数为 $H(\omega)$ ，脉冲响应 $h(t)$ ，则响应如图 3.1 所示。

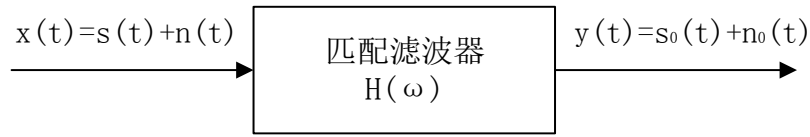


图 3.1 匹配滤波器

由输出信噪比最大准则，可以得到滤波器的系统函数和脉冲响应为：

$$H(\omega) = S^*(\omega) \quad (3-5)$$

$$h(t) = s^*(-t) \quad (3-6)$$

所以，通过对发射信号进行序列反转、取共轭操作即可得到脉冲压缩系数。

脉冲压缩分为时域脉冲压缩和频域脉冲压缩。时域脉冲压缩的处理是对回波信号与脉冲压缩系数进行卷积操作，即进行自相关运算。在频域进行脉冲压缩时，先分别对回波信号和脉压系数做 FFT，点乘之后再做 IFFT，如下式，这样做的目的是频域脉冲压缩处理速度更快。

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) \quad (3-7)$$

$$y(t) = \text{IFFT}\{\text{FFT}[x(t)] \cdot \text{FFT}[h(t)]\} \quad (3-8)$$

3.3 动目标显示 (MTI)

MTI 是指利用杂波抑制滤波器来抑制杂波，提高雷达信号的信杂比，以利于运动目标检测的技术。

由于杂波谱通常集中在直流分量和雷达重复频率的整数倍处，而 MTI 滤波器利用杂波与运动目标的多普勒频率的差异，使得滤波器的频率响应在直流和 PRF 的整数倍处具有较深的阻带，而在其他频点的抑制较弱，从而通过较深的“凹

口”抑制静止目标和静物杂波。

本实验采用两脉冲对消器，也称一次对消器,其滤波器结构如下图所示。

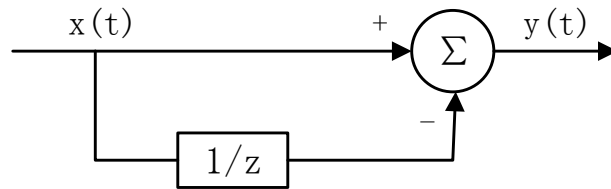


图 3.2 一次对消滤波器结构图

一次对消器的时域表达式和传递函数如下：

$$y(n) = x(n) - x(n - 1) \quad (3-9)$$

$$H(z) = 1 - z^{-1} \quad (3-10)$$

3.4 动目标检测（MTD）

动目标检测是一种使用一组窄带多普勒滤波器将不同速度的目标分离出来的技术，其主要依据为不同速度产生的多普勒频移不同。目标速度引起的多普勒频移可以由下式计算得到：

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (3-11)$$

其中， f_d 表示多普勒频移，单位为 Hz； v_r 为目标相对于雷达的径向距离，单位为 m/s； $\lambda=c/f_0$ 为雷达发射信号的波长，单位为 m。

当脉冲压缩处理后的信号通过多普勒滤波器组时，即进行速度维 FFT 时，由于不同速度产生的多普勒频移不同，各个速度的目标就会落入响应的多普勒通道，再乘以速度分辨率，由此可以计算出目标速度。

在本实验中，MTD 的实现通过对同一距离门内的回波信号的脉冲压缩结果做快速傅里叶变换（FFT）来完成。对于 N 点 FFT，任一频率上的结果相当于 N 个多普勒滤波器在该频率上的频率响应的积累。每个滤波器具有相同的幅度特性，均为辛格函数，且等间隔地分布在频率轴上。单个多普勒滤波器的幅频响应曲线如图 3.3 所示。16 个多普勒滤波器组成的多普勒滤波器组的幅度响应曲线如图 3.4 所示。

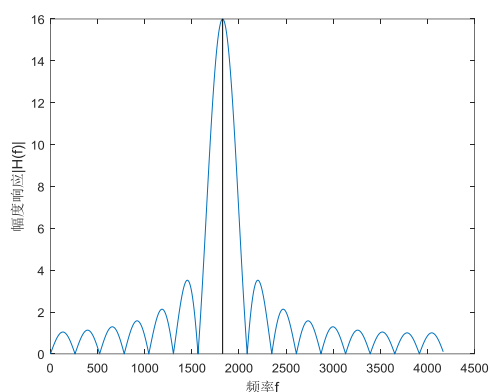


图 3.3 单个多普勒滤波器的幅频响应曲线

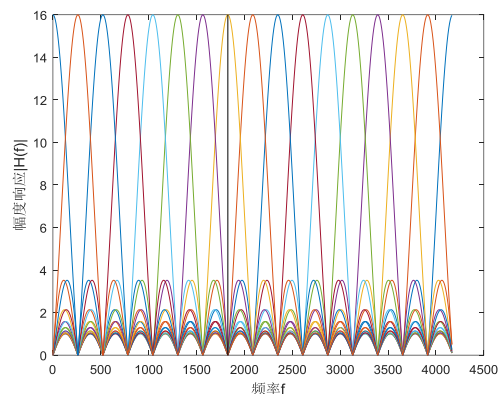


图 3.4 16 个多普勒滤波器的幅频响应曲线

3.4 恒虚警率检测 (CFAR)

本实验采用平均单元选大法(GO-CFAR), 基本原理为左边参考单元取平均值和右边参考单元取平均值进行比较, 取最大值, 再将最大值与门限值 T 相乘, 然后与目标值相比较, 大于目标值则判决为有目标, 否则舍弃。

本实验采用参考单元窗长为 16, 保护单元为 1, 门限 $T=4$ 。本实验共分 5 种情况进行讨论。

(1) 第 1 种是左边没有数据, $left=0$ 。数据第 1 个值设定为目标值, 第 2 个数据为保护单元, 第 3 个数据到第 18 个数据为右边参考单元; 或者是第 1 个数据为保护单元, 第 2 个数据设定为目标值, 第 3 个数据为保护单元, 第 4 个到第 19 个为右边参考单元。

(2) 第 2 种是左边的数据小于 16 个数据点。比如, 左边数据只有 1 个点, 即第 1 个数据点, 第 2 个数据为左边参考单元, 第 3 个数据设定为目标值, 第 4 个数据为右边参考单元, 第 5 个到第 20 个为右边参考单元。

(3) 第 3 种就是左边和右边的数据都大于 16 个, 比如, 左边有 16 个数据点, 那么左边的保护单元为第 17 个数据点, 目标值为第 18 个数据点, 一直向后运行直到最右边的数据参考单元等于 16 为止。

(4) 第 4 种与第 2 种类似, 即左右对称。

(5) 第 5 种与第 1 种类似, $right=0$ 。

四 实验结果及讨论

本部分将详细分析实验得到的数据、图像和误差，并解释速度模糊和频谱泄露的原因。

特别注意，本实验必须在同一噪声模式下进行仿真，否则会引起较大的偏差，噪声模型为高斯随机噪声！

步骤说明：本实验将 MATLAB 运行产生的两个数据文件 `echo`(回波信号)和 `coeff_fft`（脉压系数）导入到 Visual DSP++ Environmen 中运行计算，然后利用 Visual DSP++ Environmen 的数据导出功能将数据导出，再进入 MATLAB 进行分析，这个过程务必保证程序运行处于同一噪声模式下！

4.1 目标回波信号

在本实验中，发射信号采用具有大时宽和大带宽的线性调频信号。在 MATLAB 仿真中模拟的线性调频信号的波形如图 4.1 所示。实验中，设定发射脉冲的时宽为 $42\mu\text{s}$ ，采样率为 2MHz ，所以一个脉宽内的采样点数为 84 点。由图 4.1 中调频频率变化曲线可以看出，一个脉宽内频率先减小后增大，但始终保持线性关系，这与线性调频信号的波形中频率先减小后增大相一致。

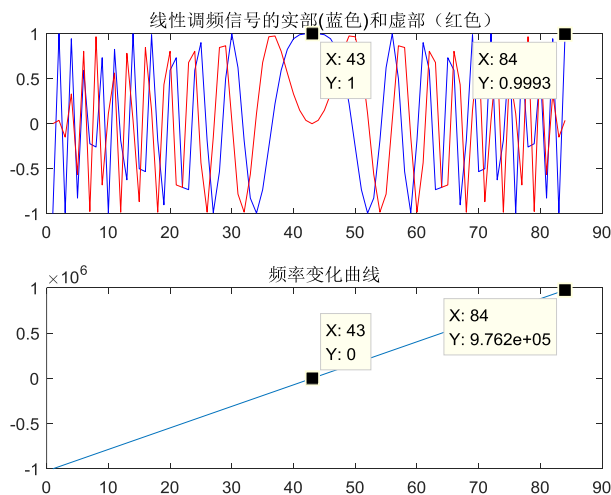
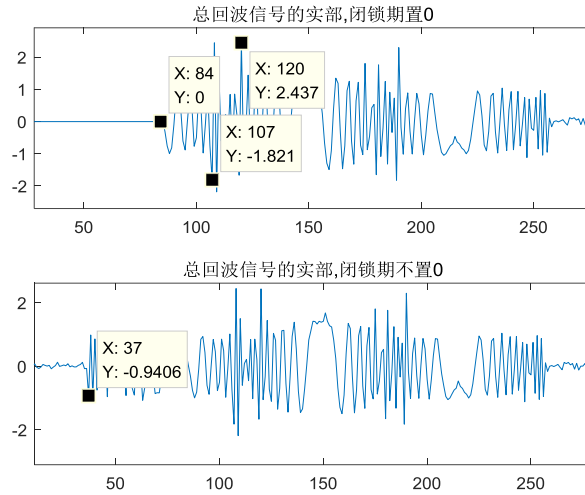


图 4.1 线性调频信号的波形

在 MATLAB 仿真中模拟雷达的回波信号（截取 1 个的部分）如图 4.2 所示。



如图 4.2 雷达的 1 个回波信号

在仿真过程中，设定的 4 个目标的距离分别为[2800, 8025, 8025, 13000]，对应的距离门分别为[37, 107, 107, 173]。由于第二个目标和第三个目标位于同一距离处，其回波重叠在一起，故回波信号中只显示三段回波信号。由于真实雷达在发射信号期间不接收回波信号，即存在一定的闭锁期。闭锁期的长度为发射信号的时宽 42us，对应 $42\mu s * 2\text{MHz} = 84$ 个距离门，根据设置的信号时宽只有当距离大于 $R = c * t / 2 = 6300$ 米时回波信号才不会出现在闭锁期内,因此第一个目标小于 6300 米，故存在部分信号处于闭锁期间。

在 MATLAB 仿真中模拟回波信号时将其闭锁期置为零，第一个目标在第 37 个采样点处，其部分回波信号处于雷达闭锁期内，故回波信号中第一段回波信号只是线性调频信号的一部分。第一个目标的完整波形应该在第 37 个距离门到第 120 个距离门处，第二个目标的完整波形应该在第 107 个距离门到第 120 个距离门处，所以这两个目标的回波在第 107 个距离门到第 120 个距离门处发生重叠，无法分辨出具体目标的位置，所以需要下述的目标检测算法加以处理。

4.2 脉冲压缩的处理结果及分析

脉冲压缩的本质是自相关运算，运算结果的峰值相对于原来的序列会产生偏移。在去除掉暂态点后，脉压结果峰值对应的位置就是目标的位置。图 4.3 是第

1 个脉冲经过脉冲压缩之后的结果。

根据理论计算发射波形的距离分辨率为 $\Delta R = \frac{c}{2B} = 75\text{m}$ ，最大检测距离为 $R_{\max} = \frac{c * PRT}{2} = 36000\text{m}$ ，最大检测距离的验证可以设定一个大于 36000m 的目标然后进行检测。距离的计算可以根据距离门乘以距离分辨率，例如第二个脉冲为 $107 * 75 = 8025\text{m}$ ，与设定距离值相等。

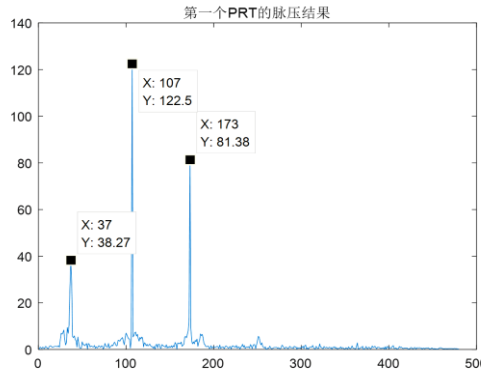


图 4.3 第 1 个脉冲的脉压结果

由上图可以清晰地看出，第 1 个 PRT 内的三段回波信号被区分开了。而且图中目标的距离门为[37, 107, 137]，与理论计算值相符。目标 1 由于其回波信号有一部分在闭锁期内，因此回波数据不完整，反映在脉冲压缩结果上就是其脉冲幅度偏低。另外，也造成了目标 1 的体形有点相对偏胖，因为其部分信号处于闭锁期，信号带宽变小，另一个原因脉压系数不匹配。

上图中第二个峰值较高，是由于目标 2 和目标 3 位于同一距离处，其脉压结果发生重叠。目标 2 和目标 3 的回波功率分别为 1 和 0.25，所以回波的归一化幅度为 1.5 ($= 1 + \sqrt{0.25}$)，而脉压时采样点为 84，所以第二个峰值处的幅度约为 126，仿真结果为 1225，符合理论计算。

现代雷达系统的脉冲压缩常采用数字信号处理的方法，有两种实现的方式：时域的相关处理适合用在要求脉压比（时宽带宽积 BT）较小的时候；频域脉冲压缩通常适合用在较小的脉压比。本实验采用两种进行对比，其中频域脉压运行时间较短，MATLAB 中采用 tic 和 toc 计算的时间约为 0.001471 秒，时域脉压运行时间约为 0.003050 秒。

图 4.4 分别是 MATLAB 时频域脉压的结果和时频域脉压的误差，误差量级

为 10^{-14} ，是符合理论的，因为二者在本质上是一样的。MATLAB 和 DSP 频域脉冲压缩的结果和误差，误差结果为 10^{-5} ，是在可以接受的范围内。

图中的数据为去掉暂态点的数据，去掉暂态点的原因因为脉冲压缩时候卷积过程（反折、移位、相乘、相加）中，存在不完全卷积，换句话说就是在卷积过程（相乘、相加）的时候位于前面的数据经过匹配滤波器时，匹配滤波器对于信号的作用很微弱，因此前面的数据包含的信息很少，一直要等到数据被滤波器全部作用（类似于火车过山洞）时所包含的数据才是最稳定有效的。因此，这个从不稳定到稳定的过程称为暂态，这些点就叫暂态点，暂态点数据的作用不大，去除后对于信号处理能提高数据的准确度。

除了前暂态点之外，还有后暂态点，此处不再论述。

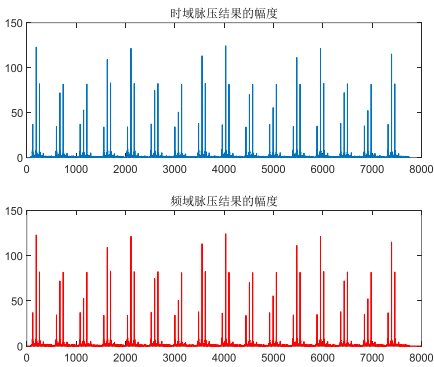


图 4.4 （a）时频域脉压的结果

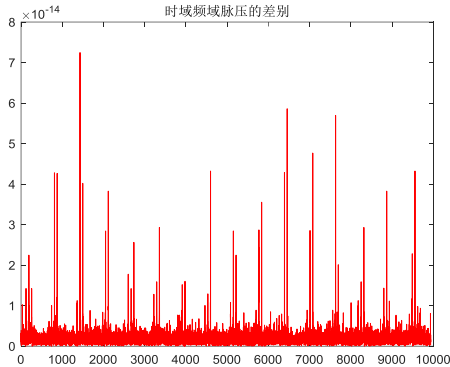


图 4.4 （b）脉压的时频域误差

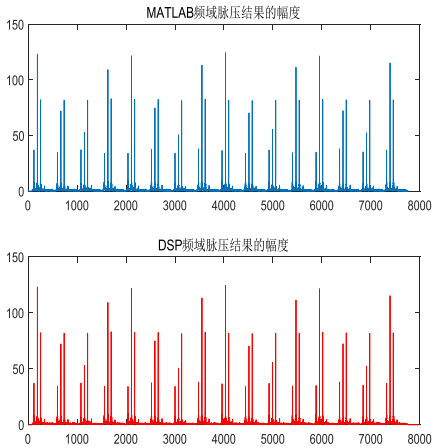


图 4.4 （c）脉冲压缩的结果

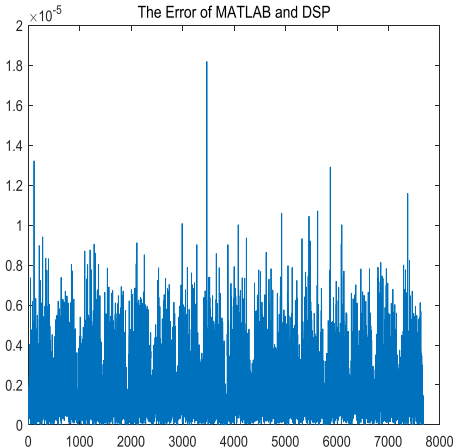


图 4.4 （d）MATLAB 和 DSP 的误差

4.3 MTI 的处理结果及分析

对脉冲压缩的结果进行一次对消以滤除静止目标和静物杂波。

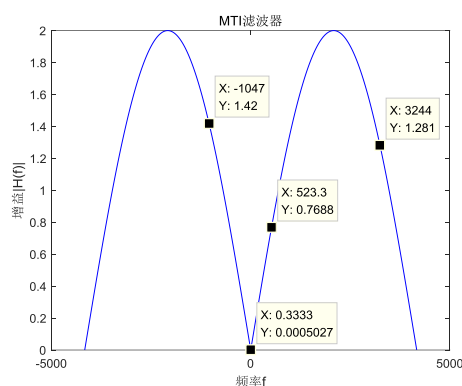


图 4.5 一次对消 MTI 滤波器的幅频响应

图 4.5 是 MTI 滤波器的性能曲线。已知四个目标的速度分别为[50, -100, 0, 310], 根据多普勒频率与目标的径向速度之间的关系 $f_d = \frac{2v_r}{\lambda}$, 可以计算得到四个目标的多普勒频率分别为[523.3, -1047, 0, 3244]。根据上图可知, 速度近似为 0 的目标, 对应的多普勒频率也近似为 0, 在 MTI 滤波器中的增益近乎为 0, 所以 MTI 滤波器对静止目标具有滤除能力。

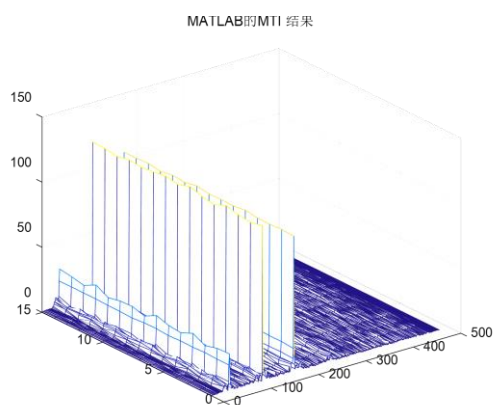


图 4.6 MTI 的结果图

图 4.6 为 MATLAB 的 MTI 结果。其中 X 轴对应距离维, 表示 480 个距离单元; Y 轴表示 16 个脉冲串经过 MTI 处理后产生的 15 组脉冲号; Z 轴表示幅度。

由图可以清晰地看出，位于第 107 个距离门处的静止目标被完全滤除。1 个 PRT 的 MTI 的结果如图 4.7 所示。

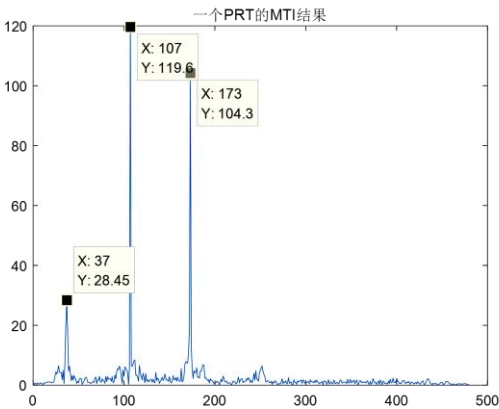


图 4.7 1 个 PRT 的 MTI 结果

MTI 滤波器对不同多普勒频率的目标具有不同的增益。由于各目标速度均不同，导致对应的 MTI 增益不同，所以各目标在幅度上和脉压的结果有较大差别。下表是四个目标在单次仿真中 MTI 处理的理论值和实际值。

表 4-1 各目标单次仿真的结果

目标位置及速度	37 (50m/s)	107(-100m/s)	107(0)	173(310m/s)
多普勒频率	523.33 Hz	-1046.67 Hz	0 Hz	3244 Hz
脉压结果幅度	38.27	122.5		81.38
MTI 滤波器增益	0.7688	1.42	0	1.281
理论 MTI 结果	30.06	115.97		104.25
仿真 MTI 结果	28.45	119.6		104.3

图 4.8 (a)是 DSP 中的 MTI 结果图，图 4.8 (b)为 MATLAB 和 DSP 的结果的误差。明显看出误差结果非常小，约为 10^{-5} 左右，是在可以接受的范围内的。

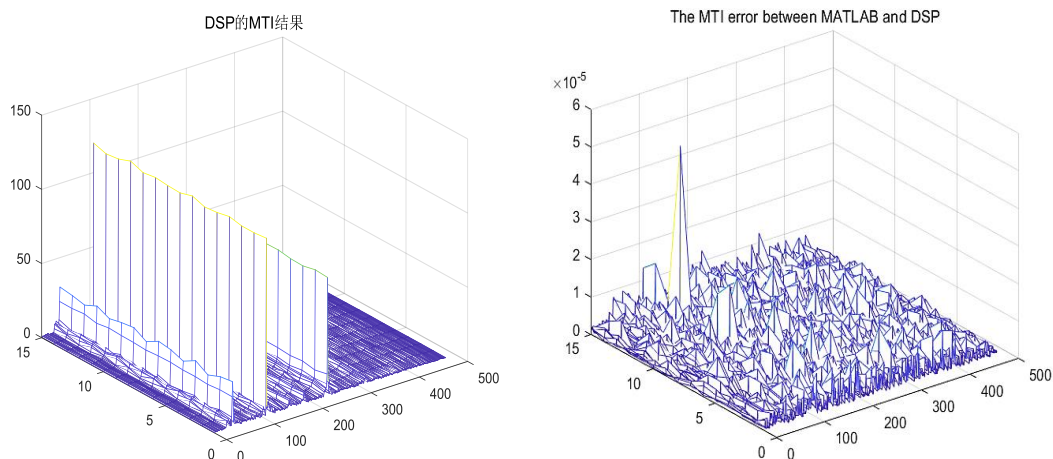


图 4.8 (a)DSP 中的 MTI 结果图

(b)MTTLAB 和 DSP 的 MTI 的误差结果

4.4 MTD 的处理结果及误差

图 4.9 为 MTD 的处理结果。其中 X 轴对应距离维，表示 480 个距离单元；Y 轴为 16 个多普勒滤波器组对应的 16 个速度通道；Z 轴表示幅度。由图可以清晰地看出，位于第 107 个距离门处的静止目标显示在第 0 通道。

由图可以看出有两个目标位于负多普勒通道内，与我们设定的目标速度不符。该雷达的多普勒分辨率为 $\delta_f = f_r / N = 260.42 \text{ Hz}$ ，对应的径向速度分辨率为 $\delta_{v_r} = v * \delta_f / 2 = 24.88 \text{ m/s}$ 。速度的测量方法如下，比如经过 MTD 之后的第 1 个目标位于第 2 个速度通道，因此其速度为 $2 * 24.88 \text{ m/s} = 49.76$ ，约等于 50，与第 1 个目标的设定值几乎相等。

$V_{\max} \frac{\lambda}{2 * PRT} = 398 \text{ m/s}$ ，称为最大不模糊速度。在本实验中设定了负向速度，相应的测速范围为 $[-199, 199] \text{ (m/s)}$ 。当目标速度超出测速范围时，雷达检测会忽略整周期的部分，认为目标处于低速运动，这种情况称为速度模糊。在本实验中，由于第 4 个目标的速度为 310 m/s ，超出了正向最大不模糊速度，因而产生了速度模糊。

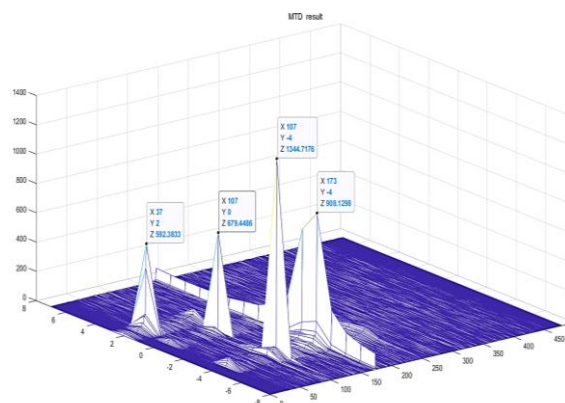


图 4.9 MTD 的处理结果

此外，由图 4.9 可以看出第 4 个目标出现了严重的频谱泄露。若采用 N 点 DFT 对一复数序列进行变换，那么只有当该序列频率为 DFT 的频率间隔的整数倍时，在其频谱图中才会出现能量绝对集中的单根谱线，否则其频谱将会散布在整个频率范围内。现在分析实验中 4 个目标的频谱泄露情况。

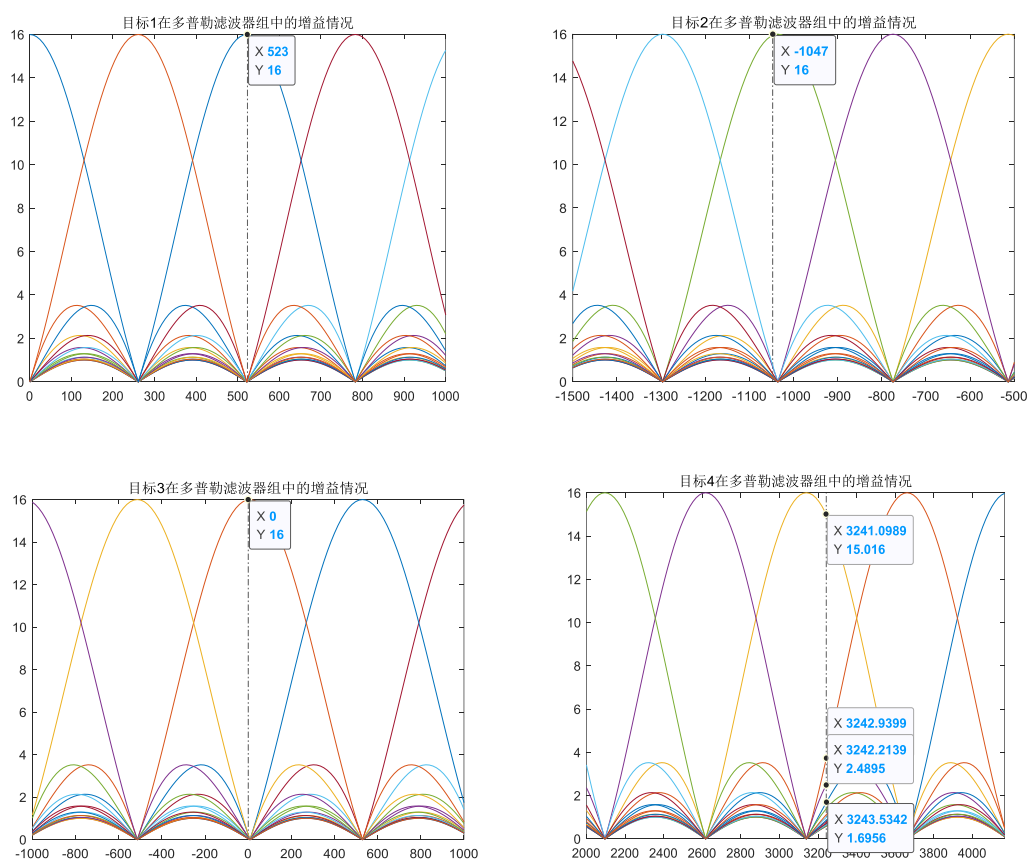


图 4.10 各目标的多普勒频率增益图

各目标的多普勒频率分别为[523, -1046, 0, 3244]，如图 4.10 所示，是各目标在多普勒滤波器组中的增益情况。目标 1 的多普勒频率近似为多普勒频率分辨率的两倍，所以该目标在滤波器组中某一滤波器处的响应近似为 16，而在其他滤波器的增益近似为 0，故不存在频谱泄漏。类似地，目标 3 位于零频处，其仅在某一滤波器中的增益响应为 16，故不存在频谱泄漏。目标 2 在多普勒滤波器组中某一滤波器的增益响应约为 15.98，因而存在轻微的频谱泄漏。对于目标 4，该目标在多普勒滤波器组的某两个滤波器中均有较大的增益，同时存在其他滤波器中也存在明显增益，故目标 4 存在明显的频谱泄漏。

下图是 DSP 的 MTD 处理结果及误差，误差结果为 10^{-4} 左右，是在可以接受的范围内。

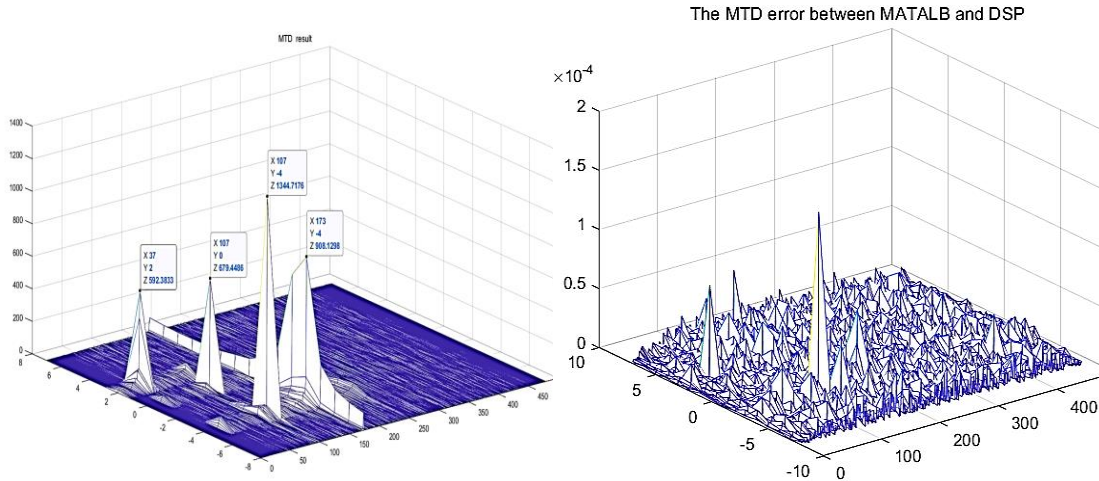


图 4.11 (a) DSP 的 MTD 处理结果

(b) MATLAB 和 DSP 的 MTD 的误差结果

4.5 解速度模糊

由 4.4 节分析可知，当目标速度超过最大不模糊速度时，就会出现速度模糊现象。我们可以利用两参差重频的方法对目标 4 进行解速度模糊。

设 $PRT_1 = 240\mu s$ ， $PRT_2 = 310\mu s$ ，则推算出：

$$f_{r_1} = 4167.66Hz, f_{r_2} = 3225.8Hz \quad f_{fxc} \quad (4-1)$$

多普勒频率分辨率为：

$$\Delta f_1 = \frac{f_{r1}}{N} = 260.42\text{Hz}, \quad \Delta f_2 = \frac{f_{r2}}{N} = 201.61\text{Hz} \quad (4-2)$$

速度分辨率为:

$$\Delta v_1 = \frac{\lambda * \Delta f_1}{2} = 24.88 \text{ m/s}, \quad \Delta v_2 = \frac{\lambda * \Delta f_2}{2} = 19.26 \text{ m/s} \quad (4-3)$$

两个不同的 PRT 对应的 MTD 结果分别如图 4.12 所示。

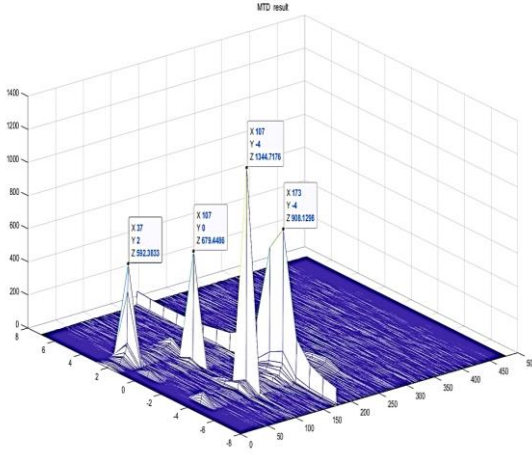


图 4.12 (a) PRT₁ = 240μs 的 MTD 结果

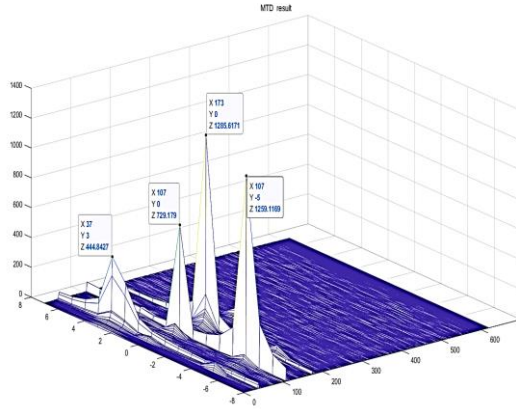


图 4.12(b) PRT₂ = 310μs 的 MTD 结果

当 PRT₁ = 240μs 时，目标位于 -4 通道对应的多普勒频移为 $f_{d1} = 2v/\lambda = -1041.5\text{Hz}$;

当 PRT₂ = 310μs 时，目标位于 0 通道对应的多普勒频移为 $f_{d2} = 2v/\lambda = 0\text{Hz}$ 。
根据参差重频解模糊原理，第四个目标的计算数据如下：

$$f_{d1} = -1041.5\text{Hz} \quad (4-4)$$

$$f_{d2} = 0\text{Hz} \quad (4-5)$$

$$f_{r1} = 260.42\text{Hz} \quad (4-6)$$

$$f_{r2} = 201.61\text{Hz} \quad (4-7)$$

因为 $f_{d1} < f_{d2}$, 所以

$$M = \frac{f_{d2} - f_{d1}}{f_{r1} - f_{r2}} \approx 17 \quad (4-8)$$

因此，可以得到真正的多普勒频率为

$$f_d = M * f_{r1} + f_{d1} = M * f_{r2} + f_{d2} = 3427.4\text{Hz} \quad (4-9)$$

如图 4.13 所示的是解速度模糊分析图，两条曲线的交点即为实际的多普勒频率，与理论计算的结果一致。

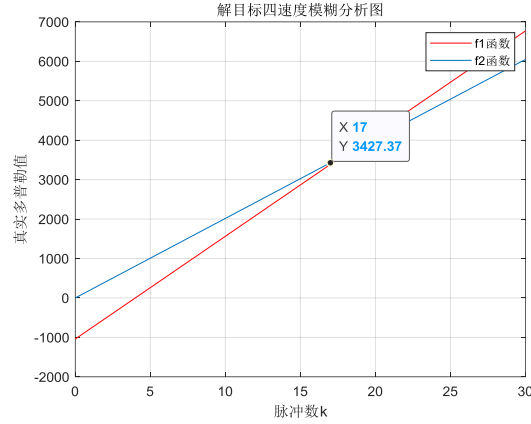


图 4.13 解速度模糊分析图

因此目标 4 的真实速度为

$$v = \frac{f_d \cdot \lambda}{2} = 327.44 \text{ m/s} \quad (4-10)$$

这与我们在实验中设定的 310m/s 的速度比较接近。

4.6 恒虚警率检测仿真与误差分析

图 4.14 所示的是脉冲压缩的 CFAR 结果，从图中可以看出，CFAR 处理使得门限值以下的检测单元被清零，从而去除了脉压结果中的噪声以及干扰，减小了虚警概率。例如，将门限 T 设置为 4，假设检测到 3 个目标，这时的恒虚警概率的计算方式为：检测到的目标数量/（脉冲数*距离门）=3/（16*480）=3.9063*10⁻⁴。

这相当于求在距离门与脉冲数所构成的“网格”几何面积中求出目标落在这个“网格”中的概率，这与概率论中的几何概率型类似。门限值设置过低会产生虚警，过大会产生漏警，因此通过改变门限值平衡检测概率和虚警概率，以适应不同的检测情况和环境。通常恒虚警概率要求小于10⁻⁶，因此 T=4 还可以增大。因此门限值 T 要根据实际测试中的目标数量进行增加或者减小。

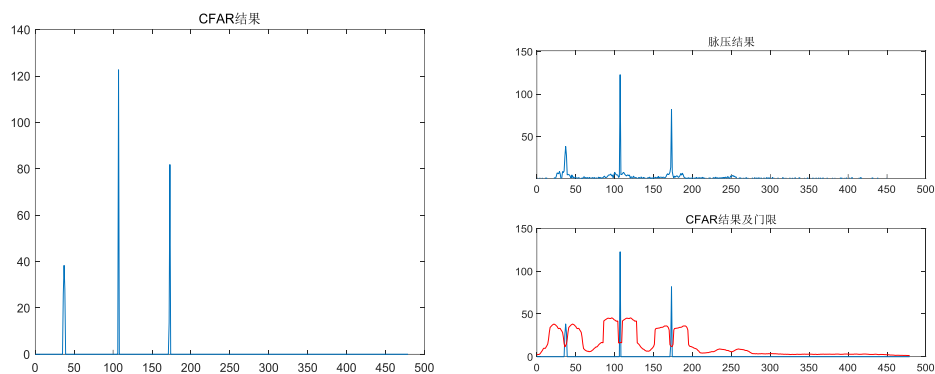


图 4.14 脉冲压缩的 CFAR 结果

对 MTD 的 CFAR 结果如图 4.15 所示。

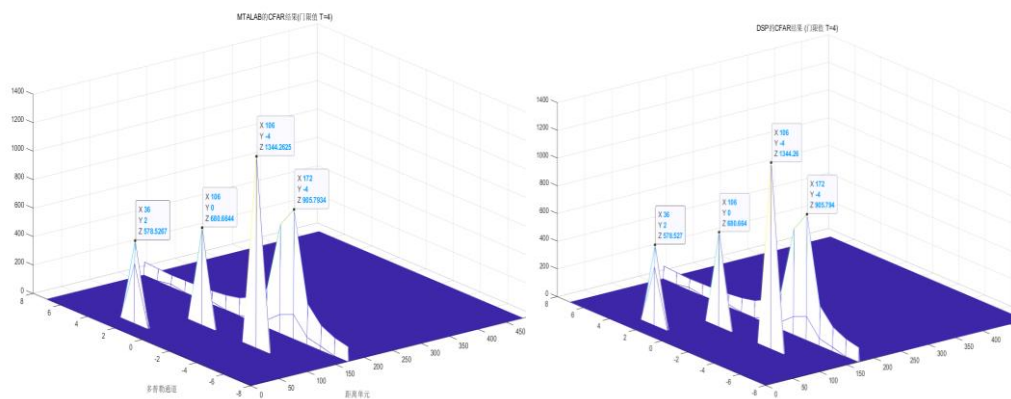


图 4.15 (a) MATLAB 的 CFAR 结果

图 4.15 (b) DSP 的 CFAR 结果

MATLAB 和 DSP 的 CFAR 结果的误差如图 4.16 所示，误差值约为 10^{-3} ，可以接受。DSP 进行数据处理与 MATLAB 进行处理的值近似，会存在一定的误差，并且误差是逐级积累的。第一，这可能是程序算法上的计算误差；第二，这可能是不同编译器对于浮点数据处理的精度不同。

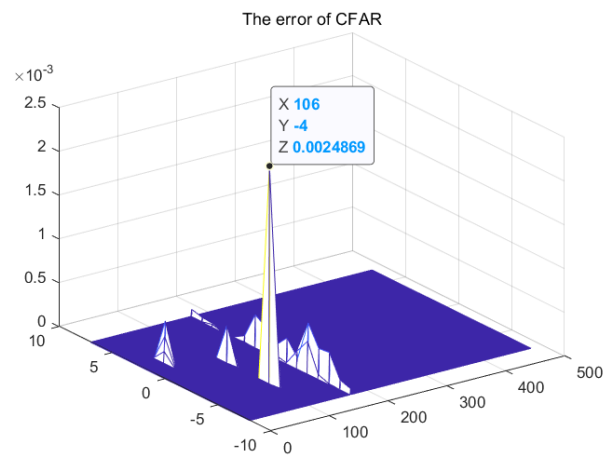


图 4.16 MATLAB 和 DSP 的 CFAR 的误差