

雷达信号分析与处理综合试验箱

用户手册

江苏万邦微电子有限公司

2018 年 06 月 20

目 录

一、 产品简介.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 产品组成及功能	1
1.2.1 保护模块	2
1.2.2 信号产生及处理模块.....	3
1.2.3 上位机软件	4
1.3 产品优点.....	4
1.4 指标.....	5
二、 使用说明.....	5
2.1 安装方式.....	5
2.2 上位机使用说明	6
2.3 理论结果与实际输出结果对比	8
2.3.1 线性调频信号.....	8
2.3.2 二相编码信号(13 位巴克码).....	9
三、 实验课程设置	10
3.1 雷达波形参数	10
3.1.1 中频回波解析表达式推导	11
3.1.2 仿真结果	11
3.2 数字下变频.....	12
3.2.1 直接数字下变频原理	12
3.2.2 仿真结果	13
3.3 脉冲压缩.....	13
3.3.1 脉冲压缩原理.....	13
3.3.2 仿真结果	14
3.4 多普勒累积.....	15
3.4.1 多普勒累积原理.....	15
3.4.2 仿真结果	17
3.5 恒虚警率检测	17

3.5.1 恒虚警率检测原理	17
3.6 单脉冲比幅测角	19
3.6.1 单脉冲比幅测角的原理	19
3.6.2 仿真结果	21
四、 注意事项.....	21

一、产品简介

1.1 背景

雷达系统仿真在雷达系统的研制中有着非常重要的地位。在雷达系统的研究与开发中，利用仿真技术可以确定系统设计方案；对给定的雷达系统进行性能评估、寻求新的雷达体制、寻求更好的信号处理技术、寻求抗各种有源和无源干扰的方法等等。以上这些方法都可以通过仿真得到验证。应当说，雷达系统仿真是一种能够节约大量人力物力资源，缩短研究周期，解决设计中某些难题和推动雷达技术发展的非常有效的方法与手段。然而在对雷达系统进行建模仿真时，系统中的有些部分不能够用数学模型准确的替代，为了保证雷达系统仿真的准确性和真实性，采用一种更加接近真实情况的仿真技术尤为必要，因此实物仿真试验系统得到大力推广。

通过试验箱系统仿真和软件系统仿真对照，可以验证雷达系统设计的正确性，加深对于雷达系统的理解，训练实验者的逻辑思维能力、动手实践能力、科技创新能力，对于高校雷达相关科目的教学实践、整个教学体系的完善有着重要作用。

1.2 产品组成及功能

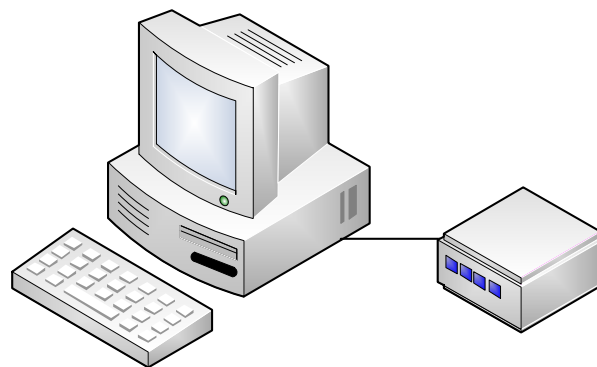


图 1 雷达信号分析与处理综合试验箱

雷达信号分析与处理综合试验箱系统由保护模块、信号产生及处理模块和上位机软件组成。

上位机软件与试验箱之间通过千兆以太网口实现通信。上位机软件发出工作指令包（包含目标参数、波形参数、算法参数等），经网口传输到试验箱，试验箱中的信号发射模块接收到显控计算机中的命令包，依据命令包的信息控制信号

发射模块产生中频回波信号，产生的中频回波信号在信号发生模块通过 4 路 D/A 输出到信号接收模块，在信号接收模块中频回波信号进行数字下变频、脉冲压缩、多普勒累积、CFAR、和差比幅测角等一系列信号处理。同时可通过示波器或频谱仪观察中频信号、正交解调后得到的基带信号、脉冲压缩结果等的时域波形或频谱。

1.2.1 保护模块

保护模块主要包括航空机箱、PCB 保护金属框、有机玻璃盖板等组成，主要作用是保护信号处理 PCB 板，避免异物与信号处理板接触，增加产品使用寿命。



图 2 航空机箱实拍图



图 3 PCB 保护金属框正面



图 4 PCB 保护金属框背面

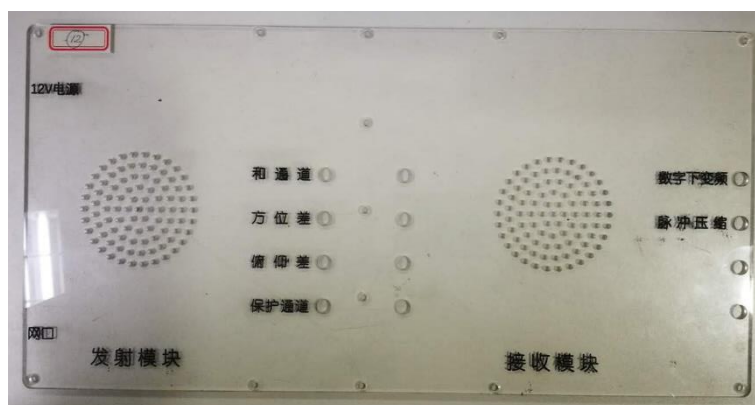


图 5 有机玻璃盖板实拍图

1.2.2 信号产生及处理模块

信号产生及处理模块即为信号产生与处理 PCB 板，包含信号发射模块、信号接收模块、信号输出模块和开关电源等，主要功能是根据从网口收到的命令报文仿真生成中频回波，然后对中频回波进行数字下变频、脉冲压缩、多普勒累积、恒虚警率检测(CFAR)、单脉冲比幅测角等信号处理流程，得到目标信息，并将目标信息打包为报文通过网口回传给显控计算机。信号处理流程图见图 6。

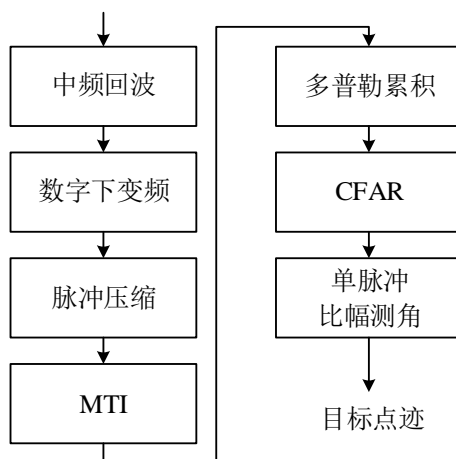


图 6 信号处理流程

1.2.3 上位机软件

上位机软件主要完成控制、信号仿真及处理、显示等功能：

- 1) 配置系统所有参数（具有对目标速度、距离、方位角、俯仰角、RCS、SNR 设置的能力）；
- 2) 发送控制命令报文，实现对整个系统的控制；
- 3) 显示每一步信号处理模块结果。

1.3 产品优点

- 1) 本系统可利用仿真技术制定系统设计方案，并可对给定的雷达系统进行性能评估、寻求新的雷达体制、寻求更好的信号处理技术、寻求抗各种有源和无源干扰的方法等等。因此，本系统是一种能够节约大量人力物力资源，缩短研究周期，解决设计中某些难题和推动雷达技术发展的非常有效的方法与手段。
- 2) 本系统采用一种更加接近真实情况的仿真技术，保证雷达系统仿真的准确性和真实性；
- 3) 本系统采用软件化设计、具备模拟仿真多种雷达信号波形的能力，可实现雷达信号处理过程中各步骤的信号波形显示，使抽象的雷达理论、雷达技术实物化。通过软件仿真与系统模拟相结合，帮助学生理解抽象、复杂的雷达原理；

- 4) 目前常用的半实物雷达系统主要用于武器装备研制中，例如我国的飞行模拟器、舰艇模拟器等，但是很少有能把半实物雷达系统应用于教学中；
- 5) 在传统的雷达实验教学中，最常用的是使用 MATLAB 编程、Simulink 等软件工具对雷达的基本原理进行实验性说明，其次是使用某些实物系统来说明雷达信号处理流程中某个阶段的原理，而没有将整个雷达信号处理流程整合在一个半实物雷达仿真系统中。本系统则弥补了这一方面的不足。

1.4 指标

- 1) 发射波形最大信号带宽：20MHz；
- 2) 中频信号频率：75MHz；
- 3) 可设置的目标个数：支持多目标仿真（可以独立设置 2 个目标）
- 4) 目标之间的最小距离差： $\leq 20\text{m}$
- 5) 目标探测距离范围：100m~3000m
- 6) 目标的探测速度： $\leq 30\text{m/s}$
- 7) 目标之间的最小速度差： $\leq 5\text{m/s}$

二、使用说明

2.1 安装方式

产品安装方式见图 7。首先关闭开关；然后将电源适配器接入试验箱的电源接口；之后用网线连接试验箱和上位机软件所在计算机的网口；最后通过连接线连接发射模块和接收模块的对应通道（如图 8）。

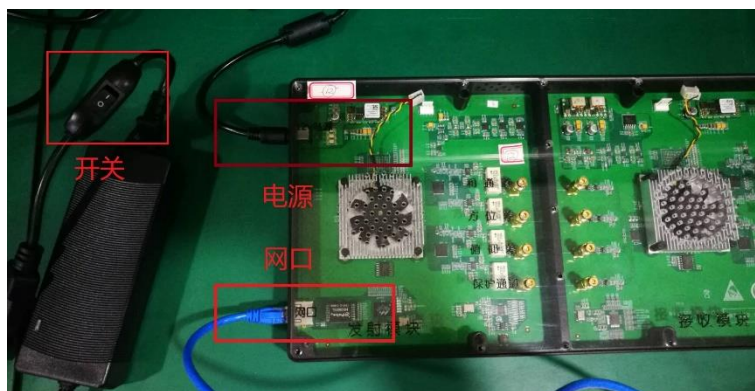


图 7 产品安装方式



图 8 发射模块和接收模块连接方式

2.2 上位机使用说明

打开上位机，首先会弹出如图 9 所示的网卡选择界面，选择上位机所在计算机与试验箱连接的网口，然后在图 10 所示的网卡选择提示界面确认后，进入图 11 所示的上位机主界面。

在上位机主界面上，1 处为波形参数选择区域，包括波形选择、脉宽、脉冲重复周期等参数，另外给出了载频、中频和采样率的数值；2 处为目标参数选择区域，包括目标个数、距离、速度、方位角、俯仰角、RCS、SNR 等参数；3 处为算法参数，主要是 CFAR 的门限；4 处为系统控制区域，包括“工作”、“采样”、“连续发包开始”、“连续发包停止”等；5 处显示每一个信号处理节点的结果。当配置好 1、2、3 处的参数后，点击 4 处的“工作”，5 处将显示对应的信号处理结果；点击 4 处的“采样”则可返回试验箱产生的中频回波的 AD 数据；“连续发包开始”和“连续发包停止”按钮控制上位机开始和停止连续发送命令报文，便于通过示波器观测试验箱的各信号处理节点的输出波形。

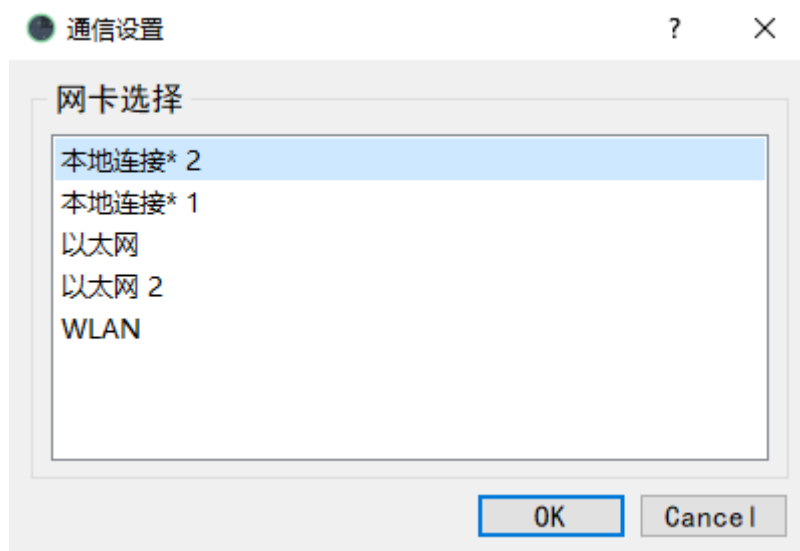


图 9 网口选择界面

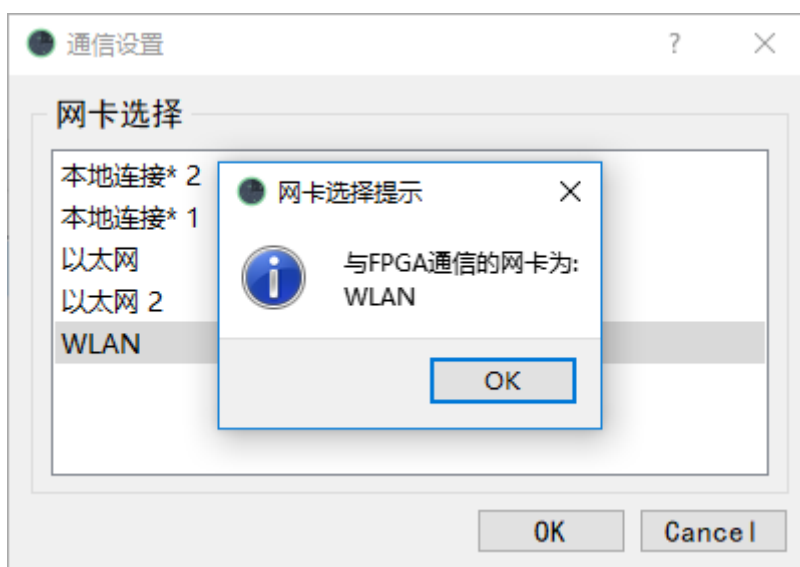


图 10 网卡选择提示界面

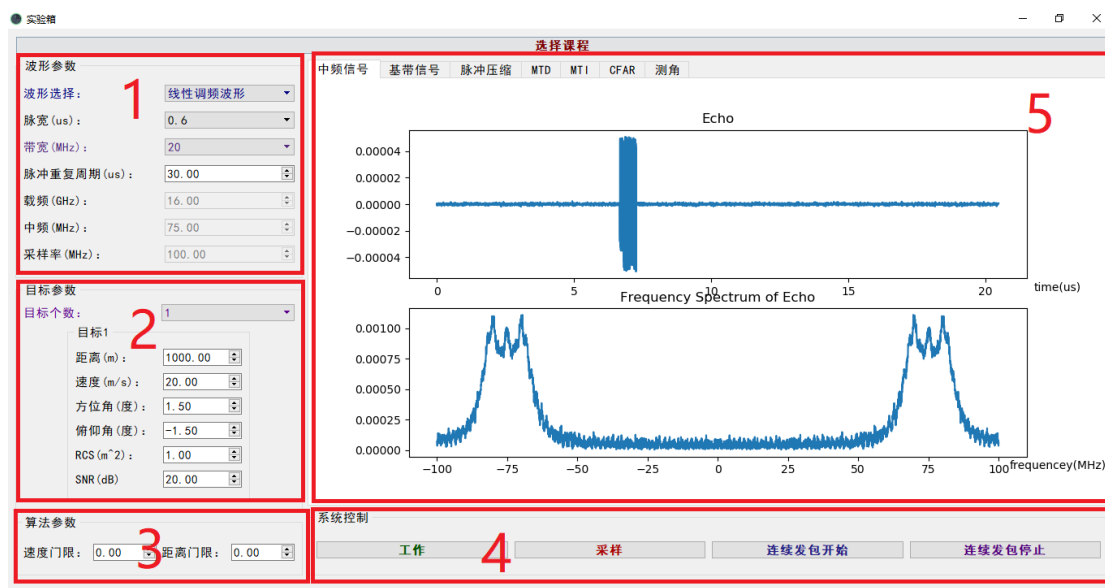
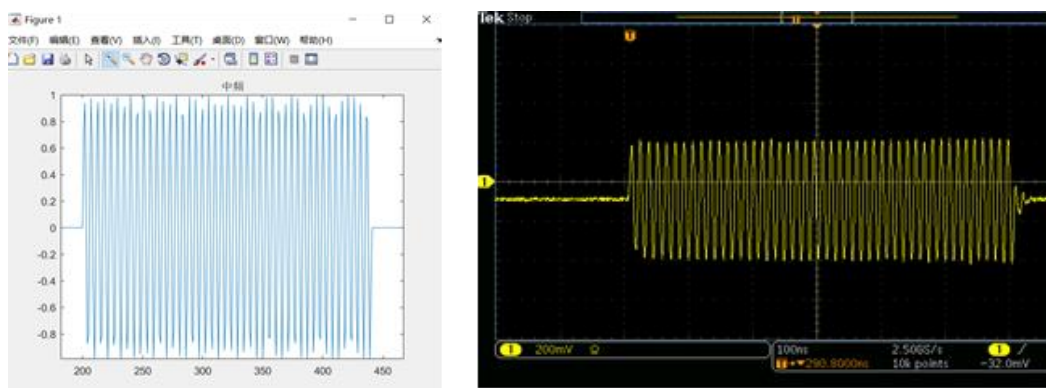


图 11 上位机主界面

2.3 理论结果与实际输出结果对比

下面给出典型参数的线性调频信号和二相编码信号（13 位巴克码）的中频信号、基带信号、脉冲压缩结果的理论结果和实际结果对比。

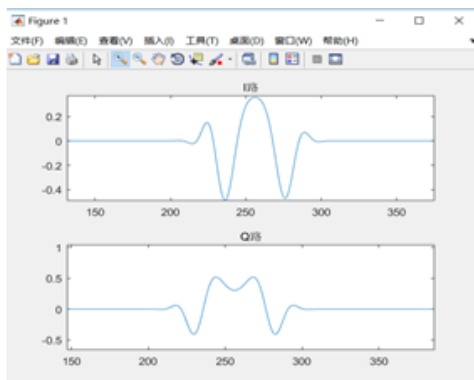
2.3.1 线性调频信号



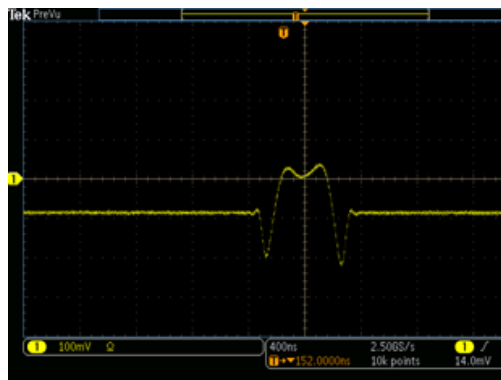
(a) 理论结果;

(b) 实测结果

图 12 中频信号

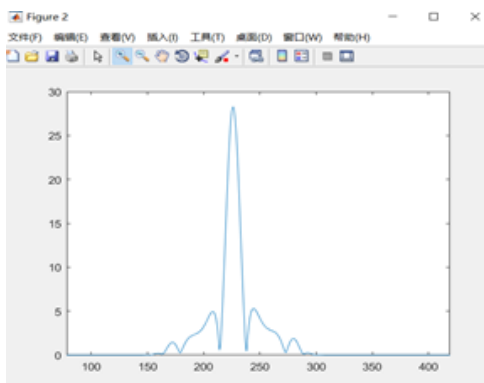


(a) 理论结果;

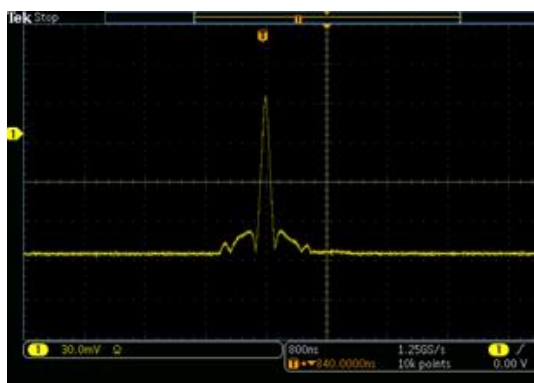


(b) 实测结果

图 13 基带信号



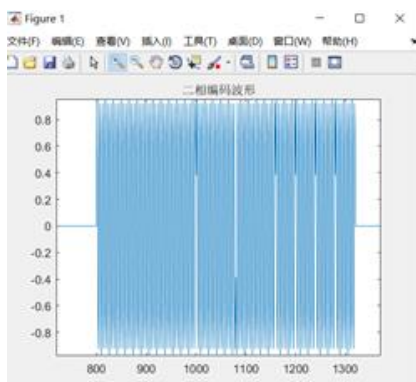
(a) 理论结果;



(b) 实测结果

图 14 脉冲压缩结果

2.3.2 二相编码信号(13 位巴克码)

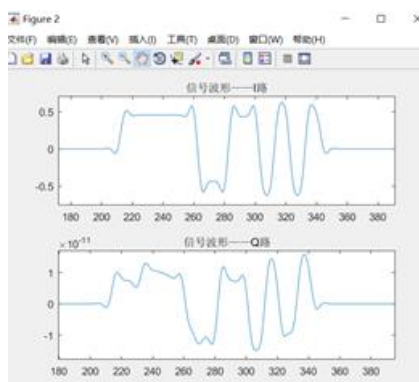


(a) 理论结果;

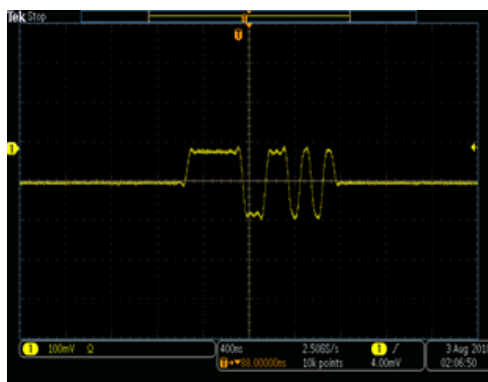


(b) 实测结果

图 15 中频信号

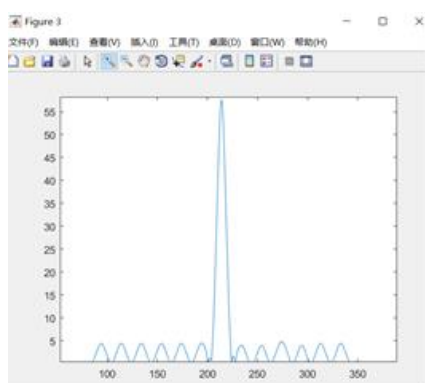


(a) 理论结果;

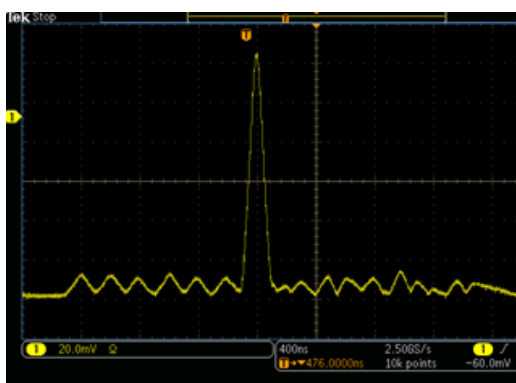


(b) 实测结果

图 16 基带信号



(a) 理论结果;



(b) 实测结果

图 17 脉冲压缩结果

三、建议实验课程设置

建议将本实验主要分为：雷达波形参数、数字下变频、脉冲压缩、多普勒累积、恒虚警率检测、单脉冲比幅测角等部分。下面给出每部分的课程介绍。

3.1 雷达波形参数

第一章“雷达波形参数”主要介绍雷达收发信号的相关参数，包括：波形、载频、中频、脉宽、带宽、脉冲重复周期(PRT)等。

雷达系统可采用连续波形、调制或未调制的脉冲波形，常见的调制形式有线性调频、步进频和编码波形等，本课程主要介绍线性调频波形和二相编码波形。雷达的距离分辨率和多普勒分辨率与特定波形的参数直接相关。线性调频波形的主要参数有：脉宽、带宽和脉冲重复周期等；二相编码波形的主要参数有：码宽、编码方式、脉冲重复周期等，常见的编码方式有：7 位巴克码、13 位巴克码、7

位 M 码和 15 位 M 码等。

下面以线性调频波形为例，给出信号产生和信号处理各流程的原理。

3.1.1 中频回波解析表达式推导

雷达发射的线性调频信号的解析表达式为

$$s_t(t) = A_t \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cdot \cos\left[2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right] \quad (1)$$

式中， A_t 为信号幅度； T_p 为脉冲宽度； f_c 为雷达载频； $\mu = B/T_p$ ，为调频斜率， B 为信号带宽； $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数，

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) = \begin{cases} 1 & |t/T_p| < 1/2 \\ 0 & |t/T_p| > 1/2 \end{cases} \quad (2)$$

对于距离为 r_0 的静止目标，其回波为

$$s_r(t) = A_r \text{rect}\left(\frac{t - \tau_0}{T_p}\right) \cos\left\{2\pi\left[f_c(t - \tau_0) + \frac{1}{2}\mu(t - \tau_0)^2\right]\right\} \quad (3)$$

式中， A_r 为回波幅度； $\tau_0 = 2r_0/c$ ，为天线接收的目标回波与发射信号之间的时延。

经过混频（乘以 $\cos[2\pi(f_c - f_i)t]$ ）、低通滤波后，得到中频信号为

$$s_i(t) = A_i \text{rect}\left(\frac{t - \tau_0}{T_p}\right) \cos\left[2\pi f_i t - 2\pi f_c \tau_0 + \pi\mu(t - \tau_0)^2 + \varphi_i\right] \quad (4)$$

式中， A_i 为中频信号幅度； f_i 为中频频率； φ_i 为固定相位。

3.1.2 仿真结果

设置信号中频 $f_i = 75\text{MHz}$ ，采样率 $f_s = 100\text{MHz}$ ，带宽 $B = 20\text{MHz}$ ，脉冲宽度 $T_p = 0.6\mu\text{s}$ ，目标初始距离分别为 1000m 。中频信号的时域波形和频谱的仿真结果见图 18(a)和(b)。

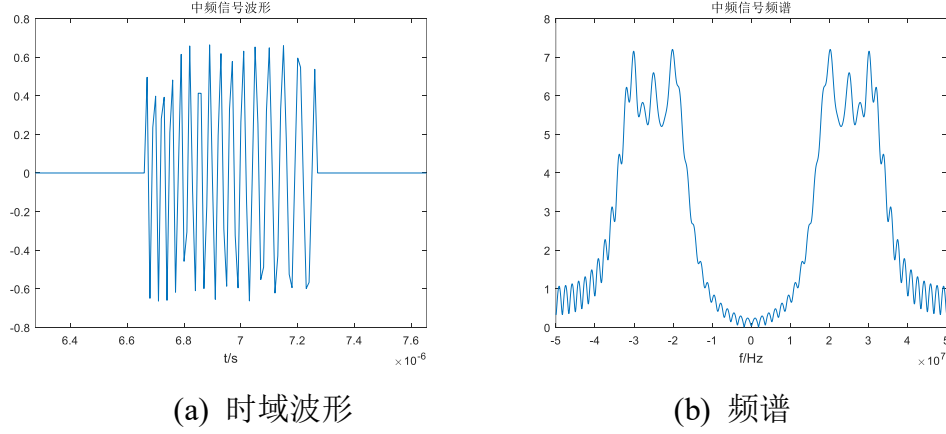


图 18 中频信号的仿真结果

3.2 数字下变频

数字下变频的目的是将中频信号搬移至基带。

3.2.1 直接数字下变频原理

在选择 ADC 采样率 f_s 和中频 f_i 时，若满足 $4f_i/f_s$ 为奇数，则可通过采样将信号搬移到基带，同时完成下变频和正交解调，得到基带信号的实部 I 和虚部 Q。该方法称为直接数字下变频，其原理介绍如下：

假设一窄带信号为 $s(t) = a(t)\cos[2\pi f_i t + \varphi(t)]$ ，其中， $a(t)$ 为信号的包络； f_i 为中心频率； $\varphi(t)$ 为信号相位。 $a(t)$ 和 $\varphi(t)$ 相对于 $\cos(2\pi f_i t)$ 变化缓慢。 $s(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned}
 s(t) &= a(t)\cos[2\pi f_i t + \varphi(t)] \\
 &= a(t)\cos[\varphi(t)]\cos(2\pi f_i t) - a(t)\sin[\varphi(t)]\sin(2\pi f_i t) \\
 &= I(t)\cos(2\pi f_i t) - Q(t)\sin(2\pi f_i t)
 \end{aligned} \tag{5}$$

经采样后，得到离散序列为

$$\begin{aligned}
 s_p(nT_s) &= I(nT_s)\cos(2\pi f_i nT_s) - Q(nT_s)\sin(2\pi f_i nT_s) \\
 &= I(nT_s)\cos(2\pi f_i n / f_s) - Q(nT_s)\sin(2\pi f_i n / f_s) \\
 &= I(nT_s)\cos\left(\frac{n\pi}{2} \frac{4f_i}{f_s}\right) - Q(nT_s)\sin\left(\frac{n\pi}{2} \frac{4f_i}{f_s}\right), n = 0, 1, 2, \dots
 \end{aligned} \tag{6}$$

式中， $T_s = 1/f_s$ ，为采样周期。若 $4f_i/f_s$ 为奇数，令 $4f_i/f_s = 2m + 1, m = 0, 1, 2, \dots$ ，此时，

若 n 为偶数，令 $n = 2k, k = 0, 1, 2, \dots$ ，对应的采样序列的偶数项为

$$s_p(nT_s) = (-1)^{\frac{n}{2}} I(nT_s) \quad (7)$$

若 n 为奇数，令 $n = 2k + 1, k = 0, 1, 2, \dots$ ，对应的采样序列的奇数项为

$$s_p(nT_s) = (-1)^{m+1} (-1)^{\frac{n-1}{2}} Q(nT_s) \quad (8)$$

综上，可通过采样、抽取、延时滤波等处理方法，将中频信号变换到基带。具体流程图见图 19。由式(4)得到的基带信号的解析表达式为：

$$s_b(t) = A_b \text{rect}\left(\frac{t - \tau_0}{T_p}\right) \exp\left\{j\left[-2\pi f_c \tau_0 + \pi \mu (t - \tau_0)^2 + \varphi_b\right]\right\} \quad (9)$$

式中， φ_b 为固定相位。

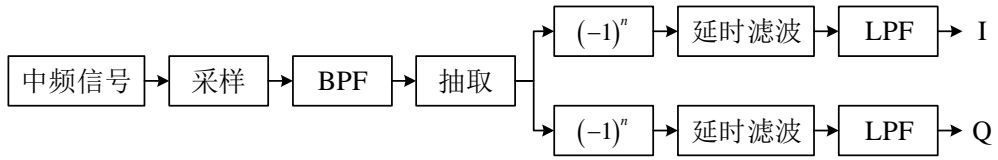


图 19 直接数字下变频流程图

3.2.2 仿真结果

数字下变频后的仿真结果见图 20(a)和(b)。

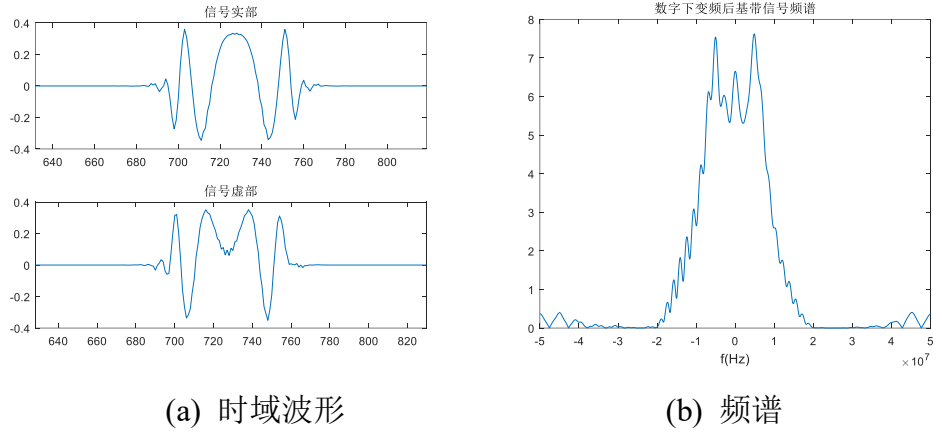


图 20 基带信号的仿真结果

3.3 脉冲压缩

3.3.1 脉冲压缩原理

距离分辨率是指同一方向上两个大小相等点目标之间的最小可区分距离，示

意图见图 21。对于传统的简单矩形脉冲体制雷达，距离分辨率取决于脉冲宽度 T_p ，即 $\Delta r = cT_p/2$ 。因此，高距离分辨率需要发射窄脉冲。

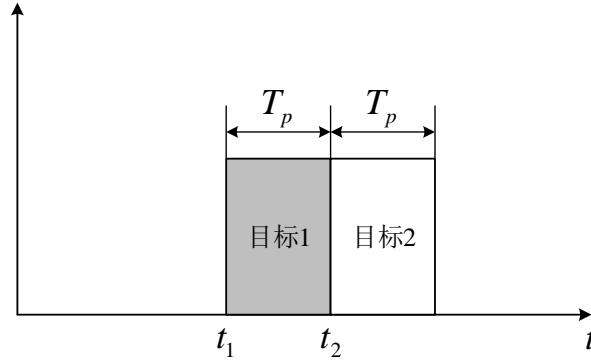


图 21 距离分辨率示意图

然而，雷达作用距离与脉冲信号能量有关，要提高作用距离须提高脉冲信号能量。发射脉冲能量可表示为 $E = P_t \cdot T_p$ ， P_t 为发射脉冲峰值功率。受硬件条件限制，提升峰值功率成本高且提升范围有限，因此提升发射脉冲能量只能靠增大脉冲宽度实现，导致距离分辨率下降。因此，对于传统简单矩形脉冲雷达，距离分辨率和作用距离是一对相互制约的指标。

脉冲压缩是解决上述问题的有效途径，其核心是匹配滤波器。匹配滤波器的输出是信号的自相关函数，傅里叶变换值是信号的功率谱。匹配滤波器的输出脉冲宽度 T_p' 取决于信号的带宽 B 。通过在发射脉冲内采用附加的频率调制或者相位调制以增大带宽 B ，然后用匹配滤波器对接收信号进行处理，可将长脉冲的脉冲宽度压缩到 $1/B$ 。这样，既可以发射长脉冲以满足作用距离的需求，又可以得到短脉冲对应的高距离分辨率。脉冲内的附加调制一般使 $B \cdot T_p \ll 1$ ，称 $B \cdot T_p$ 为时宽带宽积。此外，为降低匹配滤波器输出的时间副瓣电平，一般在匹配滤波器后增加一频域加权滤波器。在这种情况下，加权滤波器会导致一定程度的主瓣展宽和信噪比损失。

3.3.2 仿真结果

脉冲压缩的仿真结果见图 22，尖峰所在的距离为 1000m，与预设的位置一致。

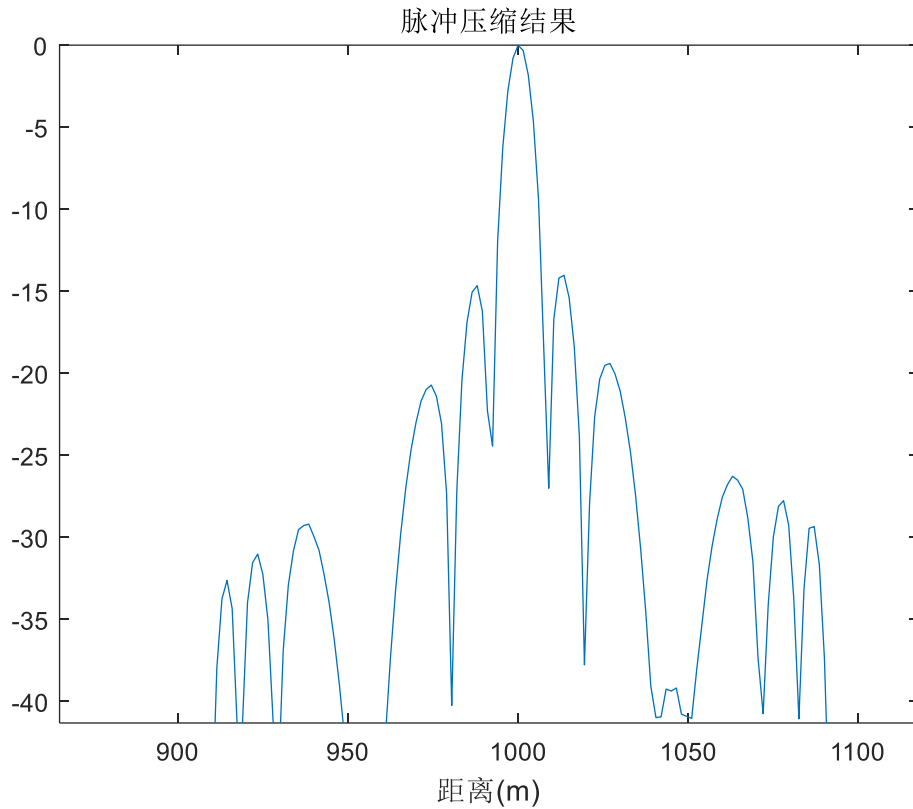


图 22 脉冲压缩的仿真结果

3.4 多普勒累积

3.4.1 多普勒累积原理

试验箱仿真发射的是周期性脉冲序列, 定义脉冲之间的时间间隔为脉冲重复间隔(Pulse Repetition Interval, PRI)。对回波数据按 PRI 重排后, 得到“快时间-慢时间”二维数组矩阵, 示意图见图 23。矩阵每一行代表对每一个 PRI 内的回波采样后得到的数据。快时间轴的采样率为信号采样率 f_s , 采样单元称为距离门或者距离单元; 慢时间轴的采样率为脉冲重复周期(Pulse Repetition Frequency, PRF)。对不同 PRI 的数据进行相干累积后, 可有效提升信噪比。相干累积的时间间隔称为相干处理间隔(Coherent Processing Interval, CPI)。

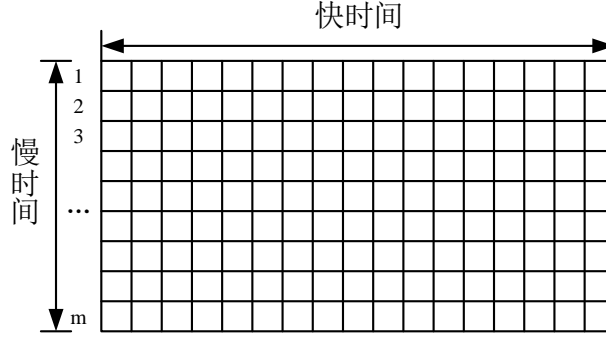


图 23 快时间-慢时间二维数组示意图

在本雷达的应用背景中，运动目标的速度远小于光速，可采用“停-走”(stop-go)模型构建回波：在同一 PRI 内采用“准静止”假设，即假设信号从雷达发射机到达目标对应的时间段内，目标的位置变化可忽略不计；在相邻 PRI 之间，考虑目标运动引入的时延相位。解析表达式推导如下：

设雷达的 PRI 为 T_r ，对于初始距离为 r_0 、速度为 v 的匀速运动的目标，在第 k 个 PRI 后，其距离为 $r(kT_r) = r_0 + v(k-1)T_r$ ，引起的时延为

$$\tau(kT_r) = \frac{2[r_0 + v(k-1)T_r]}{c} \quad (10)$$

则忽略固定相位，第 k 个 PRI 的回波可表示为

$$s_r(t_f, kT_r) = \exp\left\{j\pi\mu\left\{t_f - \frac{2[r_0 + v(k-1)T_r]}{c}\right\}^2\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi f_c\left\{\frac{2[r_0 + v(k-1)T_r]}{c}\right\}\right\} \quad (11)$$

式(11)中， t_f 表示快时间。忽略式(11)等号右侧第 2 项中的 r_0 ，则

$$s_r(t_f, kT_r) = \exp\left\{j\pi\mu\left\{t_f - \frac{2[r_0 + v(k-1)T_r]}{c}\right\}^2\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi f_c\left[\frac{2v(k-1)T_r}{c}\right]\right\} \quad (12)$$

式(12)中，多普勒频率 $f_d = -(2v/c) \cdot f_c$ ，则式(12)可化为

$$s_r(t_f, kT_r) = \exp\left\{j\pi\mu\left\{t_f - \frac{2[r_0 + v(k-1)T_r]}{c}\right\}^2\right\} \cdot \exp[j2\pi f_d(k-1)T_r] \quad (13)$$

从式(13)可以看出，在快时间维，目标与雷达之间的距离在回波中体现为时延，通过对每个 PRI 的回波做脉冲压缩，可得到回波中距离分布；在慢时间维，目标运动会在相邻 PRI 之间引入固定的相位差 $\exp(j2\pi f_d T_r)$ ，因此在同一距离门上，

慢时间序列为一频率为 f_d 的单频信号，对慢时间序列做离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transformation, DFT)后，可得到回波中的多普勒频率分布，实际运算中可用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)加快运算效率。DFT 表征了慢时间维相干累积的形式，不仅获得了回波的多普勒分布，而且会产生累积增益，提升信噪比。此外，DFT 后的结果也可通过增加加权滤波器的方法降低副瓣。

正交解调后得到的基带信号经快时间维脉冲压缩、慢时间维多普勒累积后，最终可得到这个 CPI 内回波的距离-多普勒二维分布。

3.4.2 仿真结果

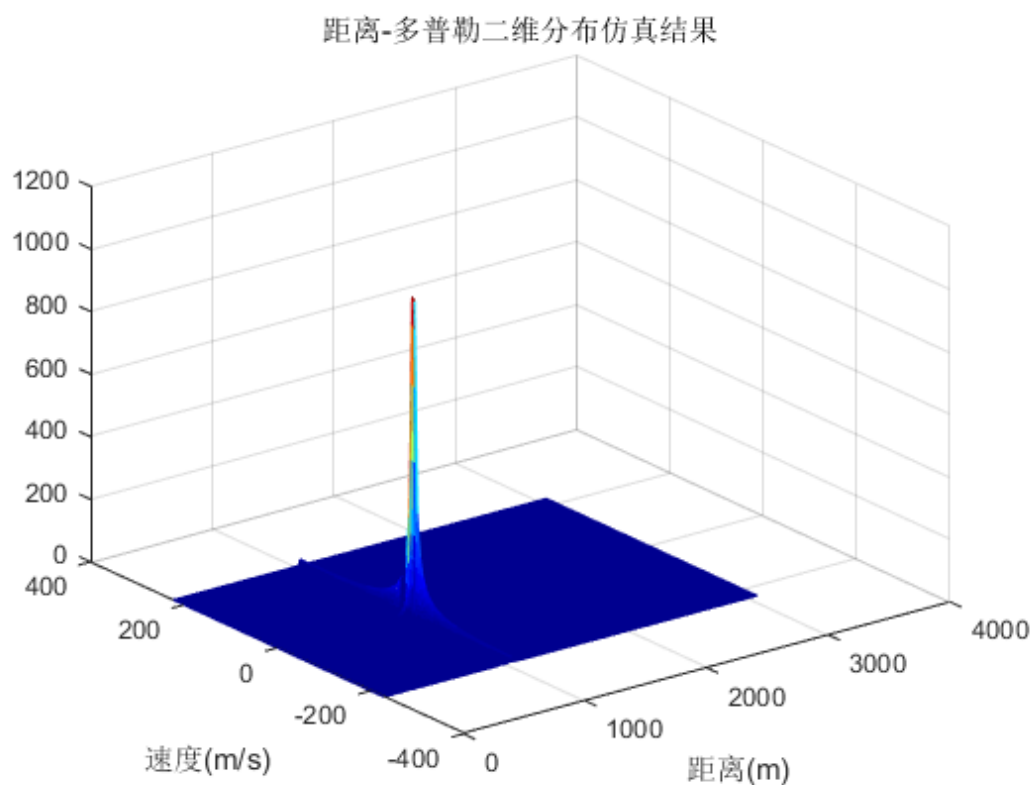


图 24 多普勒累积的仿真结果

3.5 恒虚警率检测

3.5.1 恒虚警率检测原理

在多普勒累积后得到距离速度二维数据，如果在杂波抑制的同时已做距离向恒虚警检测，则可以直接在多普勒维做恒虚警检测；否则，如果运算资源够，建

议做距离-速度域中的二维恒虚警检测。

恒虚警处理(Constant False Alarm Rate, CFAR)技术,是雷达目标自动检测过程中一个重要环节,其目的是要实现在背景噪声环境发生改变时,信号经过恒虚警处理后,使得虚警率保持恒定的一种检测技术,CFAR 处理的意义在于:提供了相对来说可以避免背景噪声、干扰和杂波变化影响的检测阈值,并且使自动检测在均匀背景中具有恒定的虚警率,这也就是恒虚警检测命名的由来。

恒虚警检测算法种类很多,例如:单元平均恒虚警(CA-CFAR)检测器,最大选择恒虚警(GO-CFAR)检测器,最小选择恒虚警(SO-CFAR)检测器,有序统计恒虚警(OS-CFAR)检测器,两侧单元平均选大恒虚警(GO-CFAR)检测器等。由于已做杂波抑制,可以采用距离域单元平均恒虚警检测器,多普勒域采用有序统计恒虚警检测器。单元平均恒虚警检测器的原理:将输入信号 x_i 送到由 $(2L+1)$ 个延迟单元构成的延迟线上,检测单元 D 的两侧各 L 个单元为参考单元。将所有参考单元中的 x 值求和后再除以 $2L$ 就可以得到被检测单元处杂波背景的均值估计 $\hat{\mu}$ 。检测门限 $U_0 = K\hat{\mu}$,当调整门限乘子 K 的大小时,可以改变门限 U_0 的大小,从而控制了虚警率的大小。原理图如下:

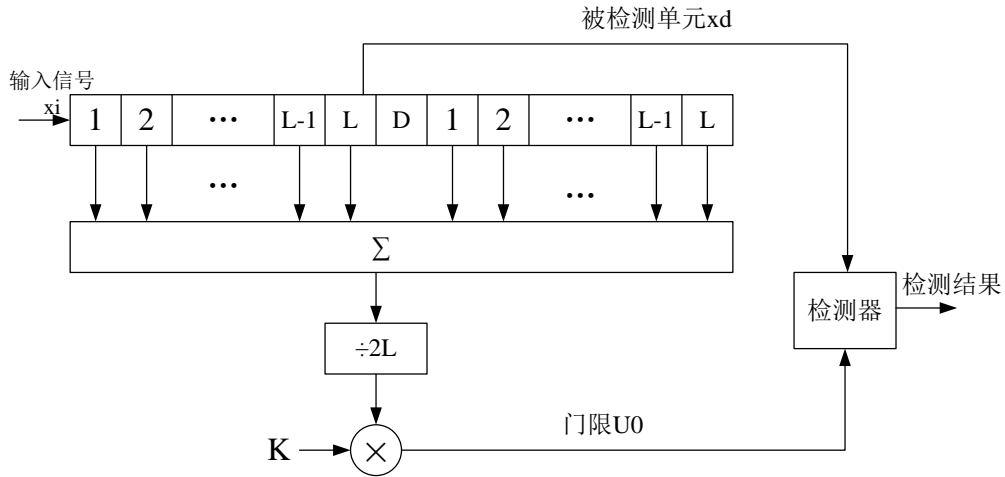


图 25 单元平均恒虚警检测器

如图 25 所示, $2L$ 个参考单元构成了计算均值估计 $\hat{\mu}$ 用的数据窗,在每次雷达发射脉冲后,接收的所有回波数据将从这个数据窗依次滑过,由于参考单元数目有限,均值估计 $\hat{\mu}$ 会有一定起伏。参考单元数越少,均值估计 $\hat{\mu}$ 的起伏越大。为

了保持同样的虚警率，必须适当提高门限（调整 K 值）。但门限值的提高将降低发现概率，所以需要增加信噪比以保持指定的发现概率。此时为了达到指定的恒虚警要求就需要额外增加信噪比，即恒虚警损失。

恒虚警损失的计算步骤是根据参考单元的数目 M 和指定的恒虚警率 P_f ，求得发现概率与输入信噪比的关系，就可计算得到恒虚警损失。恒虚警损失以符号 L_{CFAR} 表示，其定义为

$$L_{CFAR} = \frac{R(N)}{R(\infty)} \Big|_{P_f, P_d} \quad (14)$$

式中， $R(N)$ 表示在一定 P_f 、 P_d 下，参考单元数目为 N 时所需的信噪比； $R(\infty)$ 表示在同样的 P_f 、 P_d ，参考单元 $N \rightarrow \infty$ 的情况，所需的信噪比。恒虚警损失不但与参考单元数有关，还与检测前的脉冲积累数 N 和目标起伏情况有关。

3.6 单脉冲比幅测角

3.6.1 单脉冲比幅测角的原理

单脉冲比幅测角处理包括 1 个和通道 Σ 和 2 个差通道（方位差 Δ_{az} 和俯仰差 Δ_{el} ），一般要求产生具有一个主瓣的和波束以及具有两个（或四个）主瓣的差波束。图 26 是一种典型的单脉冲天线方向图，四个波束 A 、 B 、 C 和 D 分别由四个馈源产生。和差波束形成方法示意图见图 27，和波束由 $A+B+C+D$ 产生；方位差波束由 $(A+B)-(C+D)$ 产生，俯仰差波束由 $(A+C)-(B+D)$ 产生，生成的和波束 $\Sigma(\theta)$ 及差波束 $\Delta(\theta)$ 的方向图示意图见图 28，其中， θ_0 为和波束中心，亦为等信号轴的位置； θ_1 和 θ_2 为子波束中心； θ_t 为目标与波束中心的偏移角。

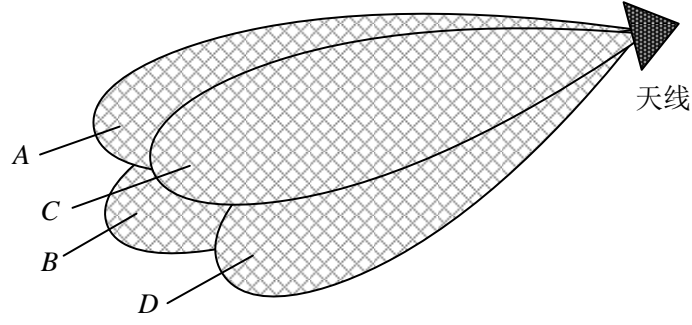


图 26 单脉冲天线方向图

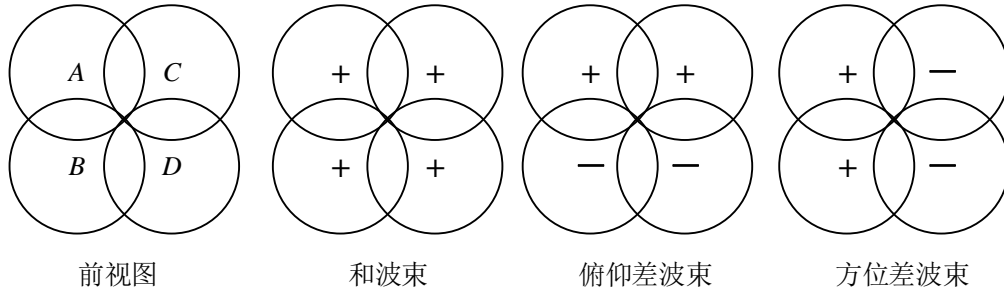


图 27 和差波束形成方法示意图

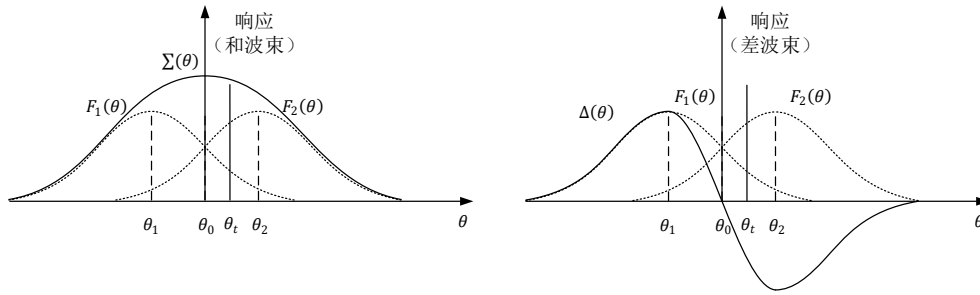


图 28 和波束和差波束方向图

以俯仰差信号为例演示误差信号如何计算。定义 $S_1 = A + C$ ， $S_2 = B + D$ ，则和通道的输出信号为 $\Sigma = S_1 + S_2$ ，俯仰差通道的输出信号为 $\Delta_{el} = S_1 - S_2$ 。误差信号 e 定义为：

$$e = \frac{\Delta_{el}}{\Sigma} = \frac{|\Delta_{el}|}{|\Sigma|} \cos(\xi) \quad (15)$$

式中， $||$ 表示向量取模运算； ξ 为以和信号为基准，差信号与和信号之间的相对相位差。若 $S_1 \geq S_2$ ，目标位于和波束中心（等信号轴）左侧，此时差信号与和信号的相位差为 0° ；若 $S_1 < S_2$ ，目标位于和波束中心（等信号轴）右侧，此时差信

号与和信号的相位差为 180° 。因此，通过计算差信号与和信号的幅度比 $|\Delta|/|\Sigma|$ 及相位差 ξ ，即可得到目标相对和波束中心的偏移角大小及方向。

3.6.2 仿真结果

仿真生成的俯仰差信号与和信号的比幅误差信号的相位分布和幅度分布见图 29(a)和(b)。其中，幅度分布的理论曲线在微波暗室中测得。可以看出，比幅误差信号的幅度分布于理论曲线基本吻合；相位分布主要聚敛在 0° 和 180° 附近，其中偏离波束中心左侧的集中分布在 0° 附近，偏离波束中心右侧的集中分布在 180° 附近。

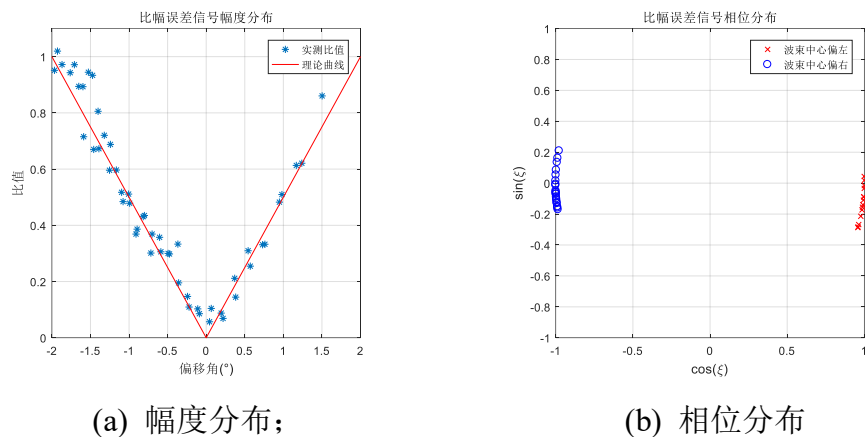


图 29 目标点迹比幅误差信号的幅度和相位分布

四、常见问题及解决方案

1. 上电后，需等待网口稳定（网口右数第二红灯稳定闪烁）几秒钟后，上位机方可发包；
2. 上位机连续发包后，若网口不亮绿灯（没有回包）：
 - 1) 先检查前后板连线是否有问题；
 - 2) 调低速度门限以及距离门限；
 - 3) 否则断电，重新进行 1 操作。
3. 全部板卡均经过多次测试，前后板 DA 均能稳定出正常波形，
 - 1) 若未出波形，检查 SMB 接口处是否接触不良或者 SMB 底座出现问题或者 SMB 连线断路；

- 2) 若出现波形很差，先看上位机 SNR 配置值是否太小，再检查风扇是否正常运行（温度影响 DA 时延）；
4. 全部板卡均经过多次测试，测角基本无误，
 - 1) 若出现差通道角度配 1，上位机显示超过 2，检查和通道 SMB 底座、SMB 接口以及 SMB 连线；
 - 2) 差通道配 1，上位机显示接近于 0，检查对应差通道 SMB 底座、SMB 接口以及 SMB 连线。

五、注意事项

- 1) 请勿让儿童玩耍设备及小配件，避免因误吞等行为产生危险。
- 2) 设备供电电压必须满足设备的输入电压要求。
- 3) 如因人为等因素导致电缆破损，使得内部电路裸露在外，切勿用手触摸裸露部分，否则可能引入安全风险。
- 4) 插拔设备线缆时，请保持双手干燥，并应先停止使用设备，断开电源。
- 5) 请严格按照要求安装设备，避免设备四周存在易燃物，并远离具有强磁场或强电场的电子设备。
- 6) 如有不正常现象出现，如设备冒烟、有异味等，请立刻停止使用并断开电源，拔出连接在设备上的所有线缆，如电源线、网线等，设备发生故障时请联系厂家汇报情况。
- 7) 请勿自行拆卸设备，设备发生故障时请联系厂家维修。
- 8) 未经授权，任何单位和个人不得对设备进行结构、安全和性能设计方面的改动。