

# 西安电子科技大学

## 创新训练项目 课程实验报告

实验名称 滑轨式合成孔径雷达成像

空间科学与技术 学院 2016029 班

姓名 学号

同作者

成绩

实验日期 2023 年 3 月 13 日至 2023 年 4 月 17 日

指导教师评语：

指导教师：杨涛  
年 月 日

### 实验报告内容基本要求及参考格式

- 一、实验目的
- 二、实验所用仪器（或实验环境）
- 三、实验基本原理及步骤（或方案设计及理论计算）
- 四、实验数据记录（或仿真及软件设计）
- 五、实验结果分析及回答问题（或测试环境及测试结果）

---

## 目录

一、实验目的 .....	1
二、器材与环境 .....	1
三、实验背景 .....	1
四、实验原理 .....	1
4.1 LFM CW 雷达理论基础 .....	1
4.1.1 线性调频信号 LFM .....	1
4.1.2 雷达工作过程 .....	2
4.1.3 Dechirp 处理 .....	3
4.1.4 脉冲压缩 .....	4
4.2 电机控制简介 .....	5
4.3 SAR 成像原理 .....	6
4.3.1 SAR 成像概述 .....	6
4.3.2 DBS 原理概述 .....	9
4.4 AWR2243+DCA1000EVM 简介 .....	10
五、实验内容和步骤 .....	11
5.1 雷达参数与计算 .....	11
5.2 电机运动参数与测试 .....	12
5.3 实验场景搭建与数据采集 .....	12
5.4 数据读取与成像 .....	13
5.5 成像结果与分析 .....	14
六、课程学习心得 .....	17
七、源代码 .....	18
Code1 : 雷达参数和数据读取 .....	18
Code2 : SAR 成像 .....	19
八、参考文献 .....	21

---

## 一、实验目的

1. 掌握合成孔径雷达成像（SAR）工作原理，实现多普勒波束锐化（DBS）。
2. 综合运用毫米波雷达模块、伺服电机控制，层析成像等知识设计实验系统。
3. 加深理解雷达系统设计流程，调试方案，软硬件协同设计思路；

## 二、器材与环境

1. 实验器材：德州仪器公司 AWR2243 毫米波 FMCW 雷达传感器、DCA1000EVM、AMC4030 三轴控制器、步进电机、滑轨、三角架、角反射器等；
2. 实验环境：mmWave Studio 03.00.00.14，MATLAB 2021a

## 三、实验背景

合成孔径雷达成像（Synthetic Aperture Radar，简称 SAR）技术是从上世纪 50 年代发展起来的一种新型微波成像技术，具有远距离、全天时、全天候等优点，弥补了传统光学遥感图像必须在白天且无云层遮挡的条件下获取的不足。在军事和民用领域均具有广阔的应用前景和意义。本次实验，我们将基于 DBS 算法对 G 楼前方花坛进行条带式 SAR 成像。

## 四、实验原理

### 4.1 LFM CW 雷达理论基础

线性调频连续波（Linear Frequency Modulated Continues Wave，LFMCW）雷达具有较大的时宽带宽积，能够同时具有较高的距离分辨率和接收信号信噪比。且平均发射功率较低，常用于目标近距离测量。

#### 4.1.1 线性调频信号 LFM

线性调频信号（Linear Frequency Modulation, LFM）是一种常用的雷达信号，其频率随时间连续线性变化。其时域表达式如下：

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j2\pi(f_0 t + K t^2 / 2)} \quad (1)$$

其中， $\tau$  为脉冲宽度， $f_0$  为初始载频， $K = \frac{B}{\tau}$  是线性调频信号的调频斜率，

$B$  为信号带宽。

其瞬时相位为

$$\varphi(t) = 2\pi(f_0 t + Kt^2/2) \quad (2)$$

瞬时频率为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t) = f_0 + Kt \quad (3)$$

从公式(3)可以看出， $s(t)$  的频率是关于时间的一次函数，随时间线性变化，与线性调频概念相应证。

当  $B = 20\text{MHz}$ ， $\tau = 10\mu\text{s}$  时，线性调频信号的波形和频谱如图 1 所示。

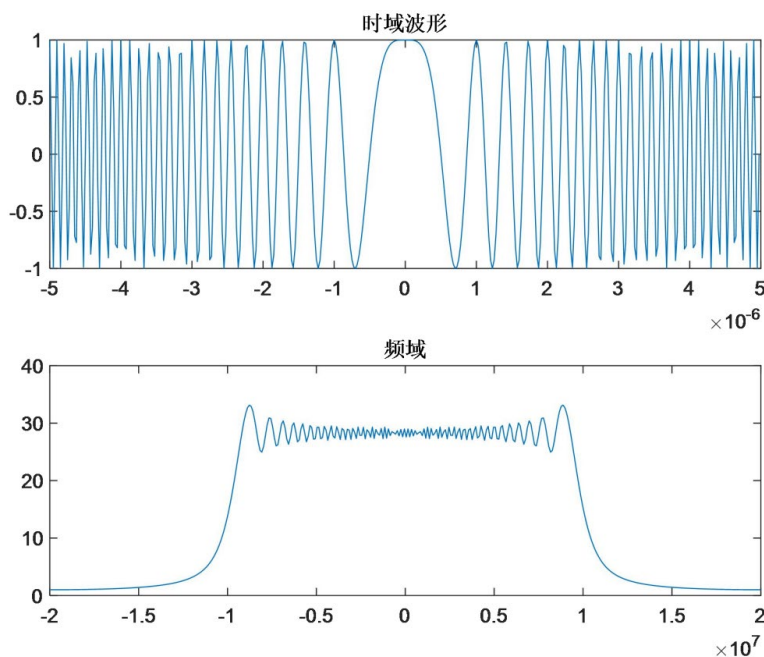


图 1 线性调频信号波形与频谱图

#### 4.1.2 雷达工作过程

LFMCW 雷达系统的工作过程如下：

发射：雷达根据设置的参数，产生线性调频信号，通过发射天线发射出去。

接收：雷达在接收到回波信号后，将其放大并与雷达发射信号进行混频，得到包含目标距离、速度信息的中频差拍信号。其次，用低通滤波器滤除差拍信号的高频分量和噪声。接着，通过 A/D 转换器对信号进行采样，采样后得到的数字信号即为接收数据。其工作流程图如图 2 所示。

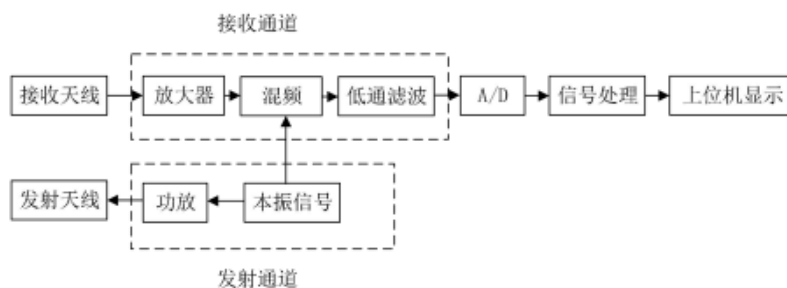


图 2 LFMCW 雷达系统工作流程图

### 4.1.3 Dechirp 处理

4.1.2 中提及的雷达接收过程中，最重要的是 Dechirp 处理过程。由于线性调频信号的带宽非常大，通常采用 Dechirp（去调频）处理以降低输入信号的带宽，来减轻 A/D 转换器的压力。其原理框图如图 3 所示：

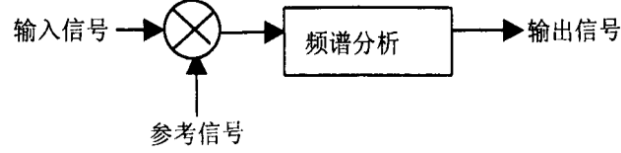


图 3 Dechirp 原理框图

Dechirp 处理的数学表达如下：

设雷达发射的线性调频信号为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j2\pi(f_0 t + Kt^2/2)} \quad (4)$$

其中， $\tau$  为发射的脉冲宽度， $f_0$  为发射信号的初始载频， $K$  为调频斜率。

则距离为  $R_0$  处的目标回波信号可表示为

$$s_r(t) = \text{rect}\left(\frac{t - t_0}{\tau}\right) e^{j2\pi[f_0(t - t_0) + K(t - t_0)^2/2]} \quad (5)$$

$$t_0 = \frac{2R_0}{c} \quad (6)$$

用于 Dechirp 处理的参考信号为

$$s_{ref}(t) = e^{j2\pi[f_0(t - \Delta t) + K(t - \Delta t)^2/2]} \quad (7)$$

$$\Delta t = t_0 + \delta = \frac{2R_{ref}}{c} \quad (8)$$

其中  $R_{ref}$  表示参考信号对应的距离， $\delta = \frac{2(R_{ref} - R_0)}{c}$  表示参考信号相对于

距离  $R_0$  处回波信号的延迟时间。

由式(5)(6)(7)(8)，解调后的回波信号可表示为

$$s_{IF}(t) = s_r(t) s_{ref}^*(t) = \text{rect}(t - t_0) e^{j(2\pi K\delta t + \phi_0)} \quad (9)$$

其中  $\phi_0 = 2\pi f_0 \delta - 2\pi K t_0 \delta - \pi K \delta^2$  为常数相位项。不难看出，式(9)所表达的

的信号是一等频信号，其频率  $f = K\delta$ 。经过频谱分析，在频率  $f = K\delta$  处将出现信号频谱的峰值。

#### 4.1.4 脉冲压缩

脉冲压缩的理论基础是匹配滤波。对雷达接收的回波信号进行脉冲压缩后有两个好处：增加信噪比、压缩信号宽度。匹配滤波是一种最优滤波器，只要输入的是某一确知信号，并加上白噪声，那么就能让输出的信噪比达到最大。将回波信号记为  $f(t)$ ，设滤波器的传输函数  $H(w)$ ，则为了满足最大输出信噪比， $H(w)$  的表达式为：

$$H(w) = KF^* e^{-j\omega t_0} \quad (10)$$

从时域角度看，匹配滤波器也可以用冲激函数  $h(t)$  来表示，则上式描述的滤波器冲击响应为：

$$h(t) = Kf^*(t_0 - t) \quad (11)$$

脉冲压缩要在雷达后端接收机由数字信号处理器件完成，而在这个过程中，由于器件速度的限制，脉冲压缩的过程通常需要在零中频进行。此时，线性调频信号的表达式变为：

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j\pi K t^2} \quad (12)$$

少了初始载频  $f_0$ ，从  $h(t)$  的表达式可以看出，如果不考虑器件延时  $t_0$  和增益常数  $K$ ，匹配滤波器的冲击响应是滤波器输入信号  $f(t)$  的共轭倒置，即：

$$h(t) = f^*(-t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j\pi K t^2} \quad (13)$$

滤波器输出可以由  $h(t)$  和  $f(t)$  卷积得到，也可以由他们的傅里叶变换乘积再经过傅里叶反变换得到。在实际应用中，通过卷积直接做脉冲压缩的运算量很大，因此更多是从频域角度来实现匹配滤波。频率脉冲压缩过程如图 4 所示。

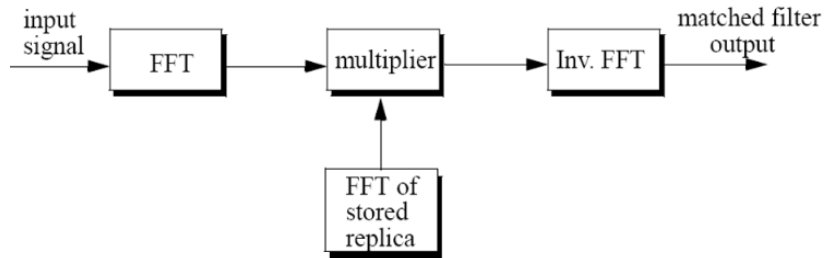


图 4 频域脉冲压缩流程图

线性调频信号经过脉冲压缩后结果如图 5 所示：

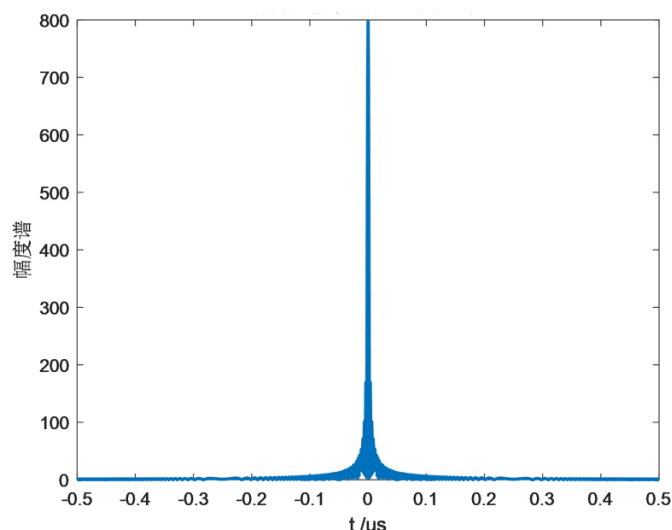


图 5 线性调频信号脉冲压缩后的频谱

通过以上的分析，我们在发射端采用脉冲宽度 $\tau$ 较大的线性调频信号来保证回波信号具有足够高的功率，并且在接收端通过匹配滤波器将回波信号的时宽显著压缩，保持了足够高的距离分辨率，这也就是脉冲压缩这个名字的由来。

## 4.2 电机控制简介

本次实验我们采用滑轨+步进电机构成的运动平台。其中，步进电机由控制器 AMC4030 和驱动器控制。具体电机控制框图如图 6 所示。

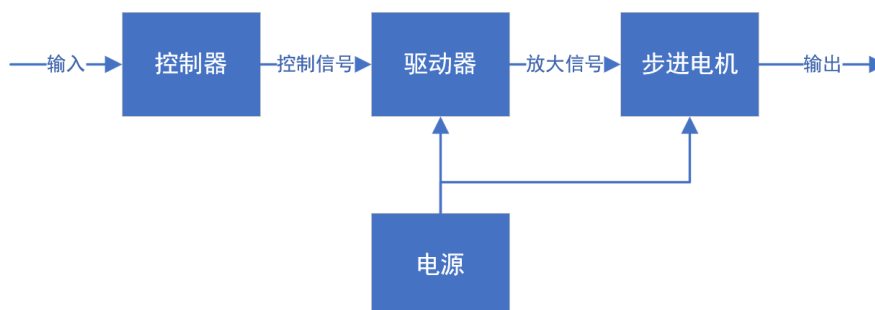


图 6 电机控制框图

控制器连接到电脑端，当接收到电脑端的输入信号后，产生脉冲信号输入到驱动器。驱动器放大该信号，并输入到步进电机，使步进电机在滑轨上按预定参数运行。这种控制方式可以控制步进电机运行的距离与速度。

下面，我们主要介绍 AMC4030 控制器。其主要参数如下：

1. 供电：DC18~26V
2. 3 路脉冲输出，共阳接线（源型）
3. 4 路自定义开关量输入，默认高电平 24V
4. 4 路自定义开关量输出，默认高电平 24V（接负极，因电流仅 0.1mA）
5. 通过逻辑编程可实现基础功能：按一定顺序排列的点位运动，自动往复运动，延时停顿功能，三轴联合直线运动，三轴顺序运动等功能；无圆弧插补。其控制接线图和实物图如图 7、图 8 所示。

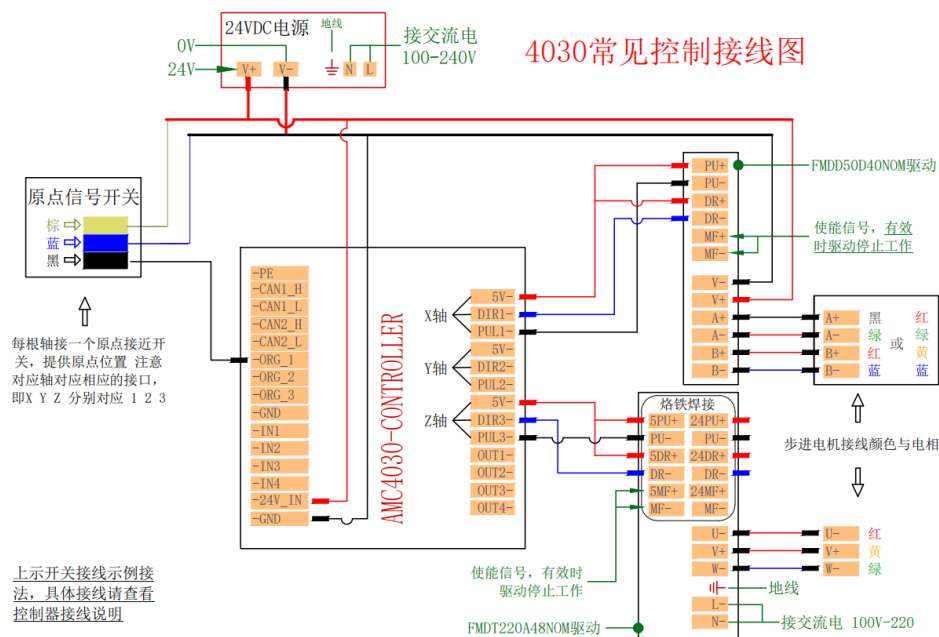


图 7 AMC4030 控制接线图

### 外形及接口图

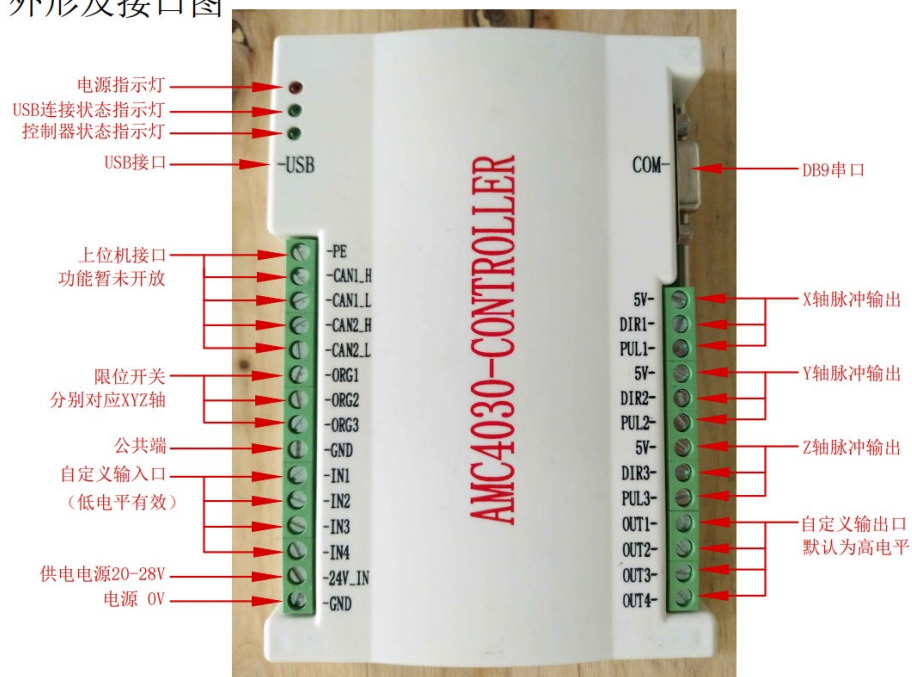


图 8 AMC4030 外形及接口实物图

### 4.3 SAR 成像原理

### 4.3.1 SAR 成像概述

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种利用二维匹配滤波获得高分辨率图像的成像雷达, 具有全天时, 全天候对地观测的优点。

合成孔径的概念可以通过天线阵列波束形成原理来理解。传统天线阵列每



---

个阵元都是一个小尺寸天线，若干个阵元在空间中按照一定规律排列，就形成了一个尺寸的天线，并且阵列形成的波束宽度与阵列总长度成反比。合成孔径就是通过单个天线的移动，在空间中形成一个等效的天线阵列，用时间换空间的方式合成一个大孔径的虚拟天线。合成孔径后的虚拟天线波束宽度与有效合成孔径长度成反比。

### （一）分类

SAR 按照波束照射方式可分为：条带式、聚束式、滑动聚束式和扫描式。本次实验我们采用条带式。不同的方式可以简述为：

条带式 SAR：波束与运动平台相对不变，波束以平台运动速度照射成像区域。聚束式 SAR：平台飞行过程中通过控制雷达波束照射成像场景同一位置，实现场景凝视成像。滑动聚束式 SAR：介于条带和聚束 SAR 中间的一种成像模式，地面波束与运动平台速度不同，并实现一定程度的凝视效果。扫描式 SAR：通过控制波束速度（一般比平台速度大），实现场景不同区域的快速成像。

### （二）模型简化

由于 SAR 成像是对一个区域的散射特性进行成像，这个区域的地形一般比较复杂，区域内不同位置处的物体散射特性各不相同，最后 SAR 接收的是探测区域内所有物体的散射信号的叠加。整个探测区域散射的回波信号模型非常复杂，直接构造整个探测区域的散射信号模型十分困难。为了简化信号模型，信号模型的建立运用了两个离散化：探测区域的离散化；平台飞行的离散化。

探测区域离散化：将探测区域认为是若干散射点的集合，由此对区域回波信号模型的建立转化为对这些散射点回波信号模型的建立。这样只需构建任意散射点的回波信号模型即可表示整个探测区域的回波信号模型。该离散化的准则是：离散间隔内的物体散射特性基本不变。

平台飞行离散化：将平台的飞行过程认为是一个“走停”模式，即在一个脉冲时间（脉冲重复周期）内，平台是“停”（静止）的状态，平台发射一个脉冲信号，并在该位置处接收该脉冲照射目标的回波信号；在下一个脉冲时间内，平台“走”（瞬移）到另一个位置（按照原来匀速运动应该走到的位置处），并在下一个位置重复上一个脉冲时间内平台的操作。该离散化的准则是：电磁波传播速度远大于平台速度，即 SAR 一次发射、接收过程中，雷达的位置基本不变。

SAR 成像示意图和信号发射与接收波形如图 9、图 10 所示。

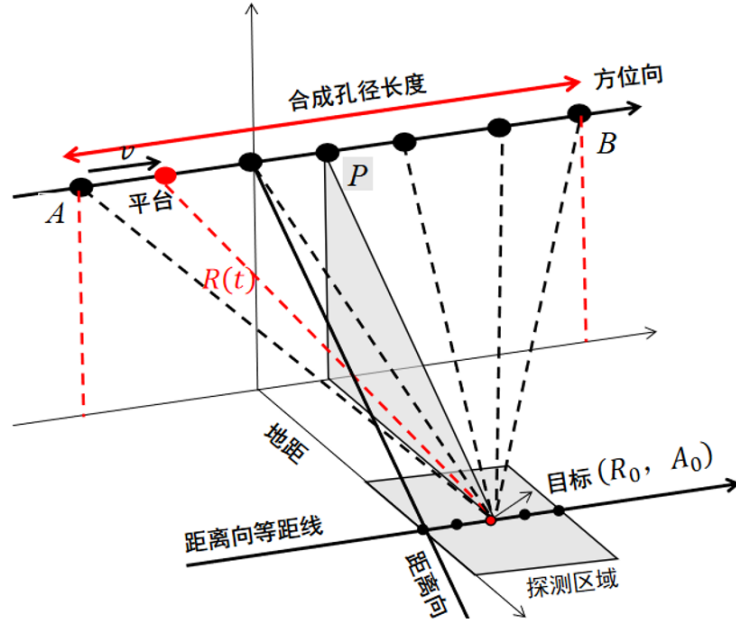


图 9 SAR 成像示意图

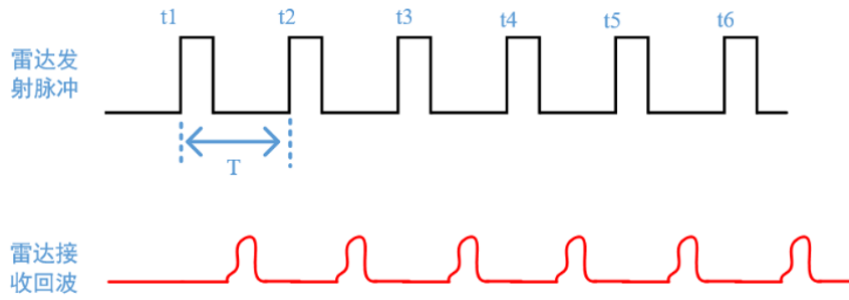


图 10 信号发射及接受波形

### (三) 距离向和方位向

SAR 成像不同于传统的光学 CCD 成像，一次性形成二维图像。SAR 成像的二维是分开的，分为距离向和方位向。一般认为，距离向为雷达的视线方向，方位向为雷达的前进方向，如图 9 所示。因此 SAR 成像主要包含两个步骤：距离向聚焦与方位向聚焦。

有很多方法可以进行聚焦成像，我们采用了 DBS 算法，这将在 4.3.2 中详细介绍。

### (四) 分辨率

SAR 的成像分辨率表示的是能够区分两个相邻目标的能力。其距离向分辨能力与探测雷达一致，本质上都是对发射信号进行匹配滤波获得的。

因此距离向分辨率表示为：

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (14)$$

其中  $c$  表示光速， $B$  为发射的线性调频信号带宽。

SAR 的方位向分辨率与目标距离和波长无关，仅由天线方位向几何尺寸决

定。理论上，方位向分辨率可达

$$\rho_a = \frac{\lambda R}{2L} = \frac{D}{2} \quad (15)$$

其中  $D$  表示天线长度。减小  $D$  可以提高方位向分辨率，但将使天线增益下降，从而降低雷达探测距离。

#### 4.3.2 DBS 原理概述

多普勒波束锐化 (Doppler beam sharpening, DBS) 是 SAR 的最初形式，由 Carl Wiley 于 1951 年首先提出。DBS 在所有的距离上应用同样的合成孔径时间，是最简单的非聚焦 SAR 算法，仅仅适用于相对粗糙的分辨率要求。然而，相对于实波的横向分辨能力则有了实质性的提高，并且运算复杂度相对较低。

DBS 技术在快时间域由传统的脉冲压缩技术完成距离压缩，这可以使用距离向 FFT 实现。忽略旁瓣效应，在雷达位置坐标为  $u$  时发射的脉冲，经过匹配滤波后，在快时间域的输出可以近似表示为  $A \exp(j\phi) \delta_D(t - 2R(u)/c)$ ，其中  $\delta_D(t - 2R(u)/c)$  为连续时间单位脉冲函数，电波的双程相位  $\phi$  为  $-(4\pi/\lambda)R(u)$ ，常数  $A$  为总幅度因子。因此，可得慢时间域的相位历程近似为

$$\phi(u) \approx -\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)\left(R - u \frac{x}{R} + \frac{x^2}{2R}\right) \quad (16)$$

瞬时横向波数  $K_u$  为

$$K_u = \frac{d\phi(u)}{du} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{x}{R} \text{ rad/m} \quad (17)$$

则

$$x = \frac{\lambda R}{4\pi} K_u \quad (18)$$

上式将散射点横向位置同波数联系在一起。此外，横向位置  $x$  也可以使用时域的多普勒频率表示。将  $u = vt$  代入式(16)，若散射点位于坐标  $(x, R)$  处，则其时域的多普勒频率  $F_D = (1/2\pi)(d\phi/dt)$ ，有

$$x = \frac{\lambda R}{2v} F_D \quad (19)$$

上式将散射点横向位置同多普勒频率联系在一起，更接近于 DBS 这个名字。

#### 4.4 AWR2243+DCA1000EVM 简介

AWR2243 是德州仪器公司（TI）研发的一款毫米波雷达，是一款能够在 76GHz 至 81GHz 频带内运行的集成式单芯片 FMCW 收发器。其具有 3 个发送天线，4 个接收天线，最大采样率（ADC sampling rate）可达到 450Msps。

DCA1000EVM 是数据采集板，是一款适用于雷达感应应用的实时数据捕捉适配器评估模块。配合 AWR2243 雷达使用，可完成信号发送、接收、数据处理与保存等一系列工作。

雷达各参数含义及其关系如图 11 所示。其中黑色字体部分都是需要设置的参数，具体参数设置将在 5.1 节中详细介绍。

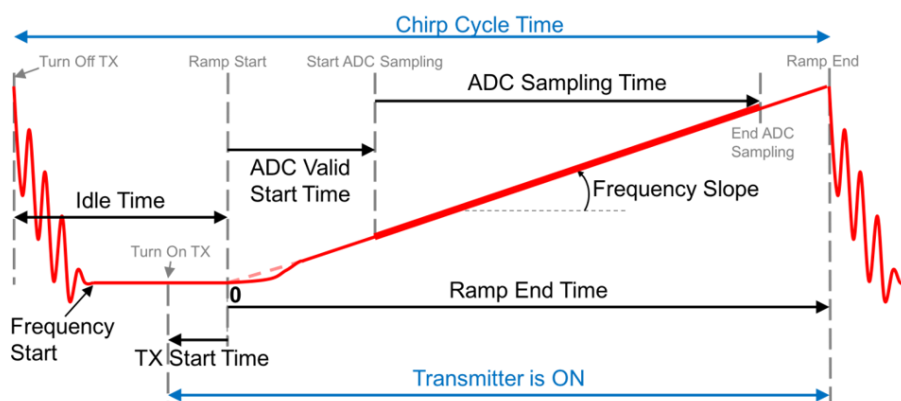


图 11：雷达参数图

雷达发送线性调频连续波（LFMCW），并且在接收端对接收数据进行 Dechirp，最后将数据保存为 bin 文件。数据存储格式如图 12 所示：

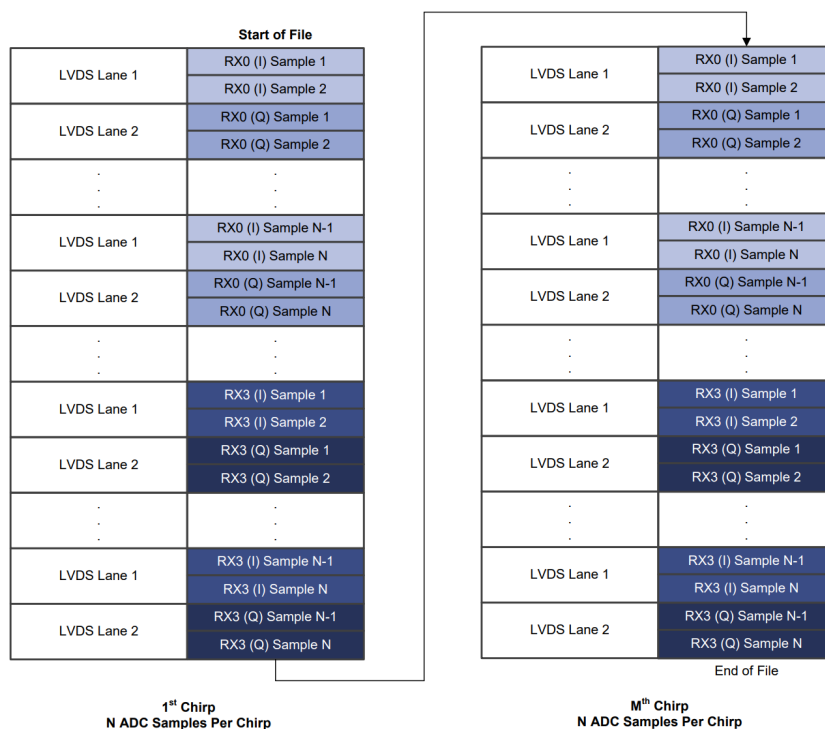


图 12 AWR2243 Complex Data Format Using DCA1000

了解上述存储格式后，SAR 成像的第一步就是进行数据预处理，把按上述格式存储的数据转化为距离-方位数据矩阵。这一步，将在 5.4 中介绍。

## 五、实验内容和步骤

### 5.1 雷达参数与计算

考虑到实验场景与条件，我们选取了以下这组参数来进行实验。

The figure displays two screenshots from the mmWave Studio software interface. The left screenshot shows the 'Sensor Configuration' window with the following parameters: Profile Id (0), Start Freq (GHz) (77.000000), Frequency Slope (MHz/us) (7.532), Idle Time (us) (180.00), TX Start Time (us) (2.00), ADC Start Time (us) (5.00), ADC Samples (1024), Sample Rate (ksps) (5120), Ramp End Time (us) (220.00), RX Gain (dB) (30), RF Gain Target (30dB), VCO Select (VCO1), and Calib LUT Update (RetainTxCalLUT, RetainRxCalLUT). The right screenshot shows the 'Frame' configuration window with parameters: Start Chirp TX (0), End Chirp TX (0), No of Frames (16384), Dummy Chirps(End) (0), Trigger Select (SoftwareTrigger), No of Chirp Loops (1), Periodicity (ms) (1.000000), Trigger Delay (us) (0.00), Active-Ramp Duty Cycle (21.8%), and Duty Cycle (40%).

图 13 mmWave Studio 雷达参数选取

结合图 11 所示的各参数含义与关系，我们可以对选取的参数做以下计算：有效带宽为

$$B = \text{FrequencySlope} \cdot \frac{\text{ADCSamples}}{\text{SampleRate}} = 1.5064 \text{ GHz} \quad (20)$$

距离向分辨率计算公式已在式(14)给出，大小为

$$\Delta R = \frac{c}{2B} = 0.0996 \text{ m} \quad (21)$$

方位向分辨率计算公式已在式(15)给出，大小为

$$\rho_a = \frac{\lambda R}{2L} = 0.011 \text{ m} \quad (22)$$

最大探测距离为

$$d_{max} = \text{ADCSamples} \cdot \Delta R = 101.9904 \text{ m} \quad (23)$$

采样总时间为

$$T = \text{Periodicity} \cdot \text{No of Frames} = 16.384 \text{ s} \quad (24)$$

结合图 12 的数据存储格式，采样数据存储文件大小为

$$E = 1024 \cdot 1 \cdot 16384 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 16 / 8 = 256 \text{ MB} \quad (25)$$

通过计算，在这组参数下，雷达具有较高的分辨率；雷达距成像中心实际

约为 47m，在最大探测距离以内，并具有一定的余量；采样总时间 16.384s 略小于滑轨运行时间 18s；文件大小合适，不会因为过大导致 MATLAB 处理缓慢。总的来说，这组参数能很好地匹配实际，满足实验需要。

## 5.2 电机运动参数与测试

运动平台的组成与控制原理已在 4.2 中详细介绍。我们首先学习了 AMC4030 的软件手册，熟悉了控制软件，并对电机的运动效果进行了调试。我们发现控制软件界面的参数单位与实际运行参数单位不匹配，即如图 14 所示，这组参数对应的实际步进长度为 9m，速度为 0.5m/s。

下面我们计算电机实际运行参数。由于我们搭建的滑轨实际长度为 9m，已设定的雷达探测时间为 16.384s，故我们设置电机运行时间为 18s，设置电机运行速度为 0.5m/s，如图 14 所示。



图 14 AMC4030 的操作界面与电机运动参数设置

## 5.3 实验场景搭建与数据采集

本次实验，我们在 G 楼楼顶搭建了运动平台，模拟日常科研生活中，卫星、飞机从高空对地成像。再将三脚架安装在运动平台上，并将雷达安装在三脚架前端，对地呈 45° 角，正对 G 楼前方花坛。

### ● 运动平台的搭建

我们用滑轨搭建了雷达的运动支架，同时添加配重尽可能保证雷达能够稳定探测。用 AMC4030 电机控制，保证了运动平台稳定运行以及雷达等间隔采样。通过电线细分以及固定，使用安全绳以及多种措施，确保实验能够安全、稳定进行。

### ● 雷达安装

在搭建好运动平台后，我们将三脚架安装在运动平台上，并将雷达安装在三脚架前端，调整雷达俯仰角约 45°。搭建好的平台如图 16 所示。

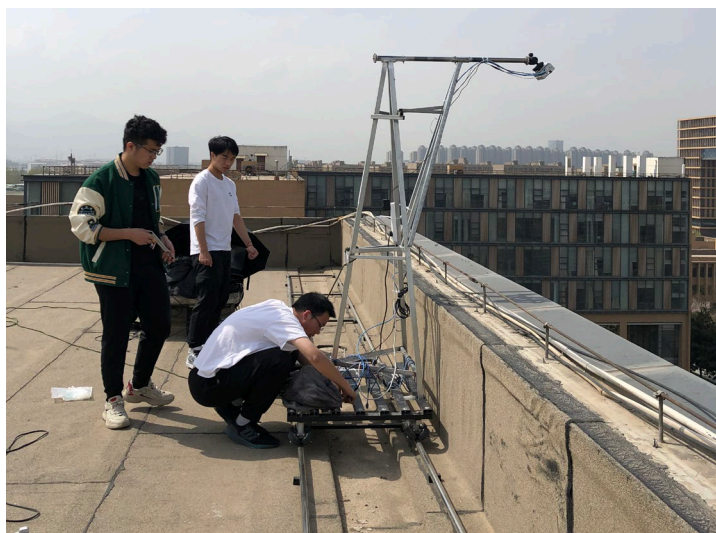


图 15 搭建平台过程

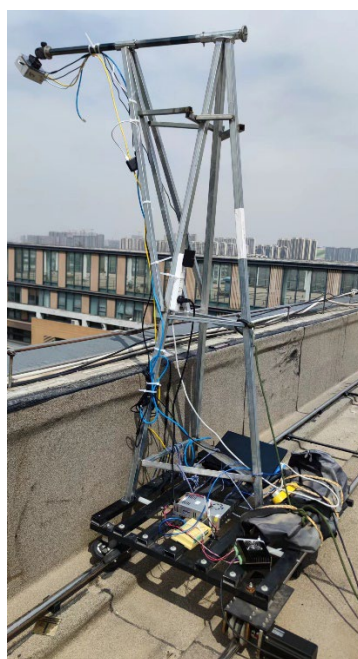


图 16 搭建好的探测平台

搭建好探测平台后，我们设定雷达参数，开始采集数据。通过改变角反位置和排列情况，测得多组数据。

## 5.4 数据读取与成像

根据图 12 可知，采样点为 1024，16384 帧的 4 通道 I/Q 两路信号的数据排列方式。我们使用 MATLAB 读取 .bin 格式的采集数据文件，并通过数据处理，转换成  $1024$  径向  $\times 16384$  方位向的 .mat 数据文件以供之后处理。代码详见 Code1：雷达参数和数据读取。

根据 4.3.2 可知，DBS 成像是一种非聚焦成像算法，通过对获取的数据进行距离向和方位向的脉冲压缩，即可得到成像结果。

在实际处理中，基于特定的实验环境，我们的 DBS 处理过程可以简化为距



离向 FFT 与方位向匹配滤波。距离向 FFT 即可完成距离向的脉冲压缩，方位向匹配滤波即可完成方位向脉冲压缩。处理流程如图 17 所示。

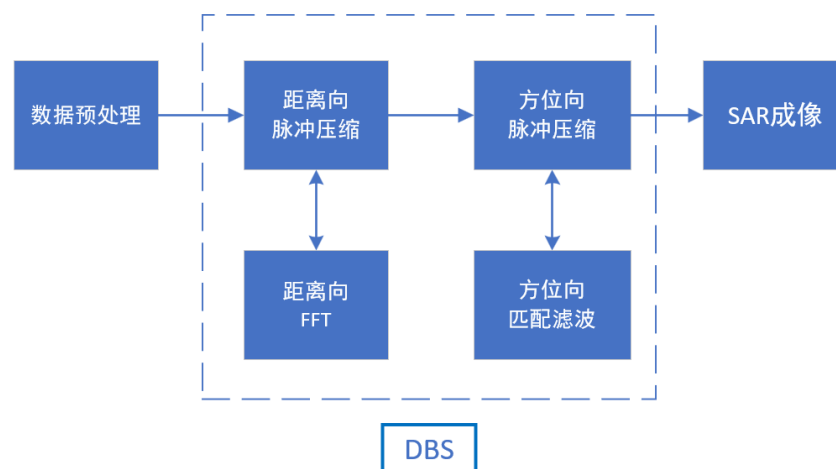


图 17 DBS 处理流程图

成像代码详见 Code2 : SAR 成像。

## 5.5 成像结果与分析

根据 5.4 的处理，我们得到图 18 和图 19，分别为距离向 FFT 之后的图像，和方位向 FFT 之后的最终成像。图 18 显示为近似沿方位向平行的细线组成的图像，说明第一次径向 FFT 已经将距离信息反应出来，接下来就需要对方位向进行聚焦。

方位向脉冲压缩后得到的结果与实际场景如图 19 所示。从图像来看，成像并不清晰。图中有高亮的两条线，分别对应 2 个角反。对比实际场景的呈三角形状的 3 个角反，考虑到运动平台是从右向左运动，我们可以推测，与两条高亮线平行，在其下方的那条明显但强度不高的短线，也为 1 个角反。我们猜测可能是由于该角反摆放位置过于靠近 G 楼，离雷达成像中心较远，位于雷达方向图函数较小的地方，本身打到此的能量较弱，故反射能量也弱，成像较暗。

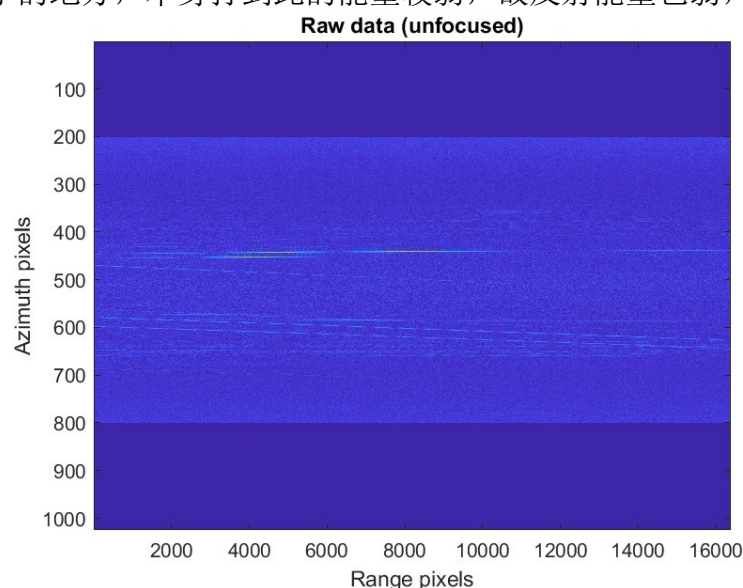


图 18 毫米波雷达距离向匹配滤波结果



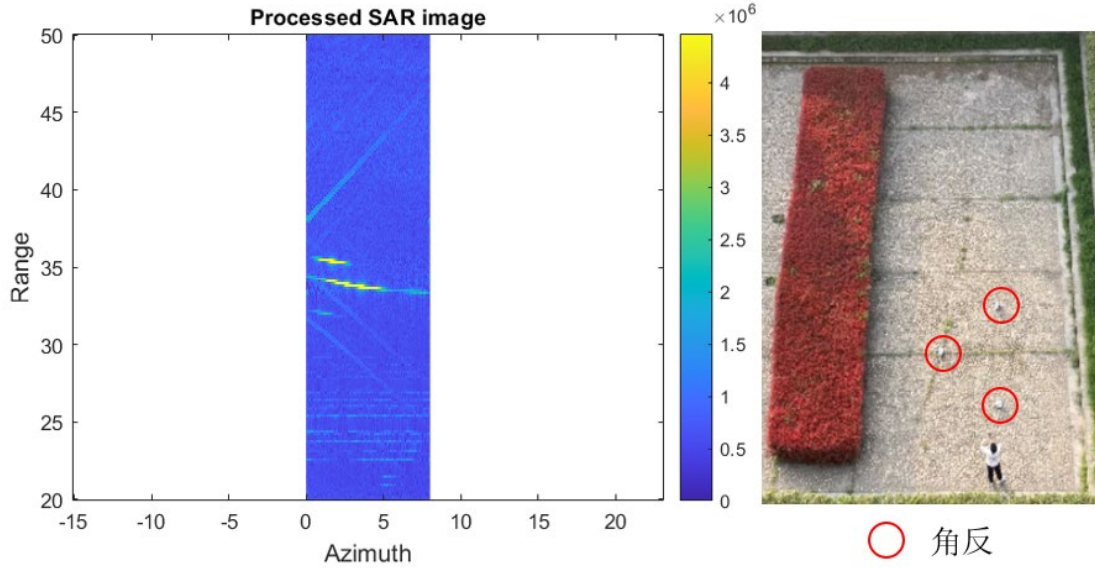


图 19 毫米波雷达成像结果

从图 19 中还能看出来，成像并不清晰，完全没有展现细节。且本该是 3 个高亮点的角反位置变成了高亮的线。我们推测这些问题可能是由于毫米波雷达分辨率较高，对雷达支架的抖动非常敏感造成的。我们可以通过粗略计算来验证一下我们的猜测。

根据 4.3.1 中的式 15， $\rho_a = \frac{\lambda R}{2L}$ 。其中， $\lambda$  为波长，不妨取频率  $f = 77\text{GHz}$ ，

则波长  $\lambda = \frac{c}{f} = 3.9\text{mm}$ ； $R = 47\text{m}$  为雷达到成像中心的距离； $L = 9\text{m}$  为合成孔径长度。代入公式，毫米波雷达 AWR2243 的方位向分辨率约为  $\rho_a = 0.0102\text{m} = 1.02\text{cm}$ 。其分辨率较高，为厘米量级，故对支架稳定性要求极高。而由于我们采用的支架稳定性较差，不可避免地存在厘米量级的抖动，故造成了最终成像结果较差。

为了解决这一问题，我们将毫米波雷达更换为了 X 波段雷达，重新进行实验。不妨取 X 波频率为  $f = 8\text{GHz}$ ，波长为  $\lambda = \frac{c}{f} = 37.5\text{mm}$ 。代入公式，其

方位向分辨率约为  $\rho_a = 0.0979\text{m} = 9.79\text{cm}$ ，分辨率近似为分米量级，约为毫米波雷达 AWR2243 的 10 倍。故其一定程度上能够对抗支架的微小抖动，对支架稳定性要求没有毫米波雷达那么高。支架厘米量级的小抖动对其最终成像产生的影响不大。

为了验证我们的猜测，我们对 X 波段雷达采集的数据进行了处理，得到的结果如图 20 和图 21 所示。我们发现，图 20 所对应的距离向匹配滤波结果，亮线明显增多。图 21 对应的成像结果有了明显的提升，细节信息明显增多，已经可以显示出地表轮廓和草丛等信息了。

我们还可以看出，图 21 的角反位置为 3 个与实际场景相匹配的点，而不是

图 19 中的带状高亮线。我们认为这也说明了，毫米波雷达成像的带状高亮线是由于平台抖动造成的。而更换了 X 波段雷达后，由于其对平台稳定性要求较低，有一定抗抖动能力，故成像的角反位置较为清晰。

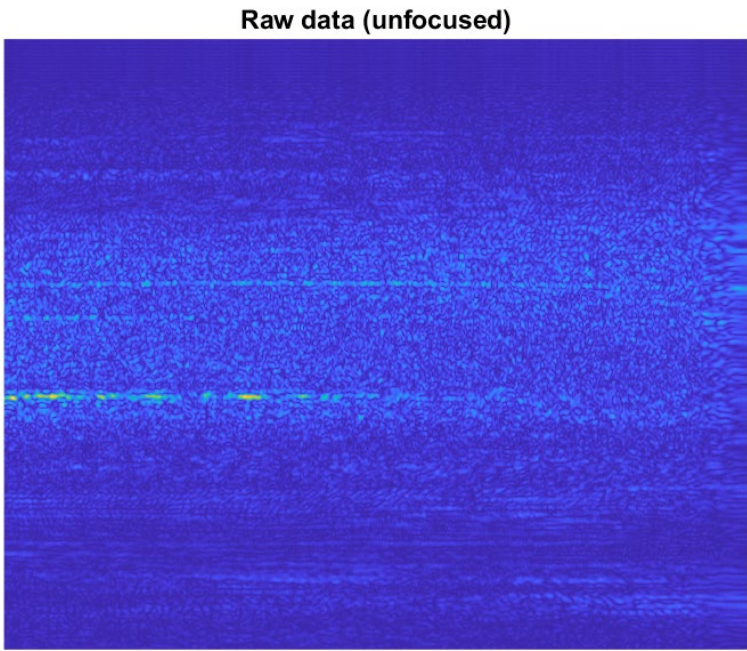


图 20 X 波段雷达距离向匹配滤波结果

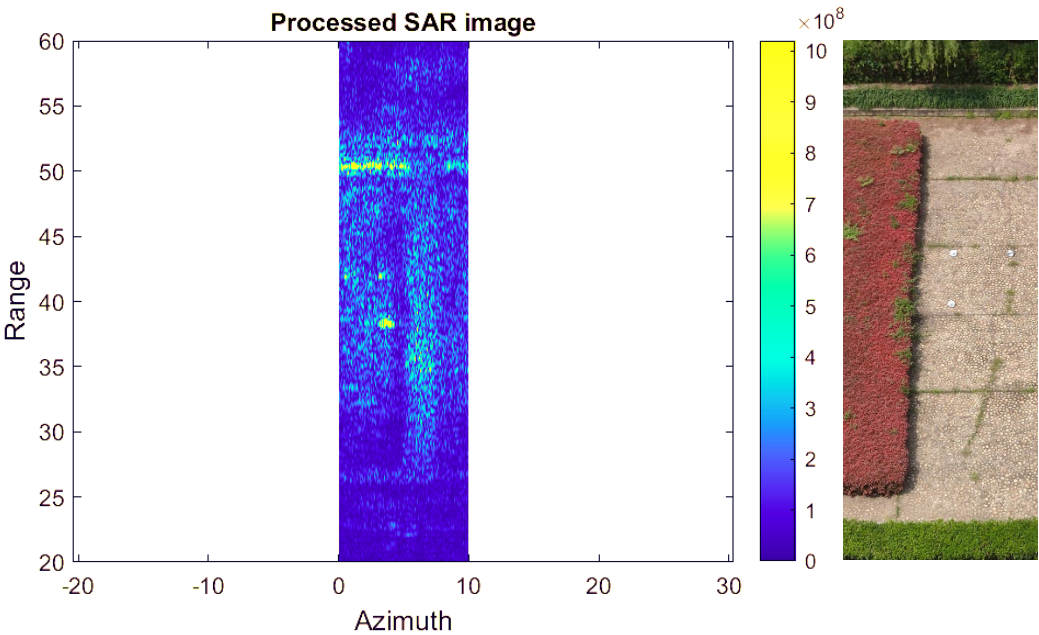


图 21 X 波段雷达成像结果

通过上述分析，可见本次实验总体结果较好。但也有许多地方亟待改进，比如雷达平台的稳定性，成像算法的准确性等。

---

## 六、课程学习心得

本次实验让我们收获颇丰。

说实话，我们认为这个合成孔径雷达成像实验的难度极大。具体来说，我们认为最难的是雷达的原理与各种成像理论，而非实际操作和处理。

还记得第一个礼拜刚开始这次实验的时候，我们心里有激动也有一筹莫展的迷茫。因为雷达领域涉及太多知识了，我们是第一次接触雷达，这方面知识几乎空白。秉着“做实验就要认真做，对于涉及的原理不能一知半解”的想法，我们开始尝试查阅大量网站、文献和书籍。原理太多了，我们花了一周时间学习了 TI 毫米波雷达各参数的含义和计算，又花了一周时间学习了线性调频连续波、多普勒频移、SAR 成像、匹配滤波、脉冲压缩等的基本概念和关系。或许是由于 DBS 是一种较老的成像算法，网上对 DBS 基本原理的介绍少之又少，我们不得不从 Richards 的《雷达信号处理基础》这本书里阅读 DBS 原理和其前序知识。整个学习过程是痛苦的，不过幸好有杨老师的指导和师兄们的帮助。杨老师用简洁有力的原理讲述和公式推导，常常让我们拨开云雾见天日，让我们收获良多。

对于实际操作部分，我们完成了从数据采集到数据处理的全过程，通过平台搭建、雷达与电机控制、参数计算进行了数据采集，通过学习雷达原理和成像方法进行数据处理与成像。在整个过程中，我们真的学到了很多。还记得一开始，我们毛手毛脚地丝毫没有意识到用电安全事项，没有先断开电脑连接再拔电源的意识，是杨老师在这五周的时间里细心告诫我们各种注意事项，耐心指导我们在 G 楼楼顶进行平台搭建。用杨老师的话来说，这次实验下来，我们就像入门了一样。我们相信，这次实验学到的各类实验常识，积累的实验经验，定能让我们在日后受益。

总结来说，这次实验的完整过程就像一场小科研一样，不仅让我们初步体验了科研过程，还让我们对雷达基础知识、LFMCW、脉冲压缩、SAR 成像、DBS 算法等有了初步的了解，并对雷达领域产生了浓厚的兴趣。我们由衷地感谢杨涛老师五周时间的用心指导，非常感谢张鑫宇师兄、许庆波师兄的帮助，让我们收获了一次难忘且宝贵的实验经历和知识。

## 七、源代码

### Code1 : 雷达参数和数据读取

```
1.  % Parameter
2.  % radar
3.  slope_Hz_per_sec = 7.532 * 1e12;           %脉冲斜率 (Hz/s)
4.  sampleRate = 5120 * 1e3;                   %采样频率 (Hz)
5.  n_adc_samples = 1024;
6.  n_chirps = 1;
7.  n_adc_bits = 16;
8.  n_rx = 4;
9.  n_tx = 3;                                  %3 发
10. n_frame=16384;                             %帧数
11. c = 3e8;                                   %光速
12. f0=77e9;                                  %起始频率
13. idle_time=180e-6;                          %等待时间 (s)
14. ramp_end_time=220e-6;                      %脉冲时间 (s)
15. % radar related
16. rangeResolutionsInMeters = c * sampleRate / (2 * slope_Hz_per_sec * n_adc_sa
    mples);                                     %距离分辨率 (米)
17. rangeBin = linspace(0,n_adc_samples * rangeResolutionsInMeters, n_adc_sample
    s);
18. BANDWIDTH = slope_Hz_per_sec*n_adc_samples/sampleRate; %带宽
19. PRT=1e-3;                                  %脉冲重复周期
20. PRF=1/PRT;                                 % 脉冲重复频率
21. lamda = c/f0;                              % 中频信号的波长
22. dR = c/(2*BANDWIDTH);                      %距离分辨率
23.
24. v0 = 0.5;                                  %雷达移动速度
25. Ls = 20;                                   %场景宽度
26. R0 = 80;                                  %第一个脉冲发射时物体距离雷达的初始距离
27.
28. % data read
29. fname='adc_data_3_02.bin';
30. fid=fopen(fname,'r');
31. dat=fread(fid,n_adc_samples*n_chirps*n_rx*n_tx*2*n_frame,'uint16'); %16bits
    , 复数 (I/Q 两路)
32. dat(dat>2^15) = dat(dat>2^15) - 2^16; %无符号位变有符号位
33. dat = reshape(dat,8,[]); %分成 8 路,
    Rx1Ik, Rx2Ik, Rx3Ik, Rx4Ik, Rx1Qk,Rx2Qk,Rx3Qk,Rx4Qk
34. dat = dat([1,2,5,6,3,4,7,8],:);
35. initial_data = dat(1:4,:) + 1i*dat(5:8,:); %4RX 数据的实虚部合并
36.
```

```

37. % 取第一个接收通道%
38. initial_data=initial_data(1,:)+initial_data(2,:)+initial_data(3,:)+initial_data(4
    ,:); %取 4 部通道
39. initial_data=reshape(initial_data,1024,16384); %将 4RX 数据进行整理, 1024 行, 1024
    次采样数据, 16384 列, 每列为一帧数据。
40.
41. Raw_data = initial_data;

```

## Code2 : SAR 成像

```

1. %赋值
2. size_azimuth = size(Raw_data,2);
3. size_range = size(Raw_data,1);
4.
5. %% 径向/距离向 -----
6. % 距离脉压
7. Raw_data=abs(fft(Raw_data));
8. Raw_data(1:200,:)=0; %去掉高频噪声
9. Raw_data(800:1024,:)=0;
10.
11. % Display raw data
12. figure;
13. mesh(Raw_data);
14. figure;
15. imagesc(Raw_data);
16. title('Raw data (unfocused)'); xlabel('Range pixels'); ylabel('Azimuth pixel
    s');
17.
18. %% 方位向-----
19. % B.) Sensor parameters
20. c0 = 299702547;
21. fc = f0;
22. fs=sampleRate; % Range Sampling Frequency [Hz]
23. BW = BANDWIDTH; % 带宽 Hz
24. tau_p=ramp_end_time; % Chirp duration [s]
25. K_r=BW/tau_p; % FM Rate Range Chirp [1/s^2] --> up-chirp
26.
27. V=v0; % Effective satellite velocity [m/s]
28. lambda=c0/fc; % Length of carrier wave [m]
29.
30. R_0=47; % Range to center of antenna footprint [m]
31. ta=16.384; % Aperture time [s]
32. prf=1/PRT; % Pulse Repetition Frequency [Hz]
33.

```

```

34.
35. % Define correlation chirp in azimuth
36. azimuth_chirp=zeros(1,size_azimuth); % empty vector to be filled with chirp
    values
37. t=-ta/2:1/prf:ta/2-1/prf;          % time axis in azimuth
38. v=-prf/2:1/ta:prf/2-1/ta;          % frequency axis in azimuth
39.
40. % FM Rate Azimuth Chirp
41. K_a=-2*V^2/(lambda*R_0);
42. % Define chirp in azimuth
43. az_chirp_temp=exp(1i.*pi.*K_a.*t.^2);
44.
45. size_chirp_a = length(t);
46. azimuth_chirp(ceil((size_azimuth-
    size_chirp_a)/2)+1:size_chirp_a+ceil((size_azimuth-
    size_chirp_a)/2))=az_chirp_temp;
47. AZIMUTH_CHIRP=fft(azimuth_chirp);
48. CON_AZIMUTH_CHIRP=conj(AZIMUTH_CHIRP);
49.
50. processed=zeros(size_range,size_azimuth);
51.
52. % Azimuth compression
53. % conducted in azimuth frequency - range time domain
54. for k2 = 1:size_range
55.     vek = Raw_data(k2,:); % select row in azimuth
56.     VEK = fft(vek); % Fourier Transform
57.     CORR = VEK.*CON_AZIMUTH_CHIRP; % Multiply spectra
58.     if_vek = fftshift(ifft(CORR)); % Inverse Fourier Transform
59.     processed(k2,:) = if_vek;
60. end
61.
62. %% 成像结果-----
63. process_abs1=(abs(processed));
64. process_abs=process_abs1(300:550,:);
65. figure;
66. cmin=max(min(process_abs));
67. cmax=min(max(process_abs));
68. imagesc([0 8],[20 50],[process_abs],[cmin cmax]);
69. % imagesc(process_abs);
70. set(gca,'YDir','normal');
71. % colormap('gray')
72. title('Processed SAR image');
73. axis equal;
74. xlabel('Azimuth','FontSize',12); ylabel('Range','FontSize',12);

```

---

```
75.  cbar = colorbar;  
76.  caxis([0 max(max(process_abs))/2]);
```

## 八、参考文献

- [1] Mark A. Richards. Fundamentals of Radar Processing, Second Edition[M]. BEIJING : Publishing House of Electronics Industry. 2008
- [2] 俞根苗,方志红,陈仁元,张长耀,吴顺君.(2003).Dechirp 及频谱分析技术的目标分辨率分析. 雷达与对抗(01),8-12. doi:10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2003.01.003.
- [3] 孙泓波,顾红,苏卫民等.机载脉冲多普勒雷达 DBS 成像实验研究[J].数据采集与处理,2001(04):423-427.DOI:10.16337/j.1004-9037.2001.04.007.
- [4] 张直中.多普勒波束锐化(DBS)理论和实践中若干问题的探讨[J].现代雷达,1991(02):1-12.DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.1991.02.001.
- [5] 孙希平. 微小型 SAR 成像雷达系统及算法研究[D].西安电子科技大学,2019.DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2019.001660.