

Synthetic Aperture Radar Basis and Its  
Applications  
合成孔径雷达基础及应用 2008 Fall  
Lecture Note

Renkun Kuang

October 11, 2019

# Contents

<b>1 绪论：合成孔径雷达发展与现状 - 吴一戎</b>	<b>6</b>
1.1 机载高分 SAR 在2008应急抗灾中的作业情况	6
1.2 雷达基础	7
1.3 SAR 研究现状	7
1.3.1 LACROSSE(长曲棍球)	8
1.3.2 SIR-C/X SAR	8
1.3.3 SIR-C/SRTM	8
1.3.4 RadarSat-1	8
1.3.5 Envisat ASAR	8
1.3.6 历史回顾	8
1.4 技术发展趋势	8
1.4.1 高分辨率 SAR 技术及进展	8
1.4.2 机载 INSAR 的三大关键技术	9
1.4.3 遥感卫星一号	10
<b>2 合成孔径雷达成像基础</b>	
<b>Fundamentals on SAR Imaging - 洪文</b>	<b>11</b>
2.1 作业要求	11
2.1.1 先进星载 SAR 系统文献综述	11
2.1.2 线性调频信号建模与脉冲压缩	11
2.1.3 点目标回波信号生成	12
2.1.4 RD/CS 成像处理算法	12
2.1.5 卫星轨道基础仿真	12
2.1.6 地图投影仿真	13
2.1.7 SAR 图像定位算法仿真	13
2.1.8 SAR 图像几何精校正仿真	13
2.1.9 RadarSat卫星 SAR 回波数据成像	13
2.1.10 一些参数	14
2.2 雷达基础	14
2.2.1 雷达及雷达系统 - Radar and Radar System	14
2.2.2 雷达脉冲及雷达后向散射 - Pulse for Pulsed Radar	15

2.3 合成孔径雷达 SAR 成像机理 . . . . .	17
2.3.1 SAR 成像及目标的分辨 - SAR Imaging . . . . .	17
2.3.2 SAR 成像几何及信号建模 . . . . .	18
2.3.3 SAR 典型成像算法原理 . . . . .	18

# Course Introduction

中国科学院电子学研究所

微波成像技术国家级重点实验室

讲师：吴一戎

专业：微波成像理论研究、微波成像技术、雷达信号处理

所在单位：电子学研究所

教师简介：吴一戎 男，院士，中国科学院电子学研究所常务副所长。

吴一戎院士承担了多项重要的国家863高技术课题，是‘星载合成孔径雷达(SAR)成像处理和运动补偿系统’、逆SAR成像和运动补偿方法研究等中的主要参加者，参与负责了‘八五’国家重点工程遥感卫星信息处理系统，‘L—SAR’系统先期攻关项目‘高精度成象处理和高精度辐射校正、几何校正’项目，重点解决了其中核心技术，提出了在雷达成象处理和运动补偿的新算法，并在工程中得以实现，曾获得了多项中科院科技进步奖(包括特等奖、一等奖、二等奖、三等奖各一项)。1998年5月当选为国家高技术研究计划信息获取与处理(863-308)主题专家组成员、项目责任专家，参与对国家863-308资助项目的规划和管理，对主管领域发展方向进行战略研究。一直从事微波遥感设备以及大型遥感卫星地面处理中心的研制，在雷达信号处理、遥感图象处理、计算机并行信号处理、大型遥感数据库管理技术等领域进行了多年研究，主持和参加完成了十多项国家的重大项目。在十五计划期间，已有数项超过千万元的国家级大项目开始研究，课题组人均经费超过50万

## 预修课程

数字信号处理、信号与系统

## 教学目的和要求

本课为信号与信息处理专业和遥感信息工程专业研究生的专业基础课，重点从信号处理、信息处理、图像处理的角度探讨合成孔径雷达基础和应用的相关知识。

拟通过课堂讲授、课后研究、课堂点评等，使学生系统了解和掌握涉及合成孔

径雷达基础理论、信号处理基础、典型成像处理算法、辐射校正和几何定位技术、先进合成孔径雷达系统设计与实现、遥感卫星地面处理及应用系统等方面的理论、方法和体系，为从事后续相关研究工作奠定基础。

## 教学内容

### 第一讲、绪论：合成孔径雷达发展与现状

课后研究：先进星载雷达系统文献综述

### 第二讲、合成孔径雷达信号处理基础

信号处理基础、线性调频信号及其脉冲压缩、雷达基础、合成孔径的概念及二维分辨等

课后研究：一维线性调频信号建模、时频特性分析、匹配滤波及其脉压、相位误差及其失配、窗函数的影响等

### 第三讲、合成孔径雷达成像算法

1. SAR 信号特征：点目标回波获取、距离徙动、距离/方位模糊、多普勒参数等

2. SAR 成像处理算法基础、几个域的定义、基于匹配滤波的成像算法原理及示例、基于线性调频信号解斜的成像算法原理及示例等。

课后研究：SAR 点目标回波仿真、RDA/CSA/PFA 处理算法及聚焦实现

### 第四讲、卫星轨道基础

天球坐标系、卫星轨道基础、星载 SAR 成像几何、多普勒参数计算等

课后研究：六根数及星下点轨迹/多普勒中心历程仿真

### 第五讲、地图投影与合成孔径雷达图像地理编码

地球模型、地图投影基础、地理编码、SAR 图像定位误差分析

课后研究：地图投影仿真、投影变换等

### 第六讲、合成孔径雷达辐射校正与定标处理

辐射校正、SAR 内定标、SAR 外定标

## 第七讲、星载 SAR 图像的几何精校正

GCP校正、DEM校正  
课后研究：GCP仿射变换等

## 第八讲、先进机载合成孔径雷达系统

实用的机载 SAR 系统

## 第九讲、合成孔径雷达系统设计与实现

机载 SAR 系统设计原则，系统功能，组成及应用

## 第十讲、干涉合成孔径雷达技术导论

干涉 SAR 原理、干涉 SAR 系统及应用

## 第十一讲、极化 SAR 技术导论

极化的概念、极化 SAR 基础、全极化原理、极化应用等

## 第十二讲、SAR 图像应用

SAR 图像目标检测、识别、图像分割、图像融合等内容

## 第十三讲、SAR 图像的海洋应用

海洋图像实例、SAR 海洋目标检测等

## 第十四讲、遥感卫星地面处理及应用系统简介

遥感卫星地面系统的组成、功能、流程等，遥感卫星地面系统的作用与应用。

## 参考书目

1. 吴一戎，《合成孔径雷达基础及应用》讲义 2. I.C.Cumming, F.Wong, 《合成孔径雷达成像算法与实现》（书后有光盘，实际的数据（包括辅助数据如轨道信息等），学完这课要能独立将原始数据处理成完整 SAR 图，P189）

# Chapter 1

## 绪论：合成孔径雷达发展与现状 - 吴一戎

跟完这课：科研如何寻找题目、怎么解决问题、怎么科研

合成孔径雷达：对地观测的一个主要手段（两大，分别为光学和微波），微波对地观测分辨率高的，就是合成孔径雷达。

是利用安装在飞机或卫星上的设备、对地球观测的一项技术。

涉及设备建造制作、相关数据处理算法开发、以及最终做应用的人。

1904年发明二极管——电子学诞生。最早的应用：电报，广播，通讯在战争中发展，雷达在二战中发展，计算机

2008年要大力发展，太赫兹（微波和红外之间），1k GHz，没有器件应用，技术有什么应用决定了其生命力。

### 1.1 机载高分 SAR 在2008应急抗灾中的作业情况

每次大地震之后当地要下雨，2008年时原因还未知。

地球系统科学，这个词由中国人首次提出。

基本情况：

- 高分 - 米级-亚米级分辨力（0.5米）
- 多（全）极化（极化合成得到彩色图，单极化得到的是灰白图）
- 快速部署：当天出图
- 全天候：不惧云、雨（微波），夜间成像
- 连续作战，每天11小时
- 快速响应

- 快速更新，重点区多次成像

先制定航线

经检验的遥感能力：

A 地物目标情况

B 区域灾情控制

C 灾情变化

D 重点目标应急：机场、重要军事目标

国务院副总理李克强亲自下达命令请吴老师过去要雷达数据。

图像有畸变，可校正（要有先验条件，如山的模型等）

## 1.2 雷达基础

## 1.3 SAR 研究现状

SAR development history

- 1951 Carl Willey Concept
- 1957 Willow Run (ERIM) 1st fully focused SAR image
- 1978 NASA SEASAT-A
- 1990s
  - ESA ERS-1
  - NASDA JERS-1
  - CSA RadarSat-1
  - ...
- 1996 EUSAR
- 2002 -
  - NASA/DLR/ASI SRTM
  - ESA ENVISAT-1/ASAR
  - OHB SAR-LUPE
  - CSA RadarSat-2
  - Astrium TerraSAR
  - AFRL TECHSAT21
  - ...



### 1.3.1 LACROSSE(长曲棍球)

### 1.3.2 SIR-C/X SAR

### 1.3.3 SIR-C/SRTM

航天飞机双天线干涉 SAR

### 1.3.4 RadarSat-1

### 1.3.5 Envisat ASAR

### 1.3.6 历史回顾

合成孔径雷达的研究，在我国起步于 70 年代中期间。1973年10月3日，中科院电子所，成立了由陈宗鸢研究院等 7 人组成的线路调研组，经过 2 年的调研，提出了组建以合成孔径雷达技术为主要研究方向的“信息科学与微波遥感技术研究室”的建议

1976年5月27日，中科院电子所建立了我国第一个以合成孔径成像雷达为主要研究方向的研究室——“微波遥感技术研究室”

分辨率：0.15米（2006.4）

干涉 SAR

多波束多通道

极化 SAR

频段覆盖：L、S、C、X、Ku

平台

## 1.4 技术发展趋势

### 1.4.1 高分辨率 SAR 技术及进展

高分辨率 SAR 的两大关键技术

#### 1. 高精度运动误差策略和补偿技术

实际飞机不可能直线飞行，有气流的波动等

提出一套 SINS/GPS/PGA 组合高精度运动补偿方案

解决了三个进一步提高精度的关键技术问题

- 24位置的IMU的动静结合混合标定方法
- 基于杆臂效应补偿的空中机动对准方法
- 一种 SINS/GPS 信息融合新方法

传统单通道组合导航系统

2. 高精度宽带雷达系统及其补偿技术  
宽带收发系统的设计和实现  
宽带收发系统误差的控制

设计实现了 3 环路光延迟内定标系统  
全通道误差提取  
0.3 dB/ 2deg 的测量精度

## 1.4.2 机载 INSAR 的三大关键技术

1. 高稳定度平台和高精度基线测量技术
2. 高相位一致性的多通道雷达系统技术
3. 高精度的干涉数据处理技术

3 个主要误差因素：  
基线、姿态、通道间误差

干涉高程测量的原理

中科院电子所研制的机载 INSAR 系统的研制任务：

- 双天线高稳定度平台系统 0.01度
- 高精度的天线基线测量 1毫米
- 高相位一致性的双通道雷达系统 通道相位误差小于1度
- 高精度干涉 SAR 数据处理技术

→

- 一种高分辨率干涉 SAR 双通道自配准成像方法
- 基于球面波模型的视向量正交分解的地形重建技术
- 一种具有高精度空变相位误差估计和几何校正能力的相位梯度自聚焦算法
- 干涉相位图生成和滤波技术
- 连续大面积图像的干涉相位展开技术

城市大比例测绘中的应用

### 1.4.3 遥感卫星一号

机载逼近国际先进水平，某些关键技术已达到国际先进水平

# Chapter 2

## 合成孔径雷达成像基础

## Fundamentals on SAR Imaging - 洪文

### 2.1 作业要求

#### 2.1.1 先进星载 SAR 系统文献综述

##### 主要研究内容

- RadarSat-1 系统  
卫星轨道、系统组成、工作模式、SAR产品（包括数据格式（先了解后面处理的数据））、应用方向
- RadarSat-2 系统  
与RadarSat-1系统的区别（轨道、系统组成、工作模式）、区别于RadarSat-1系统的功能和应用

#### 2.1.2 线性调频信号建模与脉冲压缩

##### 主要研究内容

- 构建一维线性调频信号与二维线性调频信号，仿真输出其时域波形、幅度谱和相位谱，总结其特点
- 构建上述信号对应的匹配滤波器，输出其幅度谱和相位谱，总结其特点
- 对一维和二维线性调频信号进行脉冲压缩，输出脉压后的结果

- 了解压缩比，分辨率，积分旁瓣比，峰值旁瓣比的定义，并分析一维和二维线性调频信号加密（汉明窗，三角窗，矩形窗等）前和加窗后，脉压输出结果的变化及指标是多少
- 分析相位误差对脉冲压缩效果的影响

阅读学习相关内容，编写程序，形成仿真分析报告。

### 2.1.3 点目标回波信号生成

#### 主要研究内容

- 采用叠加方式和卷积方式生成条带式点目标回波数据，注意确定测绘带中心、定位目标、计算初始斜距、目标坐标等关键参数（回波信号初始参数自定），输出回波信号图
- 确定点目标回波输出格式，以便后续应用

以机载 SAR 系统为例，输入参数参考后面给出的相关参数集来完成

### 2.1.4 RD/CS 成像处理算法

#### 主要研究内容

- 梳理 RD 成像算法处理流程，对点目标回波数据进行 RD 成像算法
- 在成像过程中完成距离徙动校正，输出校正前后的图像
- 在脉压过程中引入天线方向图、系统相位误差以及随机相位误差，计算误差条件下二维脉压后点目标成像的分辨率、峰值旁瓣比、积分旁瓣比、扩展比的变化
- 完成 CS 成像处理算法的仿真，计算分辨率，峰值旁瓣比，积分旁瓣比

以机载 SAR 系统为例，输入参数参考后面给出的相关参数集来完成

### 2.1.5 卫星轨道基础仿真

#### 主要研究内容

- 计算卫星绕地球飞行一周内，星下点的位置坐标与速度坐标随时间的关系，以图示表示
- 卫星绕地球飞行一周内，如果卫星携带 SAR 传感器（斜侧视），计算天线指向中心点位置坐标随时间的变化关系，用图示表示

- 用卫星成像集合关系计算多普勒调频率与多普勒中心频率，用图示表示卫星轨道和地球模型参数可参照后面给出的相关参数集。

### 2.1.6 地图投影仿真

#### 主要研究内容

- 仿真完成中心墨卡托投影、UPS方位投影、UTM横轴投影；确定每一种投影经纬线的变化规律，并用图示表示
- 计算各种投影的长度比，面积比和角度比

地球模型参数可参照后面给出的相关参数集。

### 2.1.7 SAR 图像定位算法仿真

#### 主要研究内容

- 完成 SAR 定位方程迭代算法仿真（解非线性方程组）
- 在不同精度初始值的情况下，给出迭代算法迭代次数、迭代精度、计算效率的分析

计算定位精度时，需结合题目 4 的仿真结果。

### 2.1.8 SAR 图像几何精校正仿真

#### 主要研究内容

- 利用多项式模型，计算下列图像坐标和地面坐标之间的变换系数
- 根据已有的两幅 SAR 图像，通过插值算法完成图像的拼接

图像拼接时，可采用多种插值方式，仿真时可以做比较

### 2.1.9 RadarSat 卫星 SAR 回波数据成像

#### 主要研究内容

- 熟悉RadarSat卫星 CEOS 数据格式内容
- 读出光盘中给定的 CEOS 格式 RadarSat 原始回波数据的辅助参数
- 完成数据的预处理工作，估计成像算法所需要的参数
- 采用 CS 算法完成数据的成像，输出图像
- 将已成像的图像数据也写成 CEOS 数据格式

### 2.1.10 一些参数

线性调频信号，点目标仿真雷达系统相关参数

地球模型参数

轨道仿真所需要的参数

## 2.2 雷达基础

### 2.2.1 雷达及雷达系统 - Radar and Radar System

RADAR: RAdio Detection And Ranging

发射：高功率电磁能量

脉冲工作体制雷达中的脉冲 pulse

主动工作模式

接受：返回能量的强度和时延

后向散射、回波；

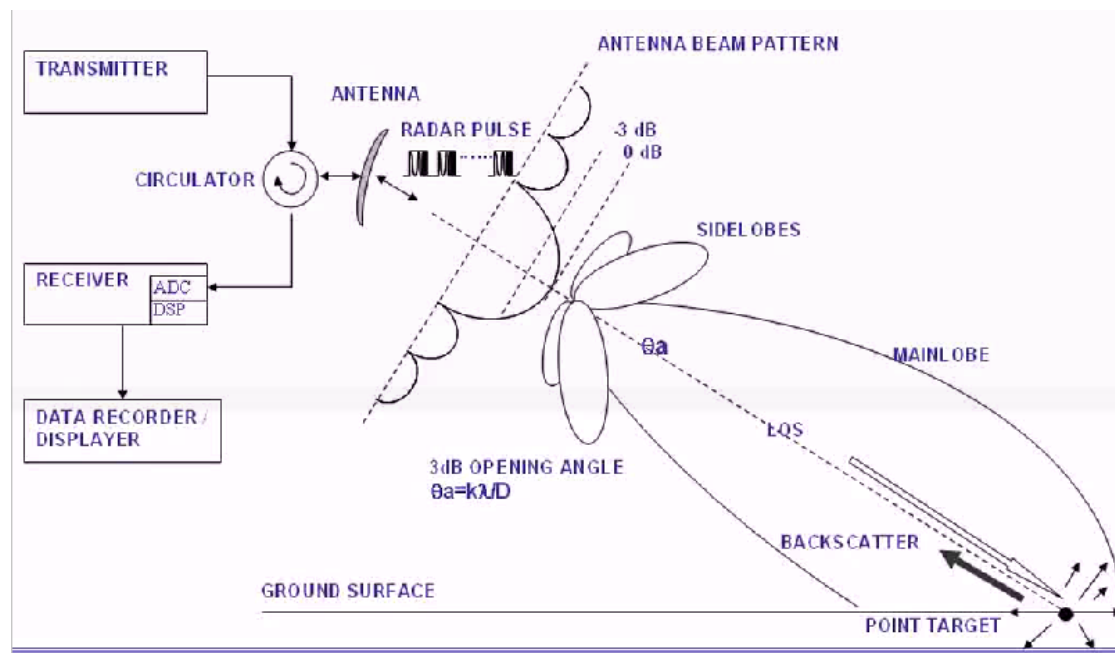
backscatter/echo/echo return

所包含的、关于被观测场景或目标的信息：

距离、相对速度（多普勒效应）、角/方向、尺寸、现状等

探测什么？ — RCS (Radar Cross Section) 在哪？ — LOS (Line of Sight  
雷达的视向角) 测距，多远？ — e.g. mountain area (山谷回响)

$$R = c\Delta\tau/2$$



雷达的组成，发射机经过双工器，通过天线发射能量。能量经过地物回来之后要接收。

其中双工器的发明跟中国的科学家有紧密的关系，孟昭英，清华大学，他隔离天线，一副天线收发共用，利用脉冲发射间歇来接受信号。

深切缅怀清华无线电系的创建人孟昭英院士

双工器“Diplexer”还是“Duplexer”？

描述主瓣有个重要参数：3dB 主瓣角度，与雷达工作波长和雷达孔径（雷达有多长）有关，3dB opening angle:

$$\theta_a = k\lambda/D$$

这个角度决定雷达对地物的分辨能力。

dB – 10倍或 20倍  $\lg()$

## 2.2.2 雷达脉冲及雷达后向散射 - Pulse for Pulsed Radar

脉冲，波长/载频，脉宽，功率

脉冲 pulse：脉冲雷达发射的光子包， package of photons

脉宽 pulse duration or length  $\tau_p$ ：脉冲持续时间

波长/频率：光子相同的传播步长/频率

传播速度 - 光速

功率 power



线性频率调制

当脉冲频率/波长不为常数时?

frequency modulation

Liner frequency modulation

LFM pulse or **Chirp signal**, 引力波也用了这个词

匹配滤波器 Matched Filtering 为什么可以对线性调频信号进行脉冲压缩

compressed pulse

载频/工作频率 carrier frequency  $f_0$

调频率 Chirp rate  $k_r = B/\tau_p$

带宽 Bandwidth B

脉冲重复频率/时间 PRF/PRT (Pulse Repetition Frequency/Time)

(复数信号)

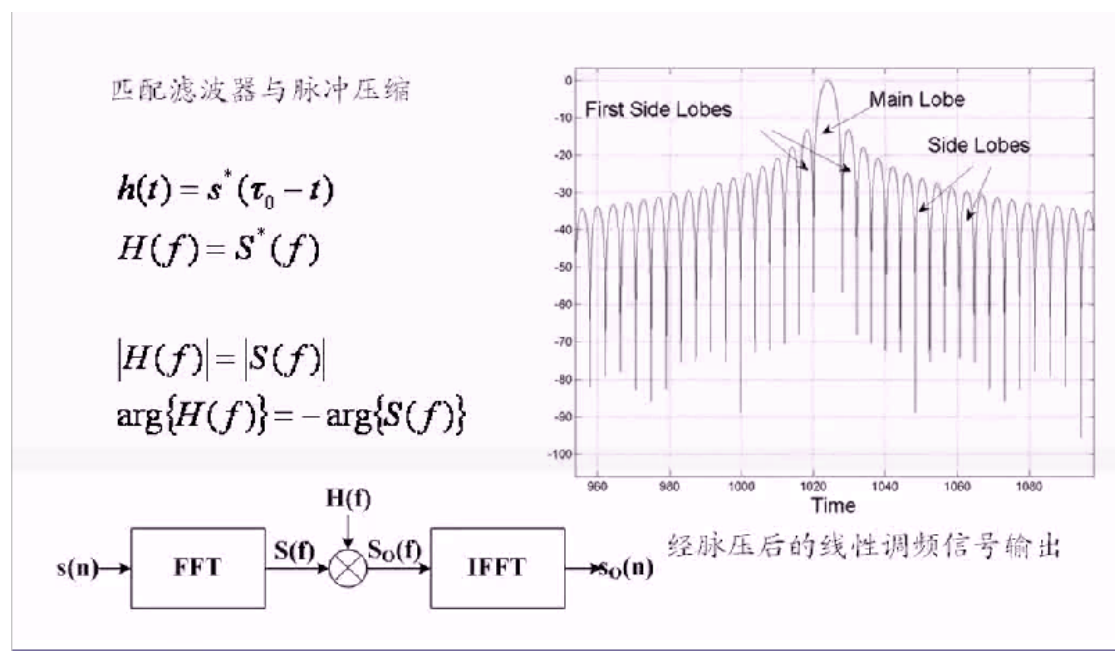
回忆匹配滤波器和脉冲压缩

什么是匹配滤波器, 关于匹配滤波器的问题?

匹配滤波器

匹配滤波器的物理解释

匹配滤波器及其在雷达信号处 匹配滤波器及其在雷达信号处理中的应用



工作频率/波长

K, X, C, S, L, P

Radar Backscatter

RCS (Radar Cross-Section) 定义

雷达方程:

$$P_r = \frac{GP_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{G\lambda^2}{4\pi}$$

其中:

$P_t$ : 发射功率 (发射机到天线)  $P_r$ : 接受功率 (天线到接收机)  $R$ : 作用距离 (天线到目标)  $\lambda$ : 工作波长  $G$ : 天线增益 (发射机或接收机)

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_r}{P_t G^2 \lambda^2}$$

归一化 RCS 定义,

$$\sigma_0 = 10 \log_{10} \frac{\sigma}{A}$$

其中  $A$  为目标场景面积

影响 RCS 的因素:

Target Shape, Material, Surface Roughness, Surface Electrical Properties

Incident Angle, Radar Working Frequency, Polarization of Transmitting/Receiving Antenna

## 2.3 合成孔径雷达 SAR 成像机理

### 2.3.1 SAR 成像及目标的分辨 - SAR Imaging

EM 300MHz - 300 GHz (微波: 米-厘米, 射电是十米-亚毫米)

全天时、全天候; 高分辨率; 本质特征 (物体散射特性等, 塑料草和真实草); 信号处理; 图像解译

SAR 成像: 数据采集 + 成像处理

1. 数据采集:

照射目标或目标区域 + 回波信号采集 - 原始数据 (复数)

数据采集很重要, 如果数据采集的不好, 或者说如果要做某方面的应用, 比如农业或灾害监测, 设计的工作参数不合适, 波段不对, 极化方式不对, 频率不对, 就没办法得到需要的数据, 没办法对观测目标的最主要的特征进行描述

散射处理, 信号处理, 应用, 图像表征一体化研究。

(点目标如何获得, 仿真作业) 2. 成像处理:

对原始数据的**聚焦处理 (相位的相干)** 或**成像处理** - 散射目标或目标区域的图像

**复数数据的信号处理 - 本质工作**

一幅图像

灰度: 幅度和相位 / 二维: 距离和方位

成像的过程和性能, 可用目标在二维上的分辨来描述

二维可解耦时, 一次二维目标的分辨过程可以简化为: 两次一维的目标分辨过程

沿距离向目标分辨 (方法1: 窄脉冲法 (理想, 不实际, 雷达作用距离希望远, 距离和平均功率有关, 平均功率和脉冲时间内的峰值功率有关, 如果脉冲窄, 意味着脉冲时间内的峰值功率要非常高, 这又与雷达本身的质量有关, 很重的雷达在飞机或卫星上是不实际的), 方法2: 线性调频脉冲法 ( $\rho_r = c/2B$  提高了距离的分辨能力, 达到米级))

+

沿方位向目标分辨 (方法1: 窄波束法 (Real Beam Mapping RBM,  $\rho_a = \theta_a R = k \frac{\lambda}{D} R$  和天线口径成反比, 不实际), 方法2: **多普勒波束锐化法 Doppler Beam Sharpening DBS**, FFT COMB FILTER (在频域分辨):  $\rho_{aDBS} = \frac{\theta_a}{\beta} R$ )

都与作用距离  $R$  有关,  $R$  越大, 误差越大

方法3: 合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar (SAR)) 技术

相控阵 (Phased Array) 技术 (也是在频域分辨)

Coherent Processing With SAR

$$\rho_{aSAR} = \frac{\lambda}{2L} R$$

(卫星组网)

利用平台的移动, 通过信号处理合成在不同位置采集到的信号数据, 好像在空间中有一个很大的阵列一样 (嗯? 那么天文观测可否利用地球的移动, 好像地球轨道上摆了一个大阵? 这个时延太长了吧? 半年走2AU, 但是地球绕银河系的速度是很大的, 每秒移动很远距离, 能不能利用地球这样的移动观测呢?)

## 2.3.2 SAR 成像几何及信号建模

## 2.3.3 SAR 典型成像算法原理