

Mission: Magellan

Target: Venus

Image Credit: NASA/JPL/USGS



电子科技大学
University of Electronic Science and Technology of China

走进雷达成像
看世界的另一双“眼”

张晓玲 信息与通信工程学院

Planetary Radius (km)

6048 6050 6052 6054 6056 6058 6060 6062



电子科技大学
University of Electronic Science and Technology of China

走进雷达成像 看世界的另一双“眼”

张晓玲 信息与通信工程学院



目录

- 1 雷达是什么?
- 2 成像雷达
- 3 合成孔径雷达成像
- 4 逆合成孔径雷达成像

▶ 雷达是什么?



RADAR -> RAdio Detection And Ranging 无线电探测与测距

解决两个问题：目标**有没有？在哪里？**

- 雷达的组成部分：发射机、接收机、发射天线、接收天线、信号处理器、显示器
- 雷达的工作原理：

➤ 测距原理：回波延时 $R = \frac{c(t_1 - t_2)}{2}$

➤ 测量方位原理：测量目标**方位角 α** , **俯仰角 β**

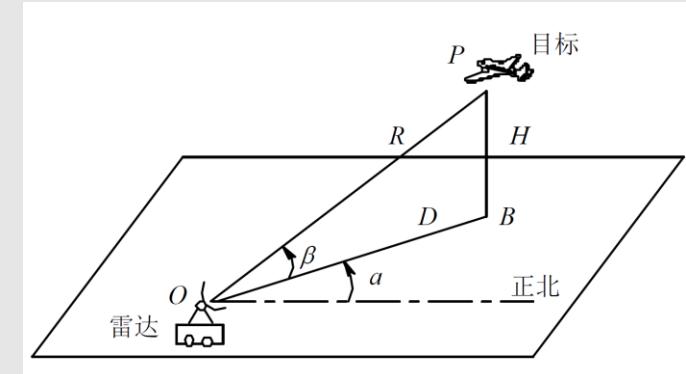
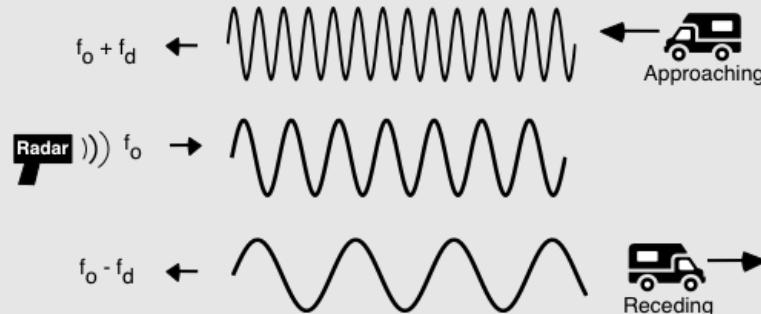
天线扫描过程中收到最强回波时，天线尖锐波束指向

➤ 测速原理：雷达与目标之间相对运动产生的频率

多普勒效应

$$v = \frac{f_d c}{2 f_0}$$

Frequency



▶ 雷达是什么?



RADAR -> RAdio Detection And Ranging 无线电探测与测距

解决两个问题：目标**有没有？在哪里？**

- 雷达的组成部分：发射机、接收机、发射天线、接收天线、信号处理器、显示器
- 雷达的工作原理：

➤ 测距原理：回波延时 $R = \frac{c(t_1 - t_2)}{2}$

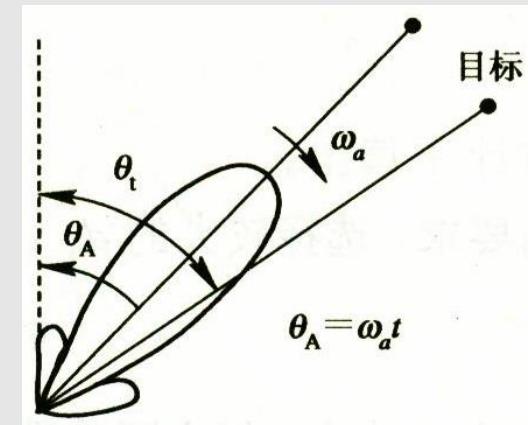
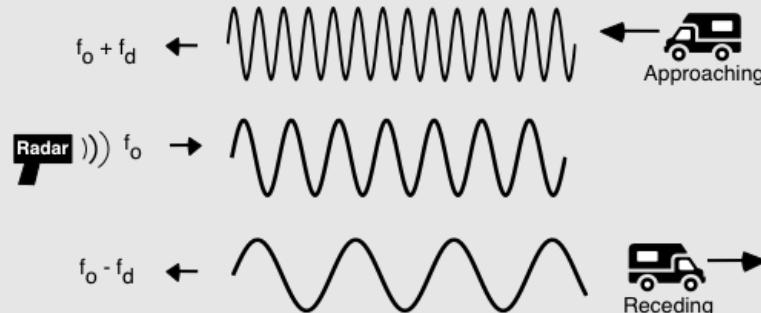
➤ 测量方位原理：测量目标方位角 α ，俯仰角 β
天线扫描过程中收到最强回波时，**天线尖锐波束指向**

➤ 测速原理：雷达与目标之间相对运动产生的频率

多普勒效应

$$v = \frac{f_d c}{2 f_0}$$

Frequency



▶ 雷达的应用：军事 → 民用

➤ 车载成像雷达

自动驾驶，具备
在恶劣环境下安
全定位的能力



➤ 穿墙雷达

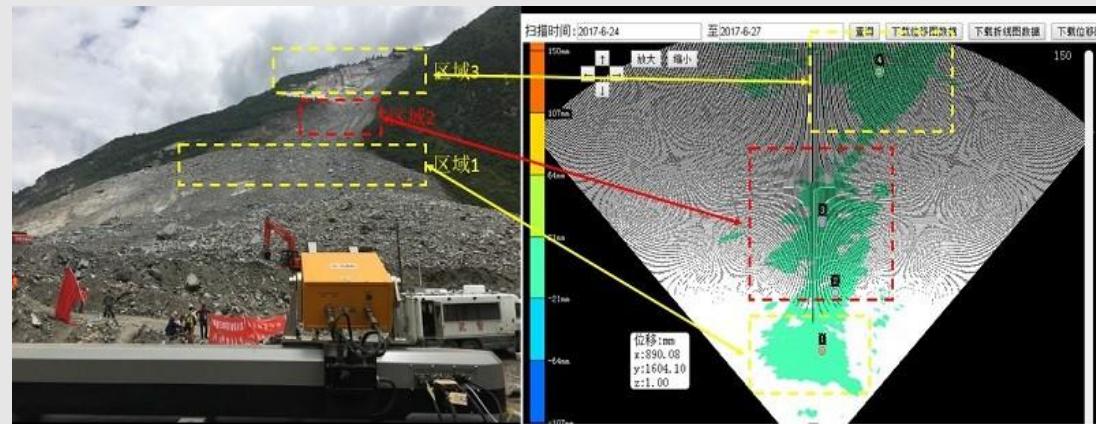
可用于**反恐/生命**
探测
通常 0.5GHz-
3GHz电磁波具有
良好穿透性



➤ 边坡雷达

中国安全生产科学研究院研制S-SAR型边坡雷达
支援四川茂县“6.24”
山体滑坡应急救援，**预警二次山体滑坡**

形变量达10mm





高分三号
C频段多极化合成孔径雷达成像卫星
1m分辨率
2016年升空

目录

Contents

- 1 雷达是什么?
- 2 成像雷达
- 3 合成孔径雷达成像
- 4 逆合成孔径雷达成像

▶ 成像雷达 Imaging Radar

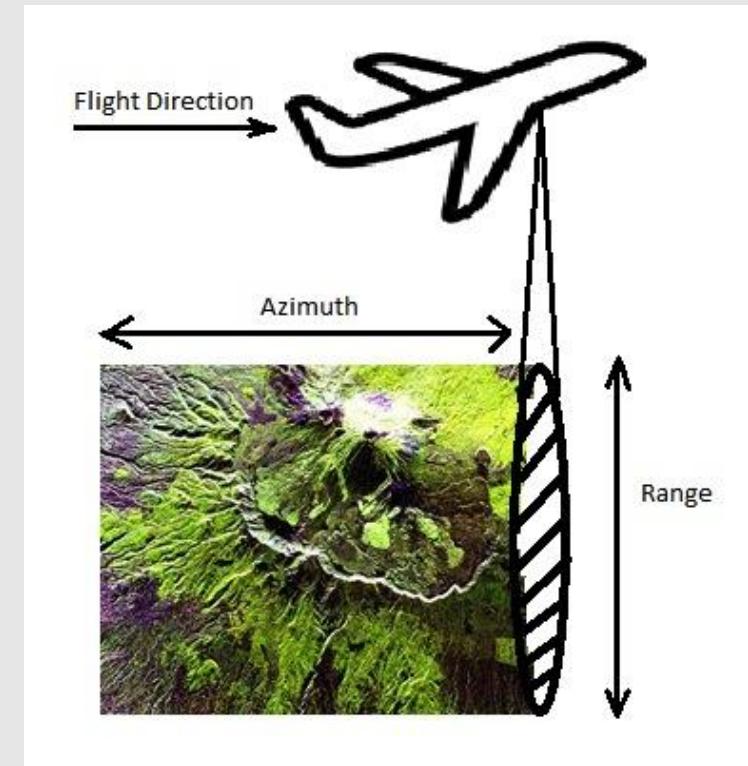
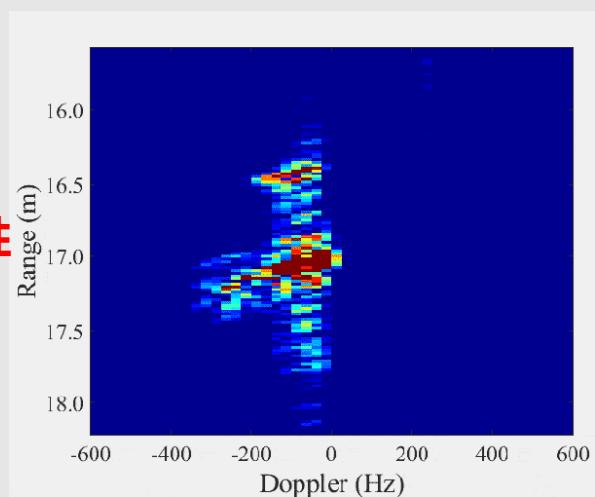
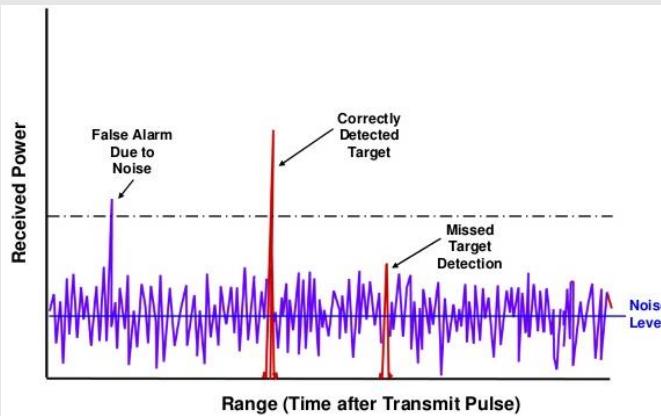
➤ 一维测距

实现定位探测

↓ 扩展

➤ 二维雷达图像

直接反映目标散射特性

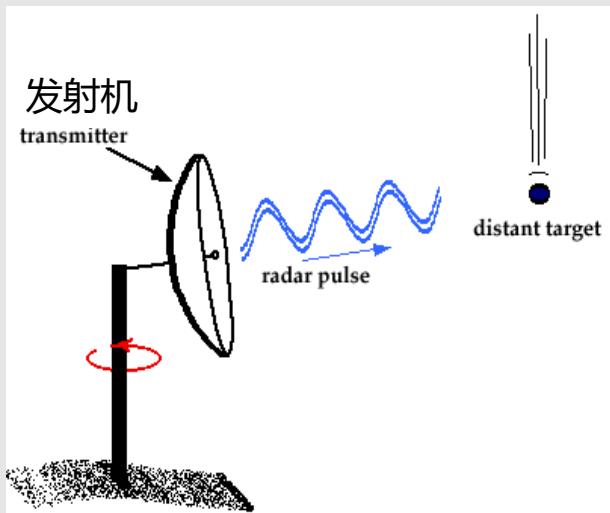


- **距离向Range**: 天线波束指向
- **方位向Azimuth**: 雷达平台运动方向

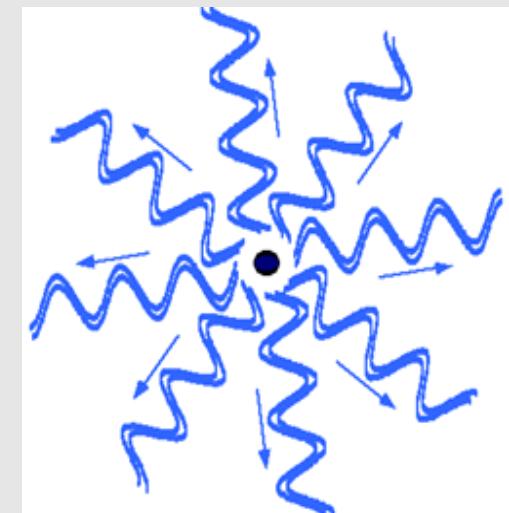
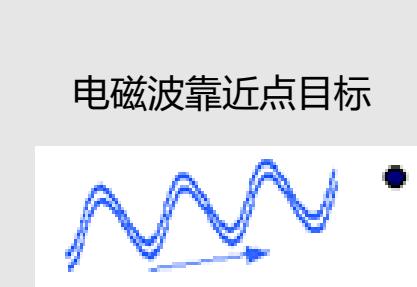
▶ 雷达散射

散射的概念：点目标在雷达入射电磁波的作用下，产生同频电磁波，并向各个方向传播，**各方向传播的能量大小与点目标的特性有关。**

雷达发射电磁波



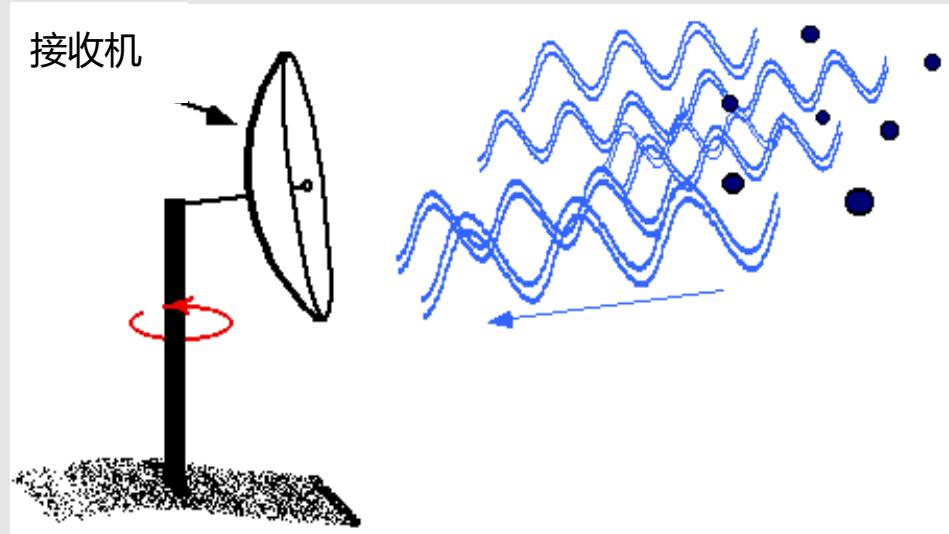
点目标发出电磁波向各个方向散射



- 点目标吸收部分能量，发出比之前能量弱的电磁波（散射回波信号）

▶ 后向散射

- 雷达接收机接收目标散射回来的信号，测量其能量，**将能量转换为灰度值，即为获得的二维雷达图像**

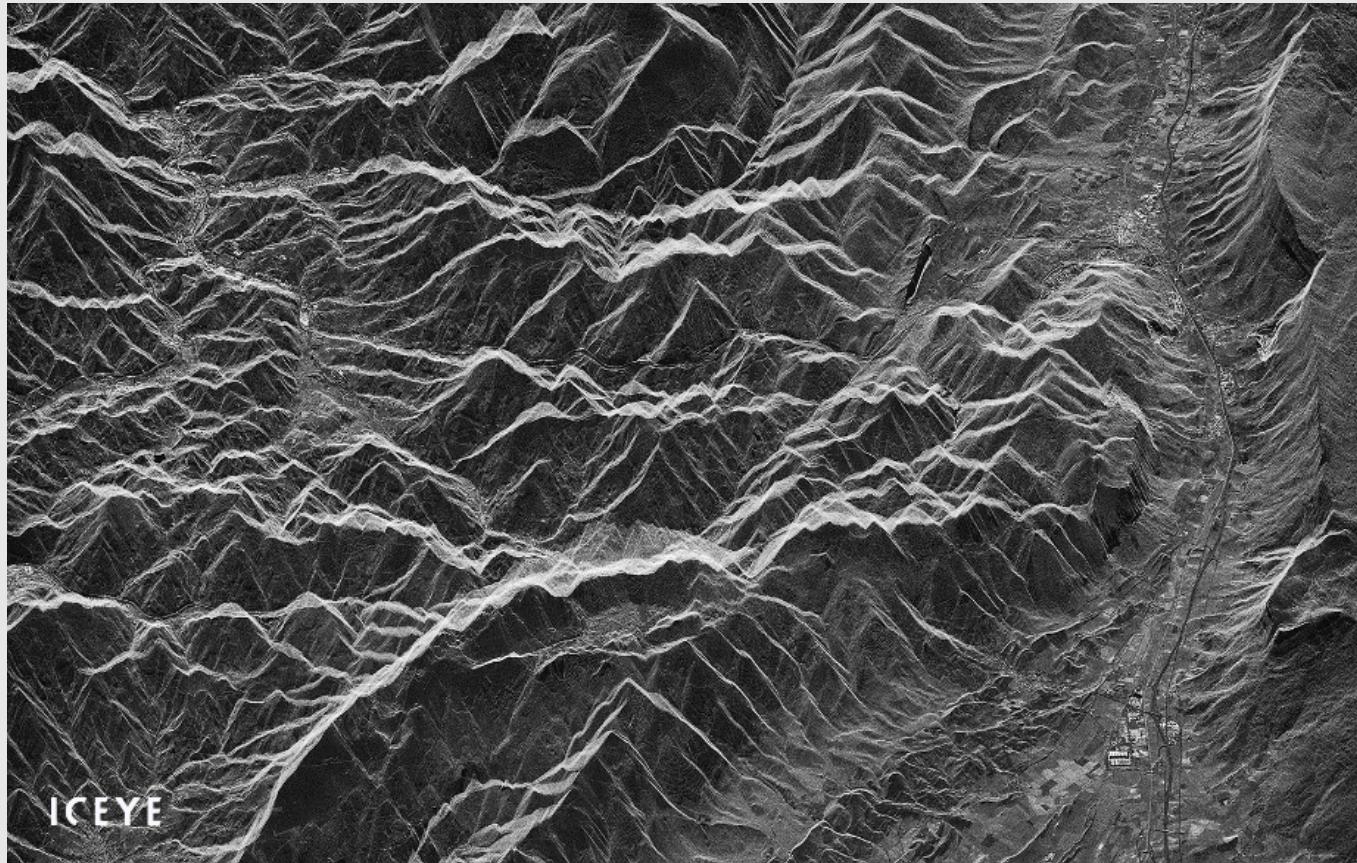


□ 后向散射

- 由于传统雷达系统收发一体，因此接收天线接收的回波大部分为**目标向入射方向散射的回波**，定义该方向为后向散射方向，接收机天线接收的能量为目标后向散射能量

▶ 典型二维雷达图像

- 雷达图像色调深浅反映地物后向**散射回波**的弱强
- **亮的目标相对暗的目标有更强的散射性**



▶ 雷达散射系数及影响因素

➤ 雷达散射截面 (RCS)

—— 定量衡量目标散射强度

雷达散射截面RCS是指假设点目标散射具有各向同性，点目标在雷达发射电磁波照射下所产生回波强度的一种物理量。

雷达观测目标通常为自然分布目标，为了衡量分布目标的散射雷达信号能力，引入雷达散射系数（又称后向散射系数），表示入射方向分布目标单位面积的平均雷达散射截面。通常以分贝dB表示。

➤ 影响雷达散射系数的因素

□ 物体因素

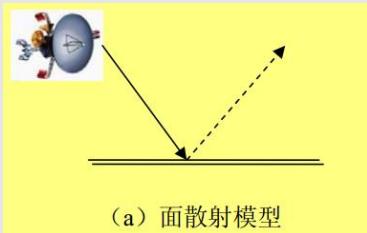
- 表面粗糙度
- 媒质介电常数
- 结构复杂度

□ 雷达因素

- 雷达波长
- 极化
- 入射角

► 散射的类型

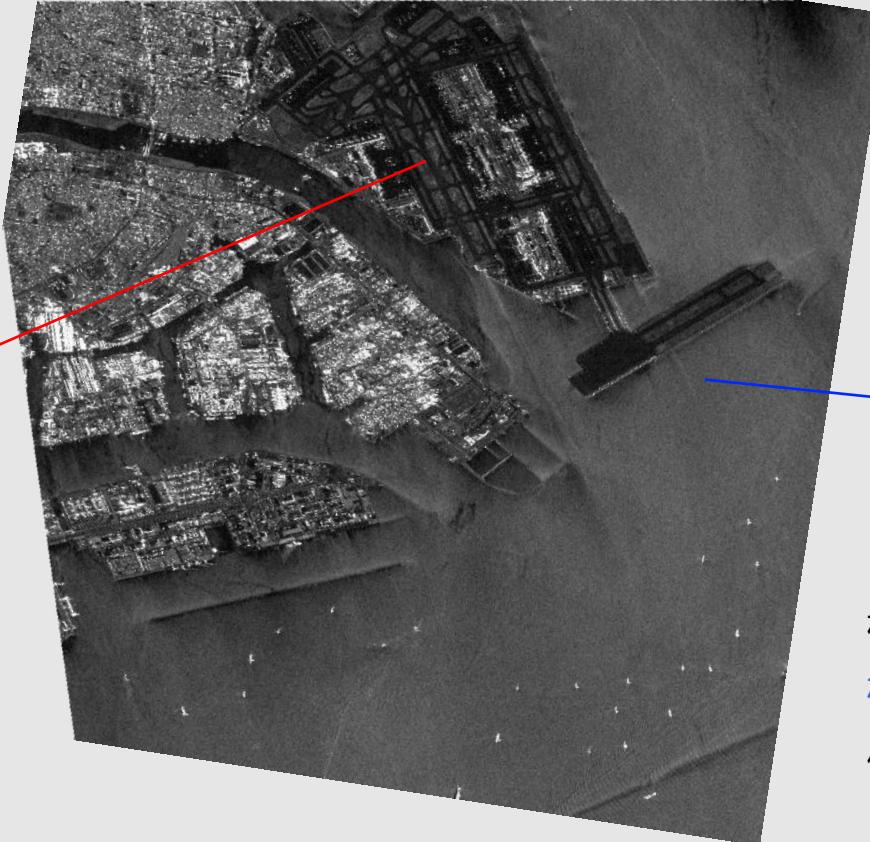
➤ 表面散射 (奇次散射)



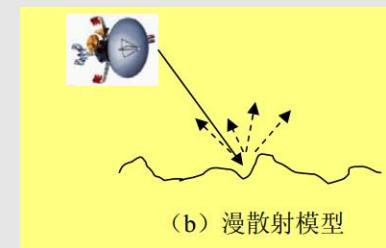
平面光滑介质

常见地物类型：干涸的河床，
公路路面，平静水面，光滑的
岩石

目标后向散射能量小，
雷达图像中表现为暗的
特性



➤ 漫散射



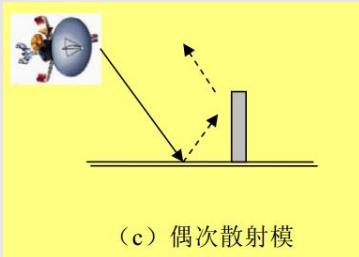
粗糙介质

常见地物类型：农作物，有波浪的
水面，凝固的火山岩石

相较表面散射，更多的散射电
磁波回到雷达天线，在雷达图
像上表现为灰色到白色的特性

► 散射的类型

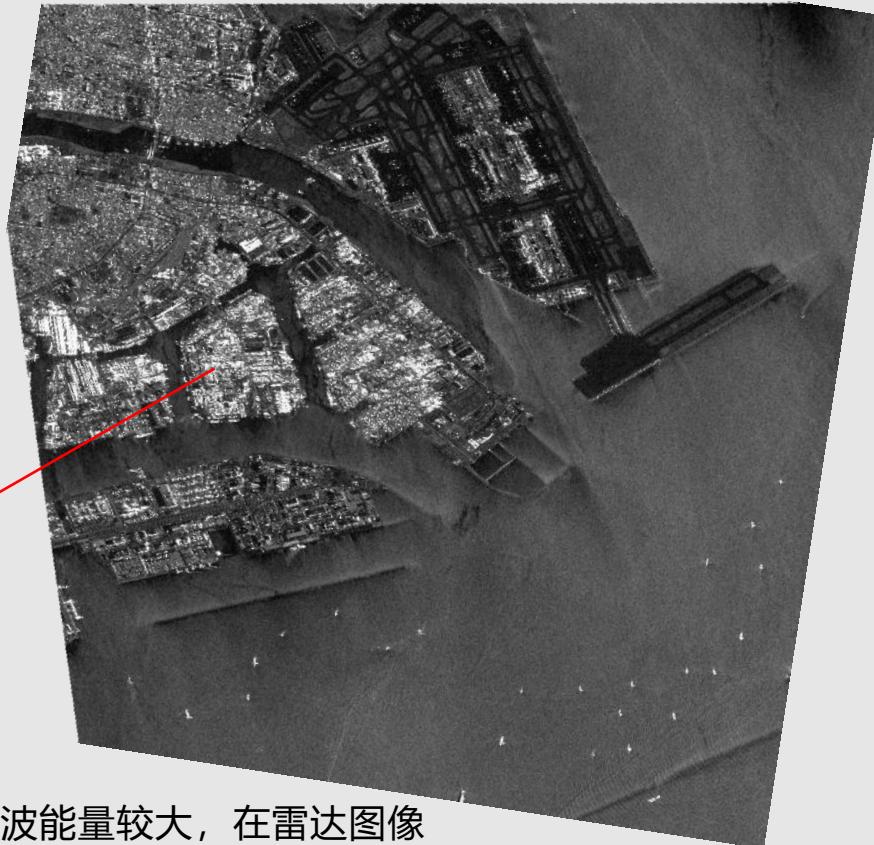
➤ 偶次表面散射



(c) 偶次散射模

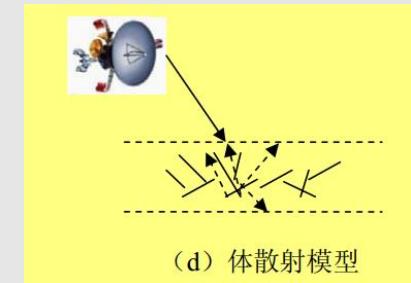
两个散射面
互相垂直

常见地物类型：
城市墙壁地面之间
森林树干地面间



雷达天线接收后向散射回波能量较大，在雷达图像上表现为从浅白到白色之间的目标

➤ 体散射



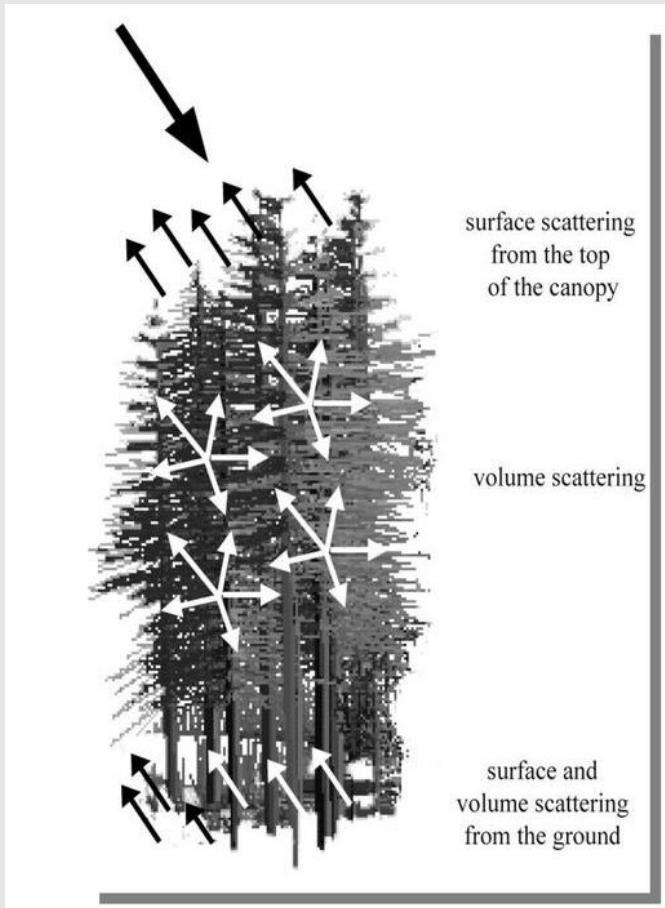
(d) 体散射模型

空间随机方向分布的柱形
散射体

常见地物类型：大量枝叶组成
的植被地区

体散射在极化雷达图像
中较明显

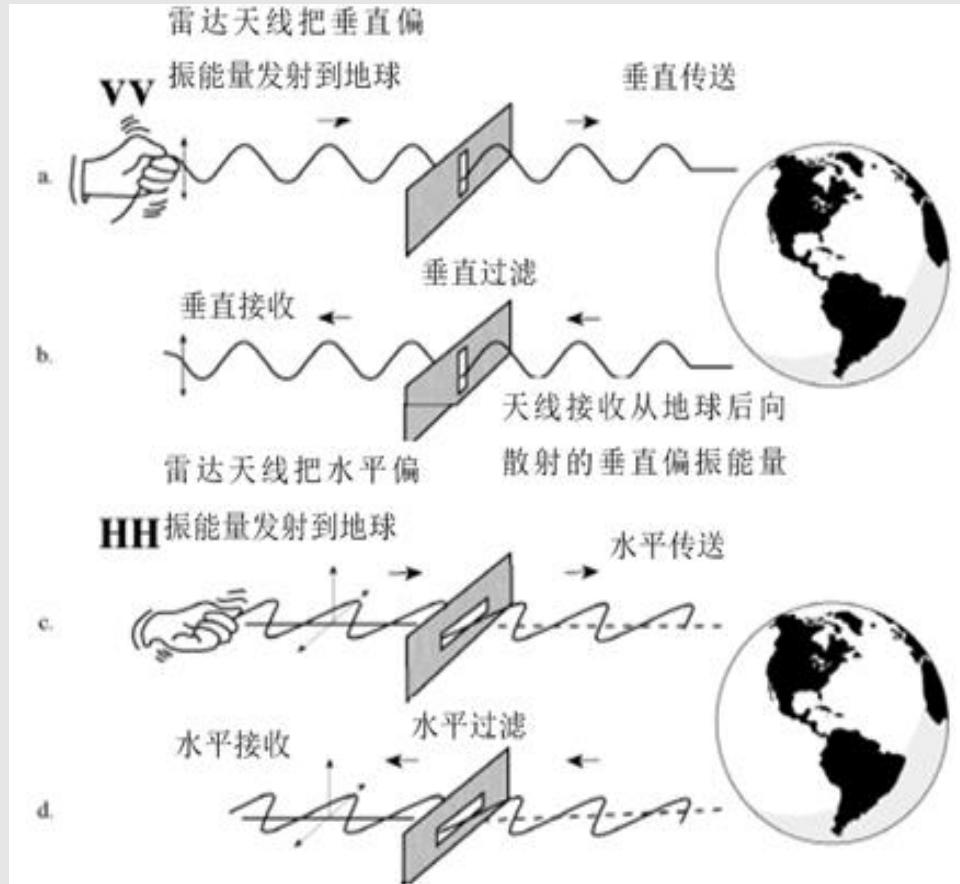
▶ 目标散射特性



- 以松树林为例，不同部位具有不同的散射特性
- 松树林树冠：表面散射
- 松树林内部：体散射
- 松树林地面：表面散射（奇次，偶次）、体散射

► 极化 Polarization

- 雷达发射的能量脉冲的电场矢量，可以在垂直(V)平面或水平(H)平面内被偏振
- 极化的特性
 - 依据发射和接收的极化方式，可以有四种组合: **HH, VV, HV, VH**
 - 与目标作用后，电磁波的极化状态可能改变
 - 后向散射通常为两种极化的混合
 - 不同的目标反映出不同的极化散射特性
- 极化雷达在冰冻层、植被、水文学研究中应用广泛



▶ 极化散射特性

- 以冰雹和雨滴为例

极化雷达发射水平极化波 (HH)



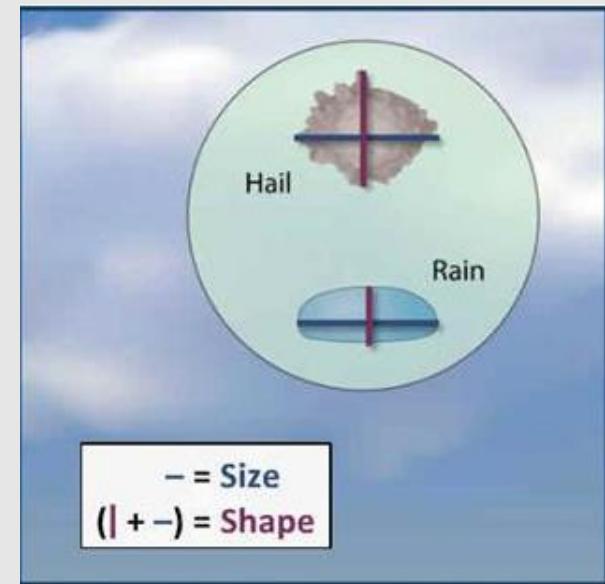
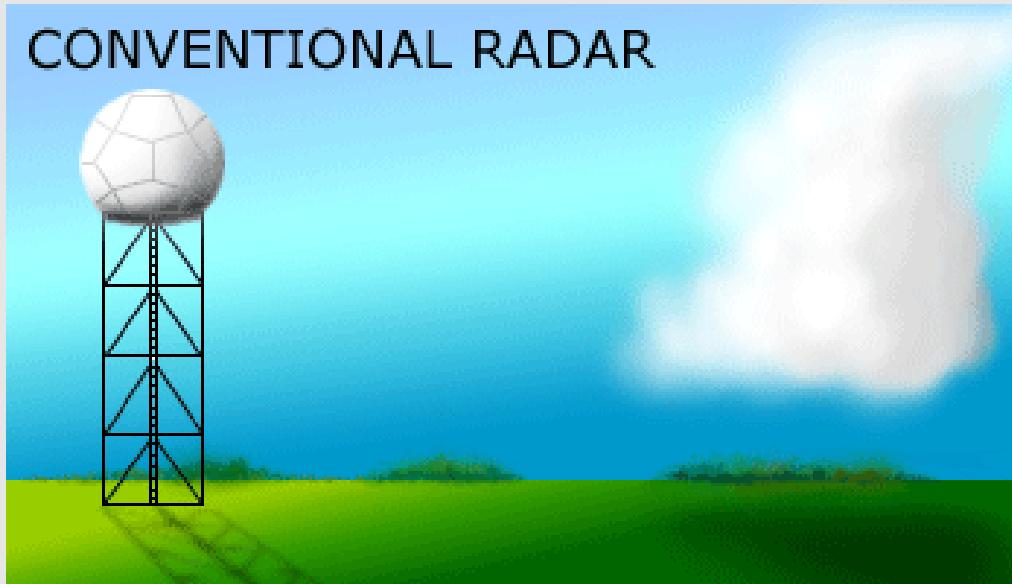
获取冰雹水平维度宽度

极化雷达发射垂直极化波 (VV)



获取冰雹垂直维度宽度

获取冰雹大小和形状



▶ 极化雷达图像

➤ GF-3获取的极化雷达图像-辽宁丹东鸭绿江入海口

图像获取时间：2017-06-04 夏季

处理方法：多视平均、滤波、

Freeman-Durden分解、伪彩色

合成



粉色：人造建筑

偶次表面散射 能量较强

绿色：植被

体散射 能量强

黑色：平静的海水

表面散射 能量很弱

蓝色：

粗糙地表、海浪

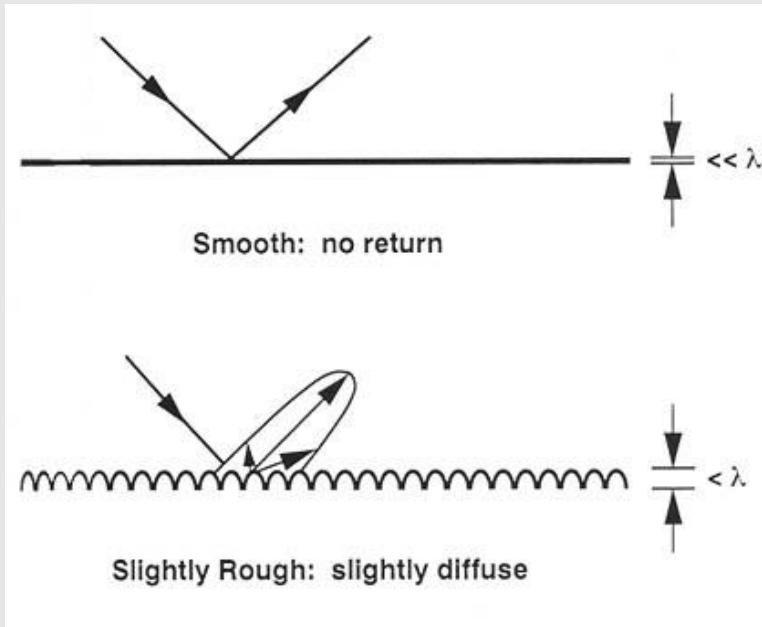
漫散射 能量较强

▶ 雷达散射系数影响因素

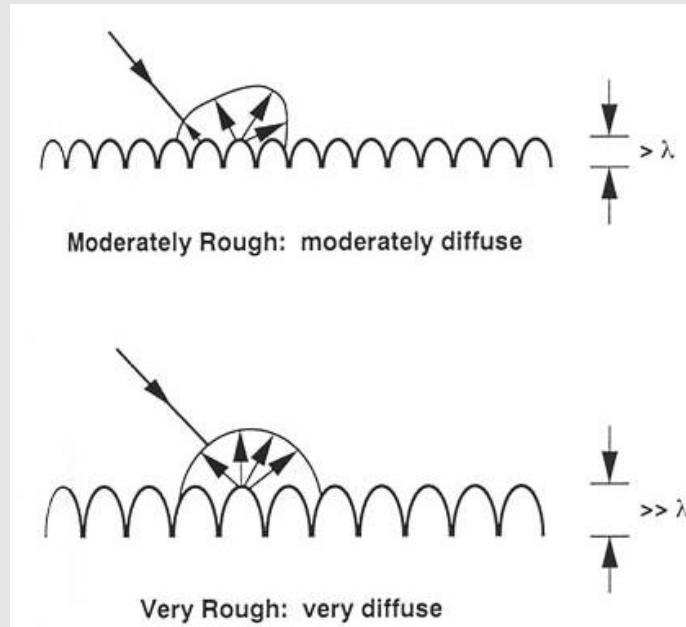
——物体表面粗糙度

- 用物体表面凸起的高度与雷达波长相对比进行定义

表面高度远小于波长——光滑表面



表面高度远大于波长——粗糙表面



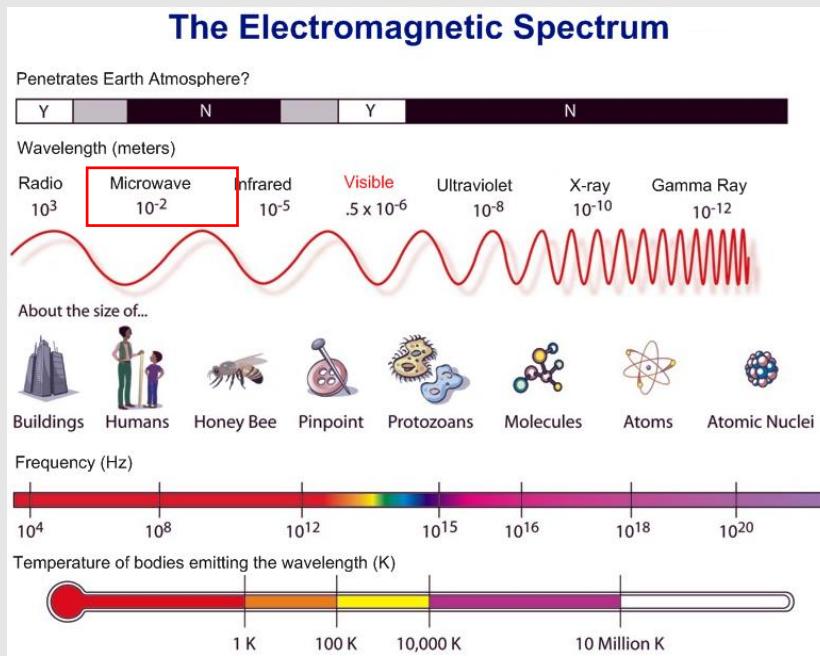
波长越长，物体表面越光滑，表面散射越强；波长越短，物体表面越粗糙，漫散射越强

▶ 雷达散射系数影响因素

—— 物体表面粗糙度

➤ 雷达工作波长

通常为0.5~100cm的微波段，频率分布为0.3GHz~60GHz



频段名称	频率范围	波长	用途
Ka	27~40GHz	7.5~11.1mm	波长短，带宽大，关键微波器件体积小，适用于中小型无人机平台(中科院电子学研究所)
K	18~27GHz	1.11~1.67cm	常用于气象雷达检测云层
Ku	12-18GHz	1.67~2.5cm	高分辨率测绘，卫星高度计，德国Fraunhofer TIRA 逆合成孔径雷达
X	8~12GHz	2.5~3.75cm	军事侦察、地形测量，如德国DLR的TerraSAR-X/TanDEM-X卫星、意大利的COSMO-SkyMed星座
C	4~8GHz	3.75~7.5cm	穿透能力局限于表层，常用于海洋上强目标观测，如ERS-1、Sentinel-1、RADARSAT
S	2~4GHz	7.5~15cm	环境与灾害监测，中国的HJ-1C卫星
L	1~2GHz	15~30cm	常用于植被、冰层、冰川动态监测，如美国的SEASAT卫星，日本的JERS-1、ALOS-2卫星
P	0.3~1GHz	30~100cm	穿透性强，常用于植被多样性研究，NASA/JRS AIRSAR

- 频率低、波长长：穿透性强
- 频率高、波长短：高分辨

▶ 雷达散射系数影响因素

——物体表面粗糙度、波长

□ 瑞利准则：粗糙度对于电磁散射的影响

取决于传输波长

● 以X波段、L波段为例

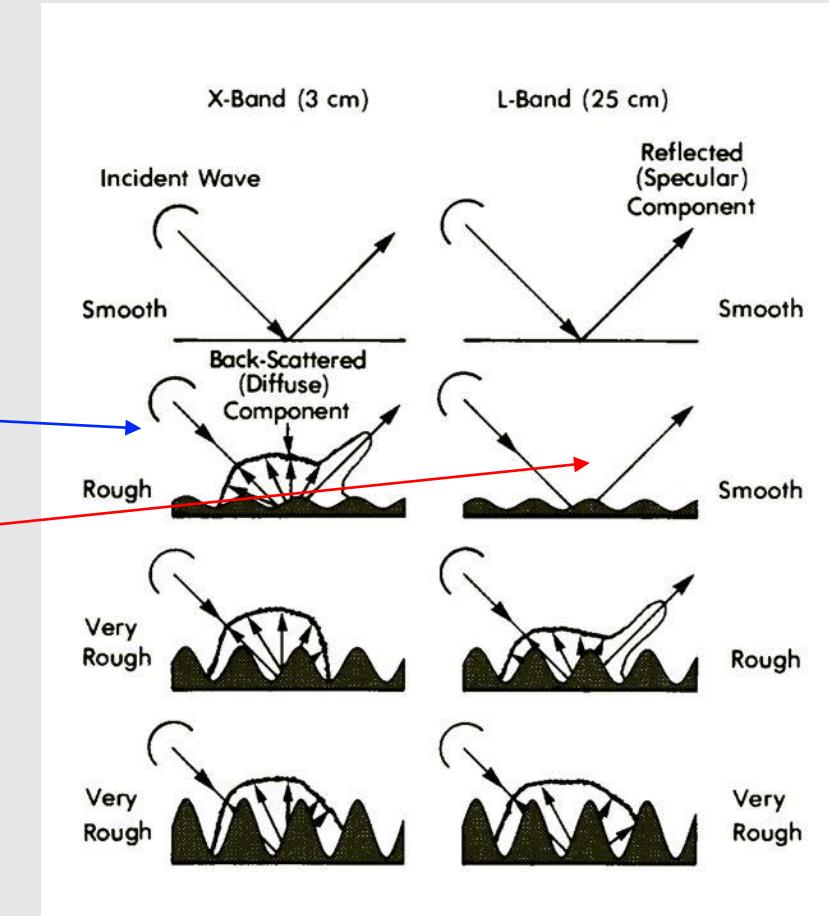
一个相同的表面，

在X波段（3cm）可能表现为粗糙的

但在L波段（25cm）可能表现为光滑的

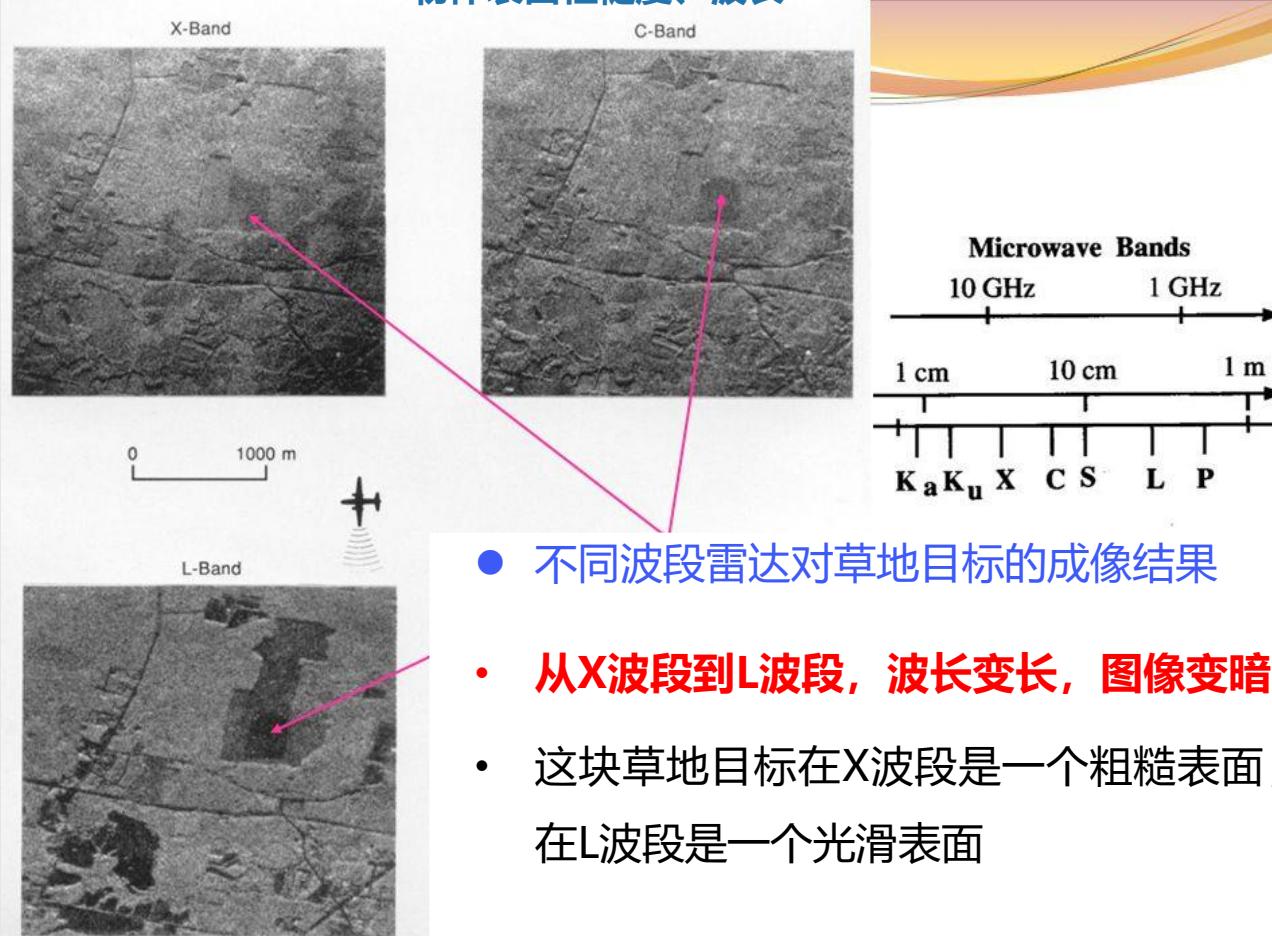
● 结论

• X波段对地物起伏变化更敏感，利于精细化成像



▶ 雷达散射系数影响因素

——物体表面粗糙度、波长



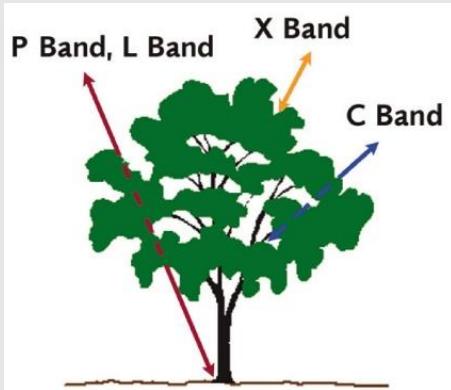
▶ 雷达散射系数影响因素

——雷达波长穿透性

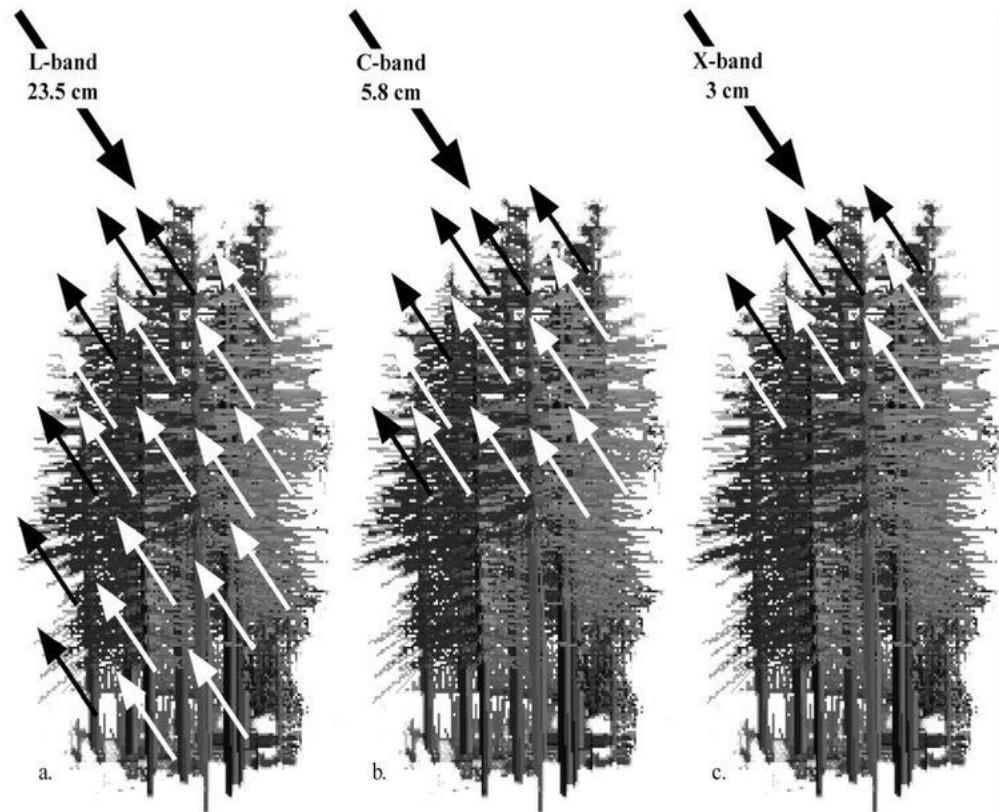
● 以松树林为例

L波段 (1.2GHz) 穿透性最强，
能获得松树林地面的散射回波

X波段 (10GHz) 穿透性最弱，
仅能得到松树林树冠部分的散
射回波



Response of A Pine Forest Stand to X-, C- and L-band Microwave Energy



▶ 总结成像雷达的特点

□ 遥感系统

- 主动遥感系统：利用人工辐射源向目标**主动发射一定形式的电磁波**（如微波波段，激光），再由传感器接收和记录其反射波的遥感系统。如：传统**微波雷达**，激光雷达，声纳
- 被动遥感系统：探测仪器记录目标自身发射或反射自然辐射源（如太阳）的电磁波信息。如：航空摄影系统，红外扫描系统

□ 获取目标多维信息

- 距离、方位、速度、多角度
- **极化散射特性** (HH, HV, VV, VH)
- 表面粗糙程度、介电性能、含湿量
- 利用干涉、层析、阵列等技术获取**目标三维结构信息**

□ 有穿透性

- 可穿透云层、植被、沙石以及雪层
- 穿墙雷达

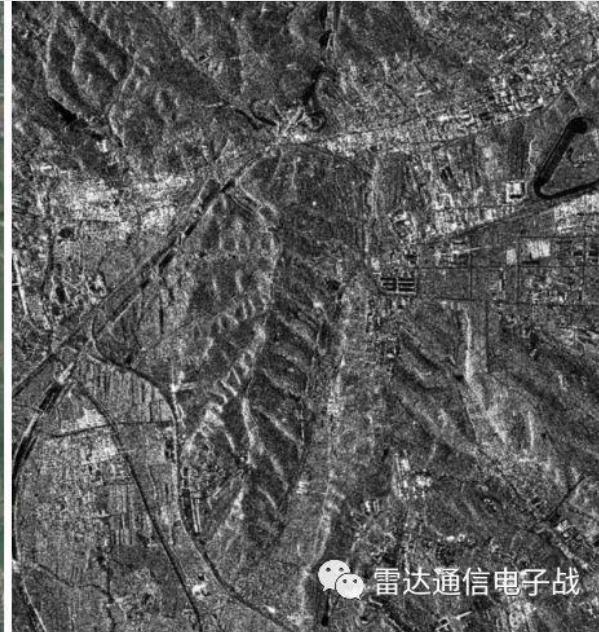
成像雷达典型特点：全天时全天候成像

▶ 总结成像雷达的特点

- 成像雷达具有**全天时全天候**成像的优势



光学图像



雷达图像

▶ 总结成像雷达的特点

- 成像雷达具有**全天时全天候**成像的优势



Sandia National Laboratories

美国圣地亚实验室

左：视频SAR

右：红外成像

雷达传感器、红外传感器
装载在同一飞行平台，对
同一地区进行同时观测

► 雷达成像技术

典型的微波成像雷达：

- 合成孔径雷达SAR
- 逆合成孔径雷达Inverse SAR (ISAR)



德国DLR宇航中心
TerraSAR-X卫星
合成孔径雷达图像
巴塞罗那，西班牙

目录

Contents

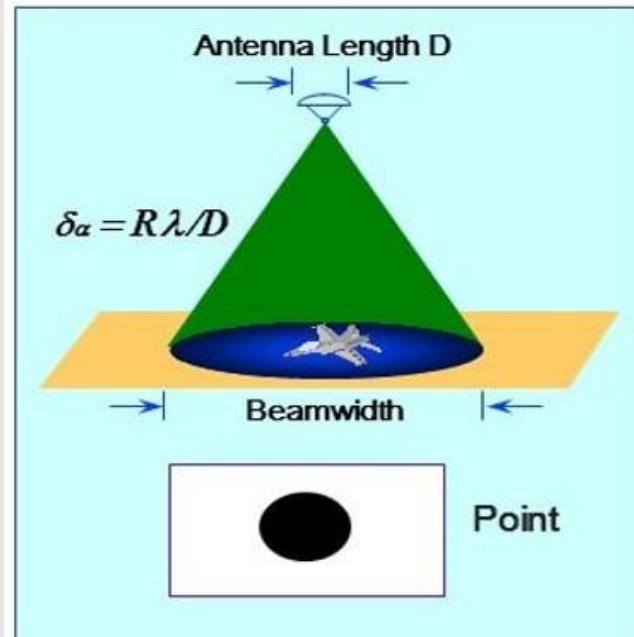
- 1 雷达是什么?
- 2 成像雷达
- 3 合成孔径雷达成像
- 4 逆合成孔径雷达成像

▶ 合成孔径雷达 (synthetic aperture radar , SAR)

□ 实孔径雷达RAR与SAR分辨率对比

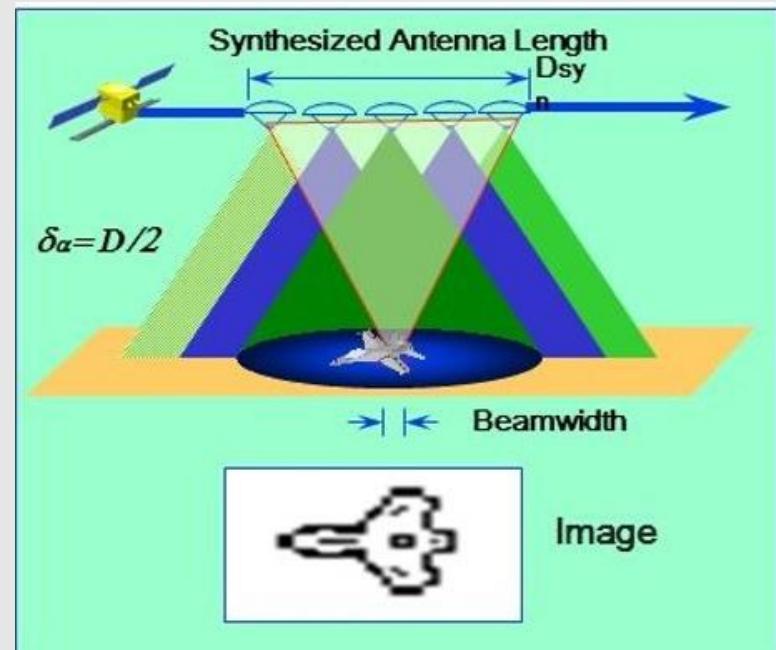
RAR分辨率

$$\delta_x = \lambda R / D$$



SAR分辨率

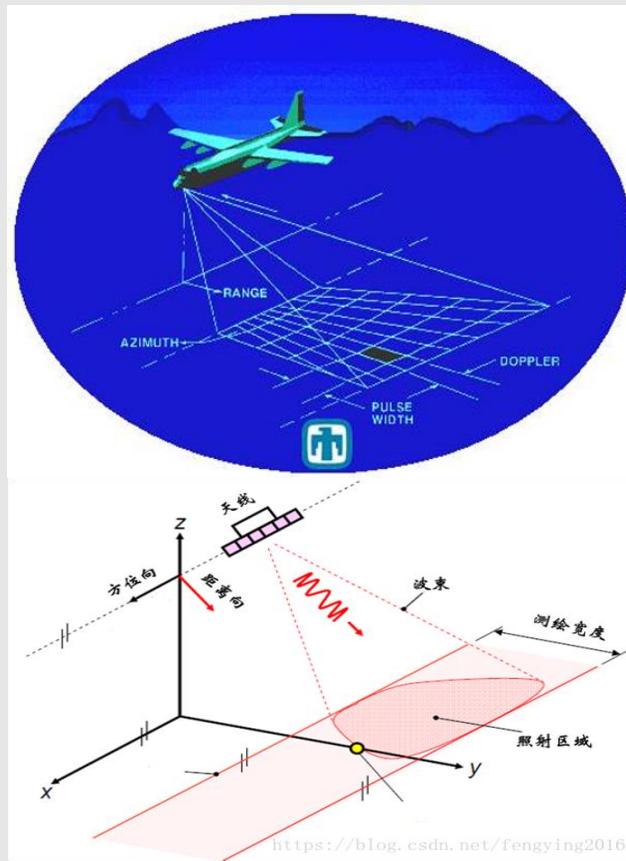
$$\delta_a = D / 2$$



方位向分辨率 → 天线孔径 ↑ → 天线尺寸 ↑ 难实现! → 小天线 “合成” 大孔径天线来实现

▶ 合成孔径雷达 (synthetic aperture radar , SAR)

➤ 合成孔径雷达是一种具有**二维高分辨力**的**成像雷达**



距离向: 通过**发射宽带信号**来获得高的分辨率 (与其他成像雷达一样)

方位向: 通过雷达与目标的相对运动 (**目标静止, 雷达运动**) 来合成一个大孔径天线 (**合成孔径**) 实现方位向高分辨率



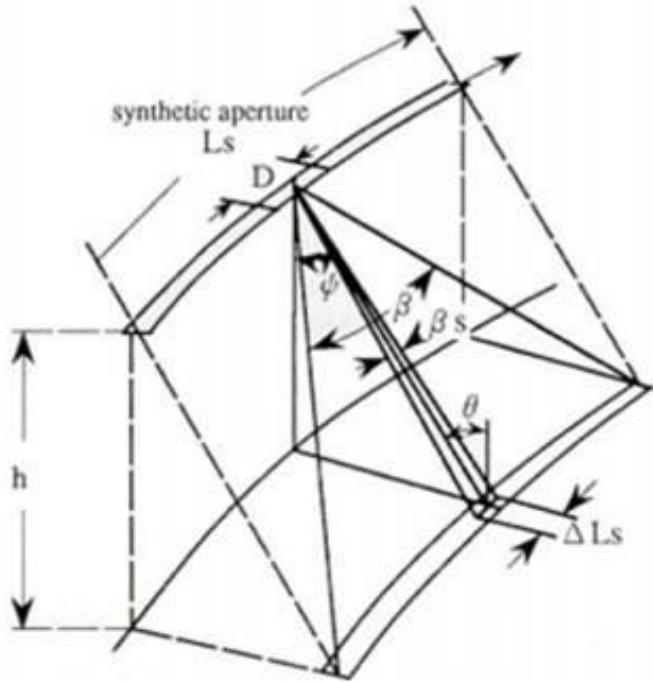
美国 “五角大楼” 光学图像



Ku-波段SAR图像 (Sandia实验室)

▶ 合成孔径雷达 (synthetic aperture radar , SAR)

□ 合成孔径雷达实现**方位向高分辨率**



D : 真实孔径
 β : 真实波束宽度
 β_s : 合成波束宽度
h : 飞行高度
 ΔL_s : 方位向分辨率
 ψ : 视角

□ 波束宽度与天线孔径的关系

- 实孔径雷达 $\beta = \frac{\lambda}{D}$
- 合成孔径雷达 $\beta_s = \frac{\lambda}{2L}$

$$\text{RAR分辨率 } \delta_x = \beta R = \lambda R / D$$

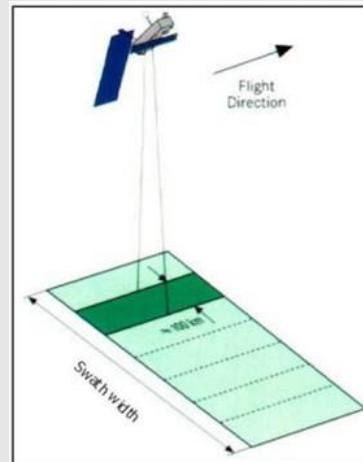
$$\text{SAR分辨率 (正侧视)} \quad \delta_a = \beta_s R = \frac{\lambda R}{2L} = D / 2$$

▶ 合成孔径雷达的分类

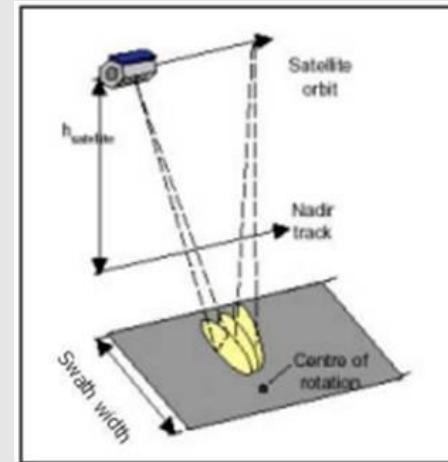


ASARS-2 on U-2
airborne Military
SAR

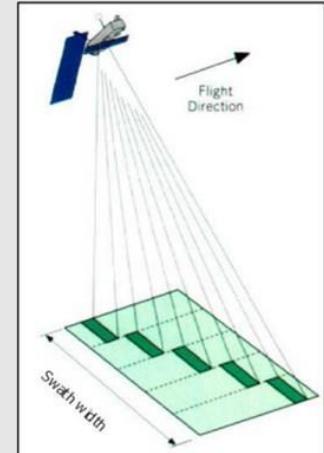
- 根据**雷达载体**的不同，分为**星载SAR、机载SAR、弹载SAR、车载SAR和无人机SAR**等；
- 根据**SAR工作方式**的不同，分为**条带式（正侧视、斜视）**、**聚束式（滑聚）**、**扫描式**等。



条带式



聚束式



扫描式

▶ 合成孔径雷达的发展

◆ 国外典型SAR系统

Optical processing
光学成像

Digital processing
数字信号处理

之前

1978

之后



SEASAT (第一颗)

NASA/JPL (美国)
L-band, 1978

ERS-1/2

ESA (欧洲)
C-band, 1991-2000/1995-至今

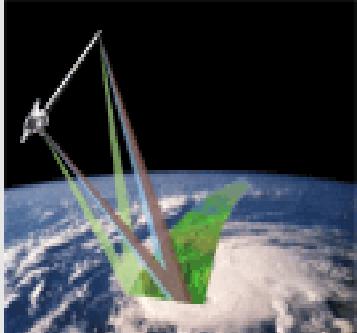
JERS-1

NASDA (日本)
L-band, 1992-1998

SIR-C/X-SAR

NASA/JPL (美国)
L-band/C-band, 1994

RADARSAT-1



RADARSAT-1

CSA (加拿大)
C-band, 1995-至今

SRTM

NASA/JPL, (美国)
C-band, 2000

ENVISAT /ASAR

ESA (欧洲)
C- band, 2002-至今

ALOS/PALSAR

JAXA (日本)
L-band, 2005

SAR Lupe

BWB (德国)
X-band ,2006

▶ 合成孔径雷达的发展



COSMOskymed
意大利
X-band, 2007



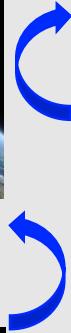
TerraSAR-X
德国
X-band, 2007



TanDEM-X
欧洲
X-band, 2010



RADARSAT-2
加拿大
C-band, 2007



#Sentinel1
Sentinels 哨兵系列卫星
欧洲 2014年开始

► 几种SAR系统参数

系统	发射时间	波段	极化	图幅宽度(KM)	分辨率(米)	重复周期	国家/机构
ENVISAT-ASAR	2002	C	VV	100-400	20	35	欧空局
ALOS-PALSAR	2006	L	Full	40-350	7-14-100	46	日本
TerraSAR-X TanDEM-X	2007 2010	X	Full	5-10-30-100	1-3-16	11	德国
Cosmo-skymed-1 、2、3、4	2007	X	Full	10-30-200	1-3-15	1-16	意大利
RADASAT-2	2007	C	Full	10-500	3-100	1-24	加拿大
ALOS-PALSAR2	2014	L	Full	25/35/60/70 /350	1/3/6/10 /100	14	日本
Sentinel-1A	2014	C	Full	20/80/100/2 50/400	5/20/40	12	欧空局



多频段、多极化、高分辨率

▶ 合成孔径雷达的发展

◆ 我国典型星载SAR系统

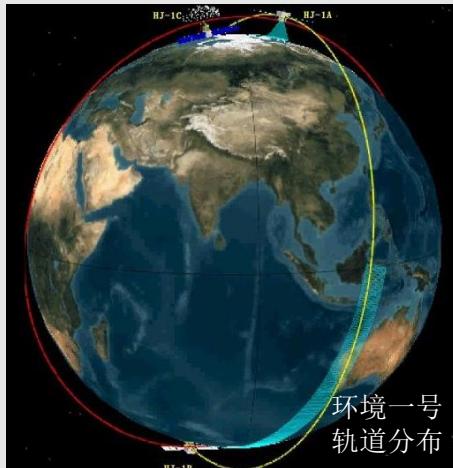
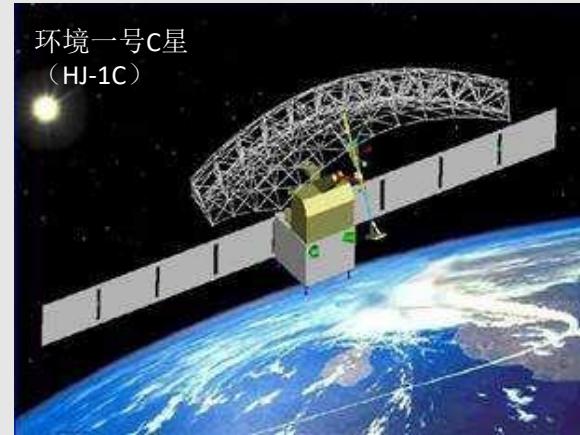
- 环境一号C星 (HJ-1C) 2012年11月19日发射

➤ S波段SAR

➤ 高分辨率: 5米 (条带模式、40km幅宽)

20米 (扫描模式、100km幅宽)

➤ 与环境一号A星 (HJ-1A)、B星 (HJ-1B) 组成卫星系统, 用于环境与灾害预测预报



遥感平台	有效载荷	空间分辨率 (m)	幅宽 (km)	重访时间
HJ-1A	CCD相机	30	360 (单台) 700 (多台)	4
	高光谱成像仪	100	27	4
HJ-1B	CCD相机	30	360 (单台) 700 (多台)	4
	红外多光谱相机	150 (近红外) 300	720	4
HJ-1C	合成孔径雷达 (SAR)	5 (单视) 20 (4视)	40 (条带) 100 (扫描)	4

▶ 合成孔径雷达的发展

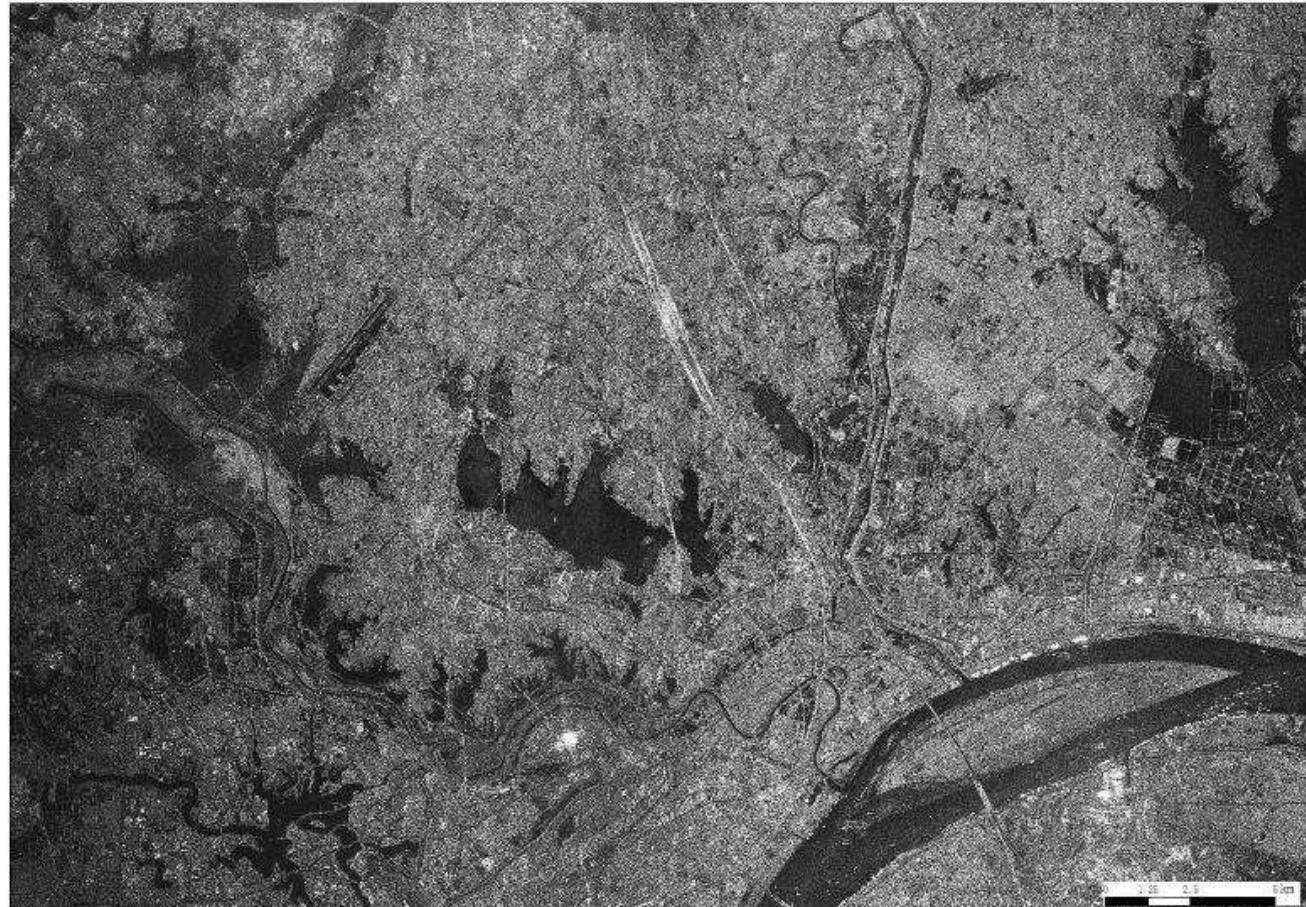
◆ 我国典型星载SAR系统

- 2012年12月9日 HJ-1C

对地观测合成孔径影像图

环境一号C星武汉地区SAR图像

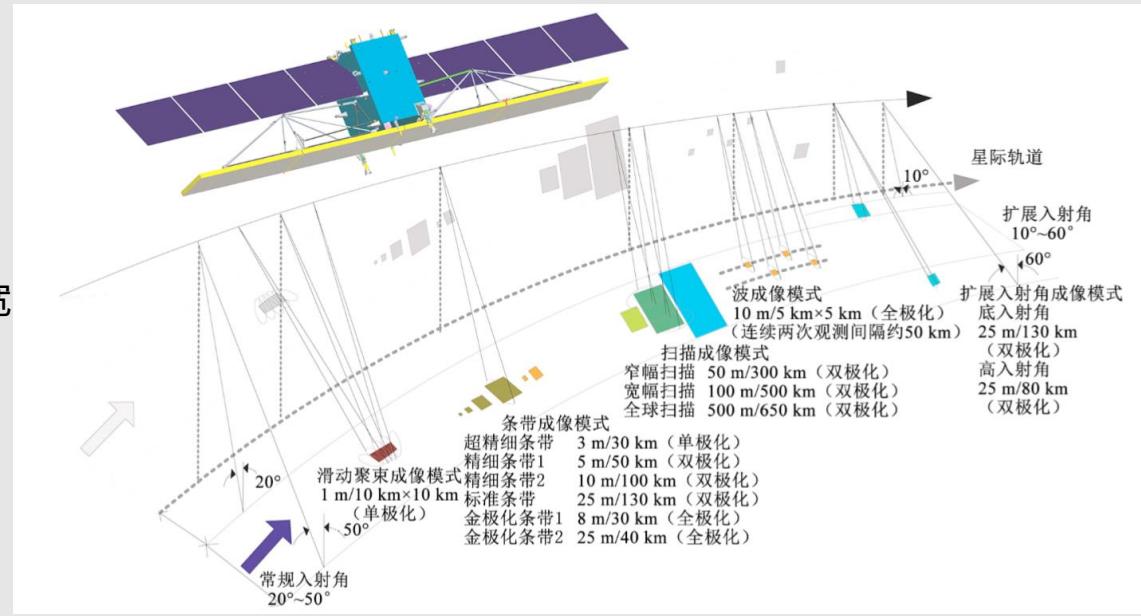
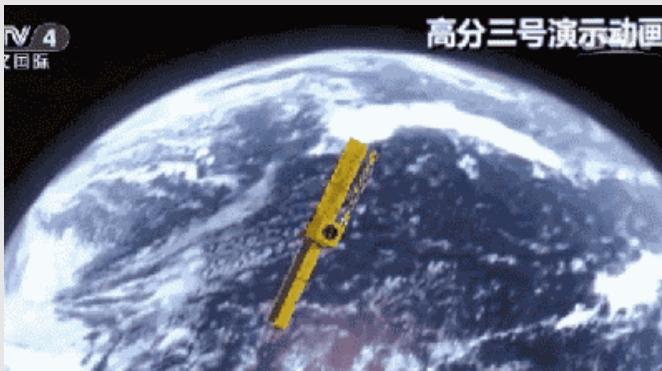
- 影像图图像清晰
- 层次分明
- 信息丰富。



▶ 合成孔径雷达的发展

◆ 我国典型星载SAR系统

- 高分三号卫星 GF-3 2016年8月10日发射
 - C波段多极化
 - 12种成像模式，满足不同需求
 - 分辨率：1米（幅宽10米）~500米（幅宽650km）



高分三号卫星构型和成像模式图

▶ 合成孔径雷达的发展

◆ 我国典型星载SAR系统 GF-3卫星

高分三号卫星影像图

高分三号卫星首都机场影像



精细条带1 (5米HH极化)

高分三号卫星厦门影像



聚束 (1米HH极化)

高分三号卫星武汉影像



聚束 (1米HH极化)

高分三号卫星天津影像



精细条带2 (10米VH极化)

▶ 双基SAR (Bistatic SAR, BiSAR)

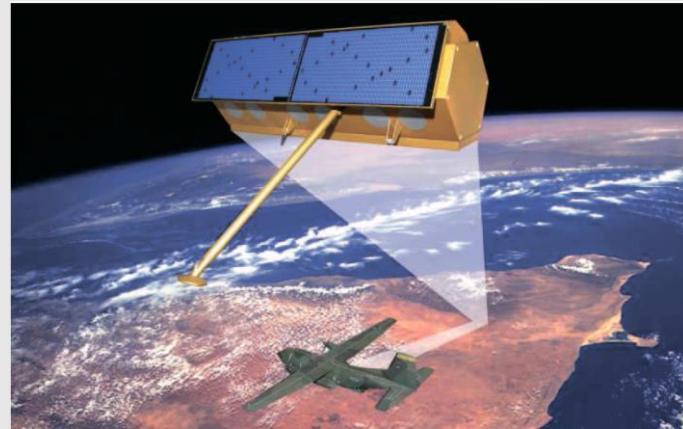
- 单基雷达：雷达发射机和接收机利用同一天线
 - 双基雷达：收发天线之间分置，如星-机双基，机-地双基等
- 德国FGAN开展的机载双基SAR成像结果



(a) 场景光学图像



(b) 场景BiSAR图像(BP算法)

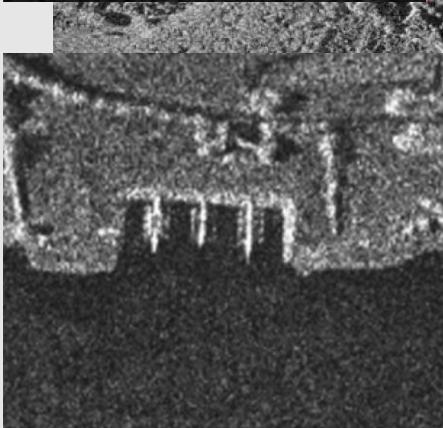
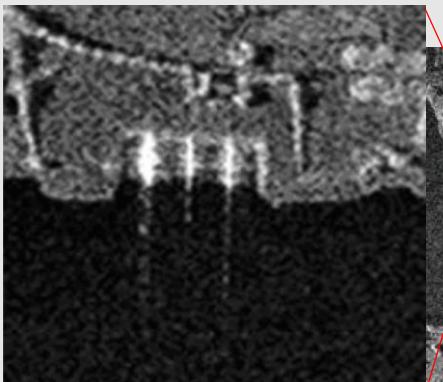


- 双基SAR优势
- 安全隐秘：接收机不发射电磁波，不易被侦察，具有安全性和抗干扰性
 - 节省成本：接收机不用装载大功率器件，利用已有的卫星资源
 - 信息丰富：对目标观测的角度更多

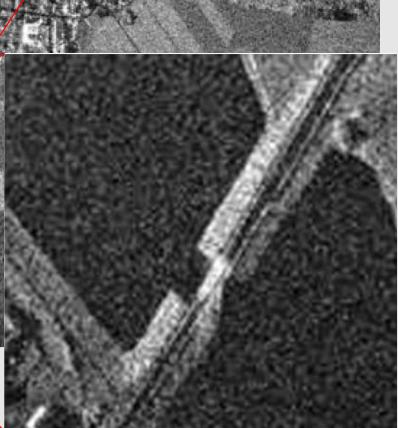
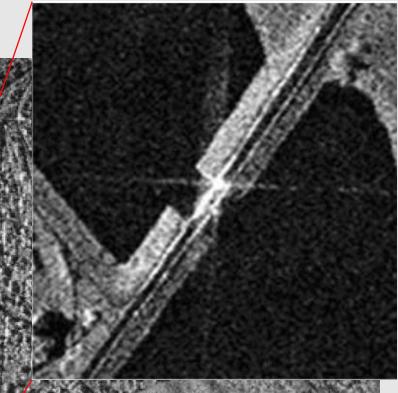
▶ 双基SAR (Bistatic SAR, BiSAR)

- 德国星载TerraSAR-X (滑聚模式) / 机载PAMIR (滑聚模式) 双基实验结果

机载PAMIR
单基成像结
果



机载PAMIR
单基成像结
果



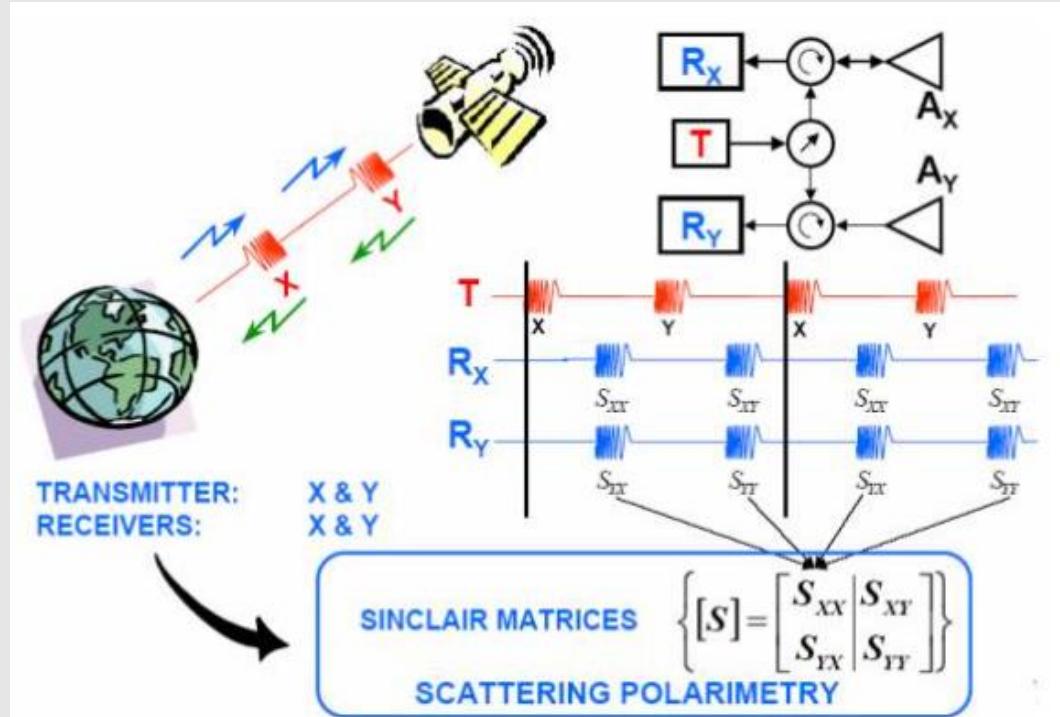
TerraSAR-
PAMIR双基
成像结果



► 极化合成孔径雷达 (Polarimetric SAR, PolSAR)

在合成孔径雷达的基础上引入极化理论，拓展SAR应用领域，**获取目标的极化散射特性**

□ 目标的极化散射矩阵



➤ 极化SAR成像核心：
将极化散射矩阵分解为**基本散射
机理的求和形式**

► 极化合成孔径雷达 (Polarimetric SAR, PolSAR)

➤ GF-3获取数据处理后的极化SAR图像-黑龙江黑河西

图像获取时间：2017-05-31

处理方法：多视平均、滤波、

Pauli分解、伪彩色合成

$$|S_{\text{HH}} - S_{\text{VV}}|$$

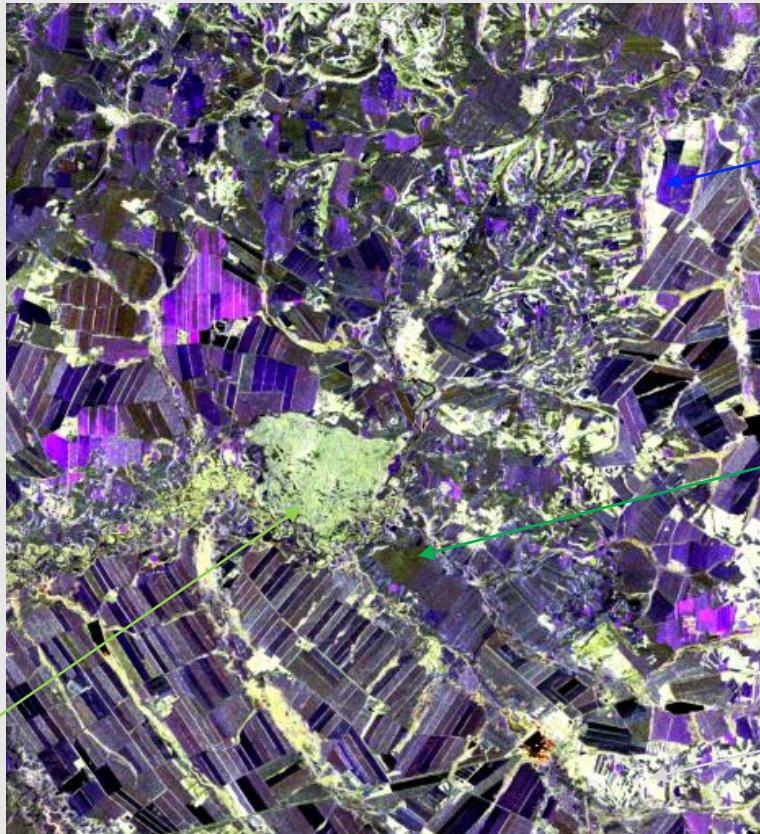
—红色，代表偶次散射；

$$|S_{\text{HV}}|$$

—绿色，代表交叉极化；

$$|S_{\text{HH}} + S_{\text{VV}}|$$

—蓝色，代表奇次散射



亮绿色：

交叉极化

覆盖体散射地物的山区

农田以蓝色和绿色为主

偏蓝色：

表面散射成分居多
植被越稀疏

偏绿色：

交叉极化居多
植被越浓密

亮白色：居民区

偶次散射、交叉极化、
表面散射都很多

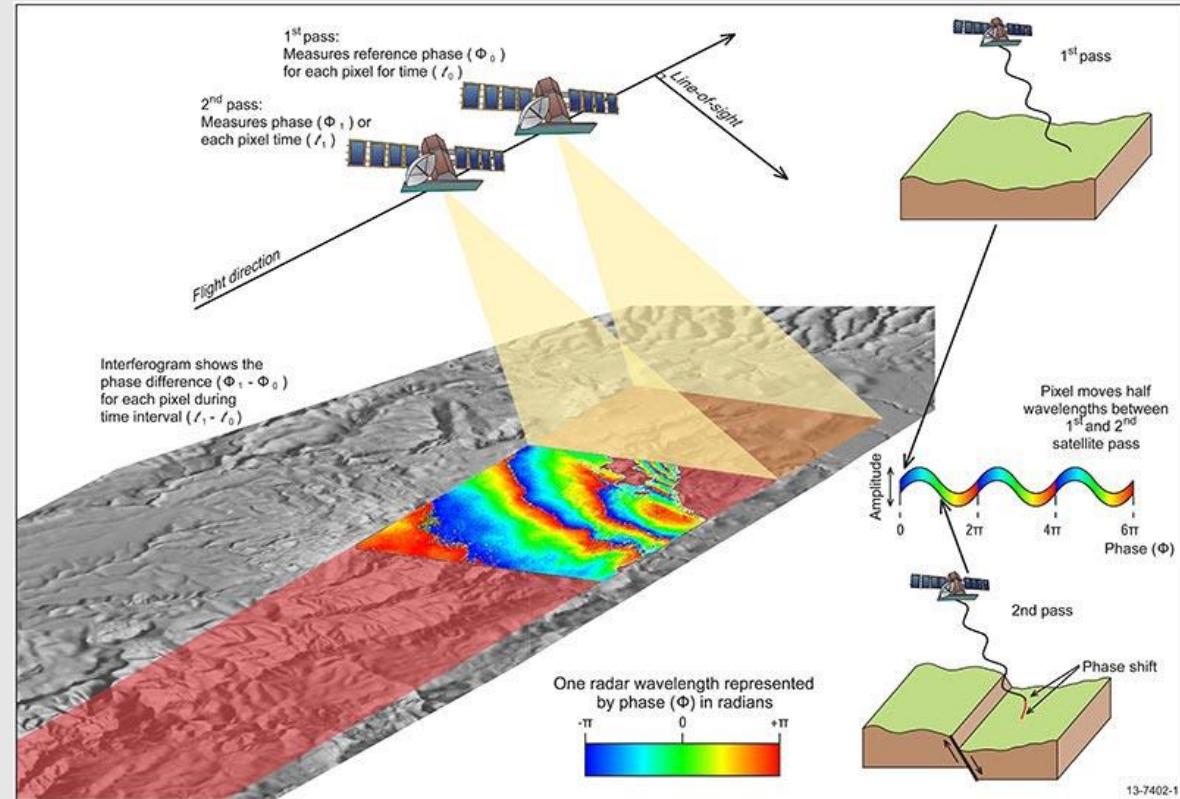
▶ 干涉合成孔径雷达 (Interferometric SAR, InSAR)

□ 传统合成孔径雷达的局限:

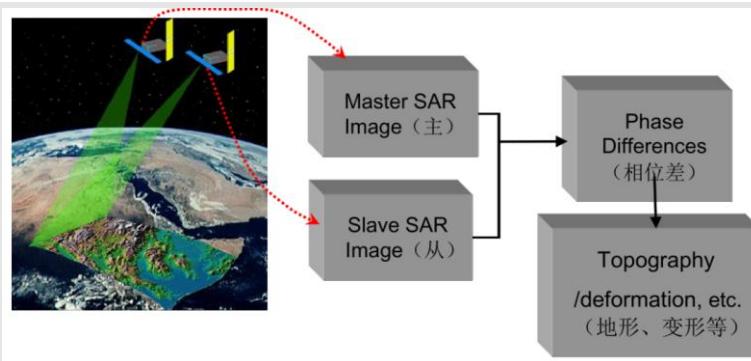
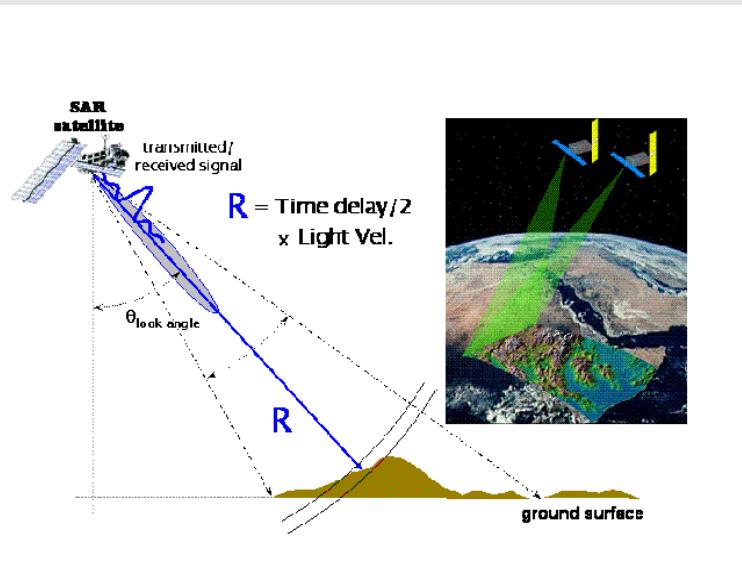
将三维目标空间投影到二维（距离-方位）空间进行成像

□ 干涉合成孔径雷达的优势:

获取目标第三维高度，实现地形高程测绘



▶ 干涉合成孔径雷达 (Interferometric SAR, InSAR)

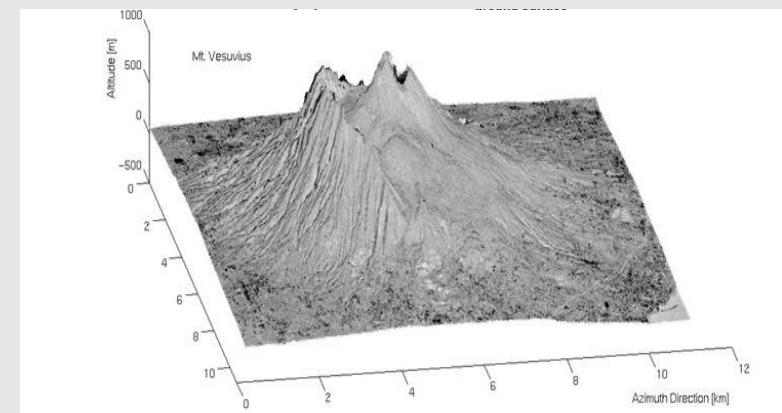


□ InSAR原理

利用**两幅视角不同SAR图像的相位差**, 结合雷达系统参数和轨道参数反演目标第三维高程值。

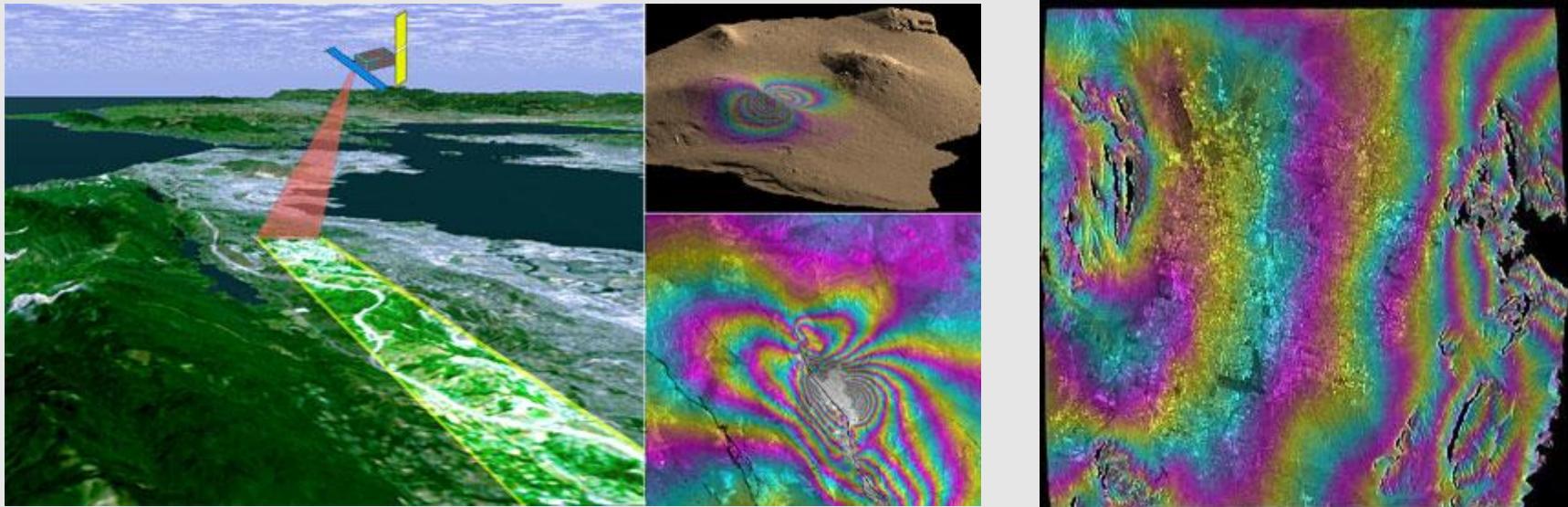
□ 两幅SAR图像

- 同一平台在不同时间获取, 如卫星重返
- 垂直于轨道上放置两根天线



▶ 干涉合成孔径雷达应用

- 实例1——地图测绘

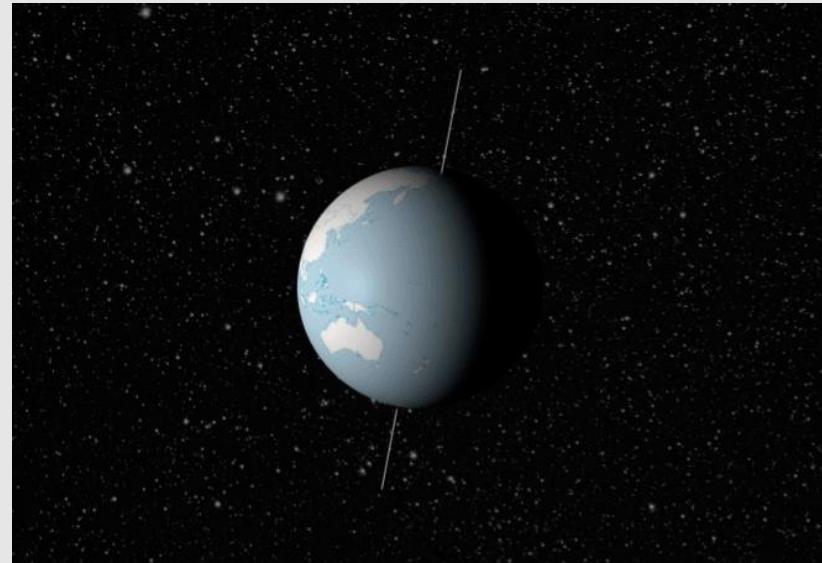
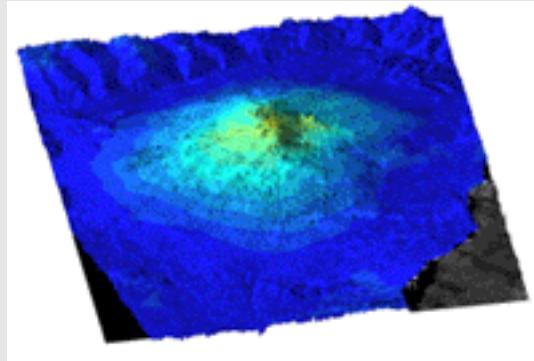


根据InSAR提取的地形高度

▶ 干涉合成孔径雷达应用

● 实例2——地面运动监测

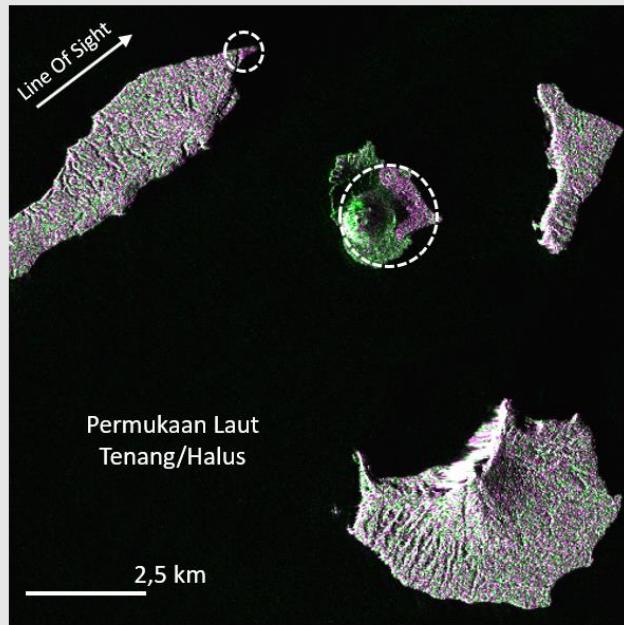
巴西利用InSAR技术探测地球表面运动



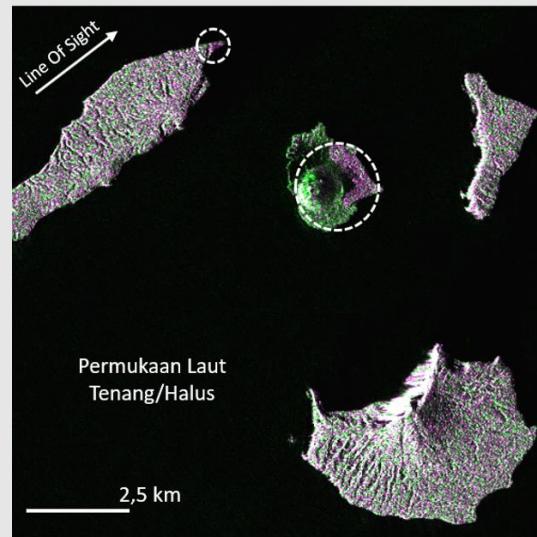
▶ 干涉合成孔径雷达应用

● 实例3——火山运动监测

利用InSAR技术研究火山地形变化情况，通过对火山的运动规律分析，进行火山爆发的预测研究。

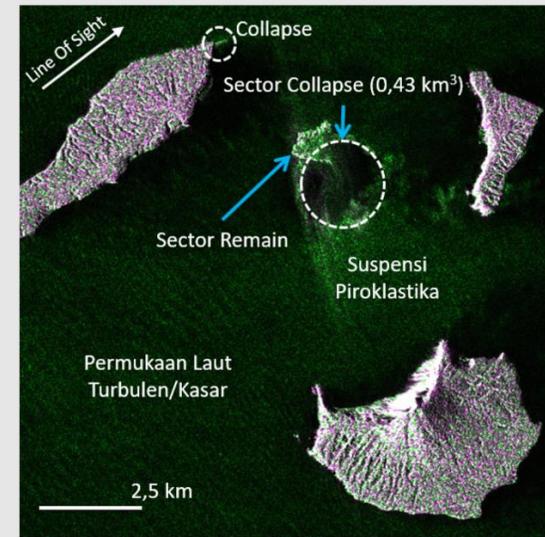


Sentinel-1A, 19 Desember 2018 Pkl.
18.23 WIB (R,G,B=VH,VV,VH)



Sentinel-1A, 19 Desember 2018 Pkl.
18.23 WIB (R,G,B=VH,VV,VH)

火山喷发前



Sentinel-1B, 25 Desember 2018 Pkl.
18.23 WIB (R,G,B=VH,VV,VH)

火山喷发后

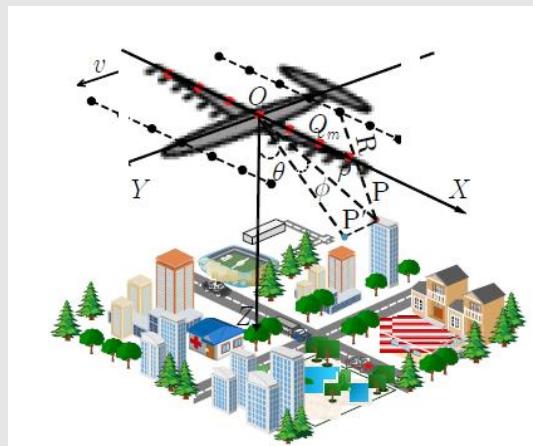
2018年12月22日至25日，火山喷发，火山侧翼塌陷0.43 km 以上。

▶ 三维合成孔径雷达 (three-dimensional SAR, 3-D SAR)

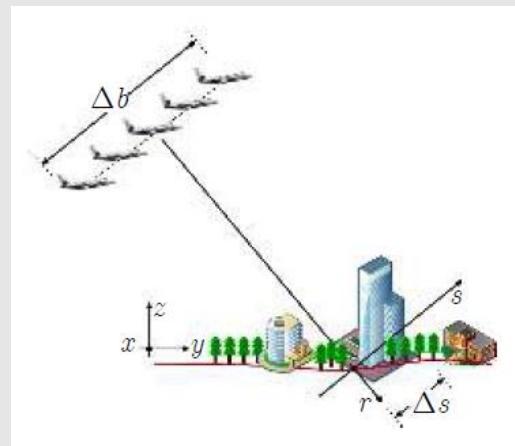
常规SAR成像: 仅能获取二维图像, 图像具有叠掩、透视缩短、阴影等畸变现象

三维SAR成像技术: 实现三维分辨, 解决叠掩问题和透视缩短、顶底倒置等几何形变问题

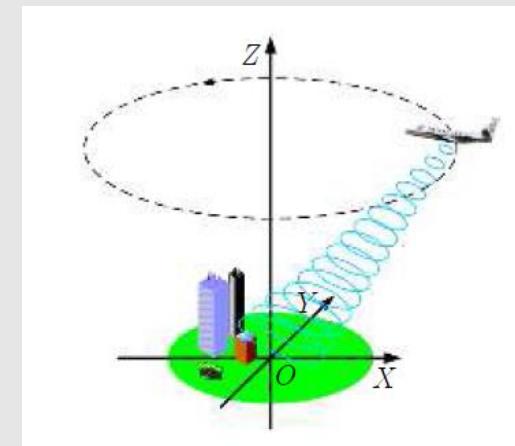
□ 典型三维SAR成像模式



阵列SAR



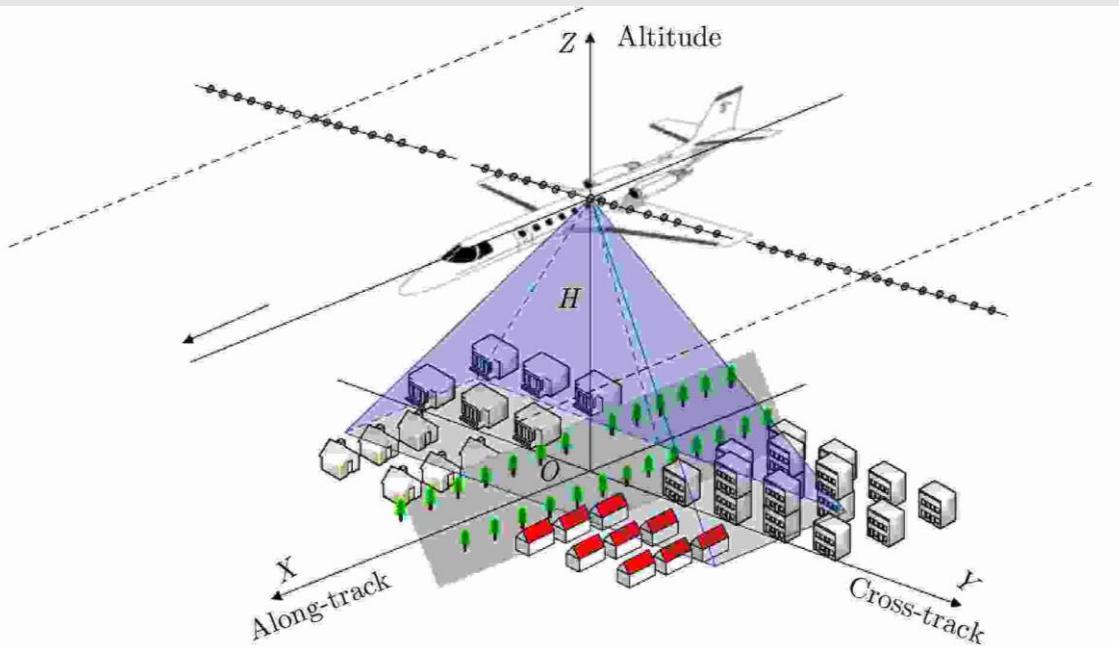
层析SAR



圆周SAR

▶ 三维合成孔径雷达 (three-dimensional SAR, 3-D SAR)

➤ 线性阵列SAR (Linear Array SAR, LASAR)



沿航迹向：平台运动

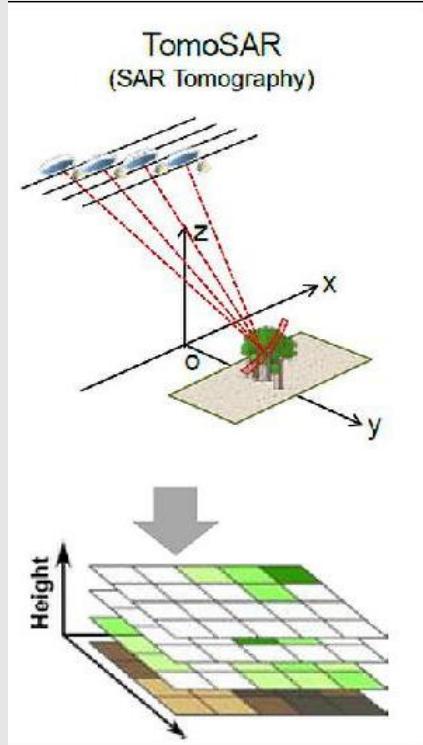
切航迹向：排布阵列

距离向（高度向）：发射宽带信号

优势：实验成本低，成像简单

▶ 三维合成孔径雷达 (three-dimensional SAR, 3-D SAR)

➤ 层析SAR (Tomographic SAR, TomoSAR)



层析SAR利用多个不同高度的天线形成垂直视线方向的孔径分量首先对场景分别进行二维成像，然后在对每个距离-方位单元进行高度向成像，从而形成三维成像结果。

距离向：发射宽带信号

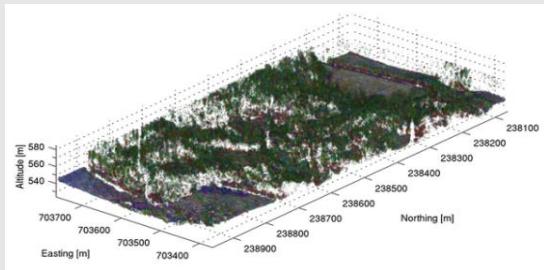
方位向：合成孔径

高度向：多航过

优势：为高分辨率（高度向）问题提供解决方案（**优于阵列SAR**）

▶ 三维合成孔径雷达 (three-dimensional SAR, 3-D SAR)

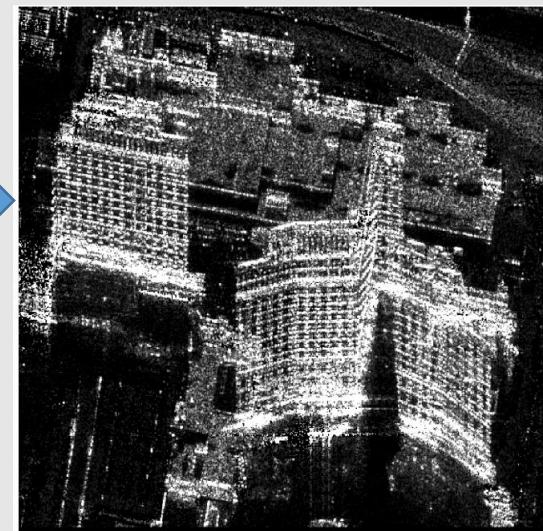
➤ 层析SAR (Tomographic SAR, TomoSAR)



层析成像E-SAR平台和植被成像结果



Bellagio hotel 光学图像 (Google)



TerraSAR-X 层析SAR三维成像

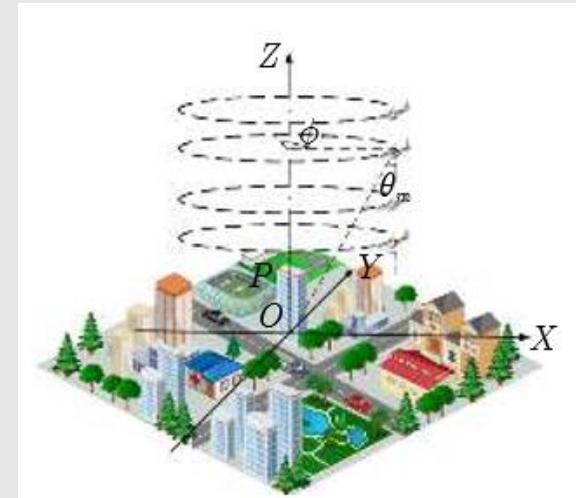
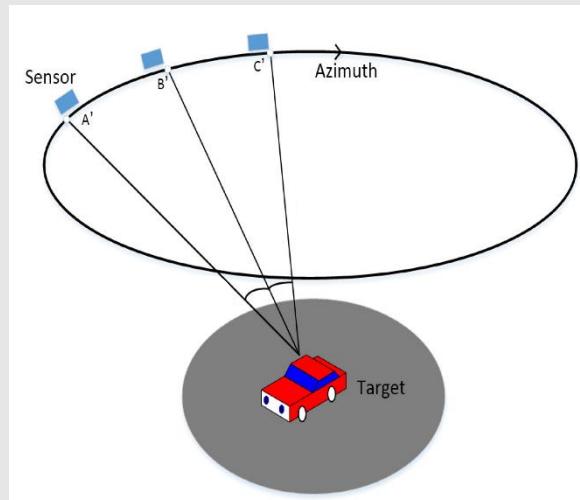
▶ 三维合成孔径雷达 (three-dimensional SAR, 3-D SAR)

➤ 圆周SAR成像 (Circular SAR, CSAR)

- 通过圆周轨迹运动，形成**二维孔径**，是特殊的聚束式SAR
- 能够提高方位向频谱，实现**高分辨成像**
- 360°观测，可获取**目标全方位散射信息**
- 具有**持续成像**的能力



视频SAR



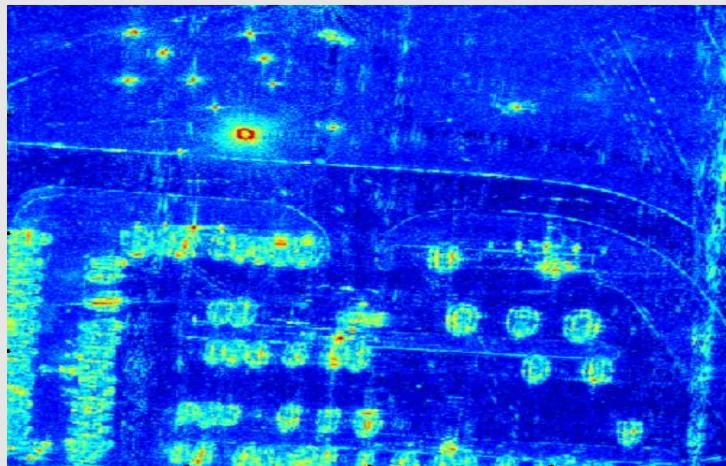
圆迹SAR与多航过圆迹SAR

应用：

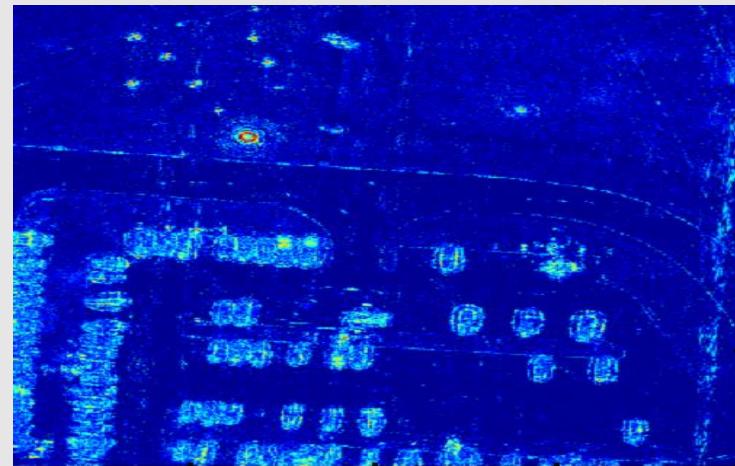
- 无人机装载圆周SAR，获得敌方隐蔽目标的全方位信息
- 安检

▶ 三维合成孔径雷达 (three-dimensional SAR, 3-D SAR)

➤ 圆周SAR成像处理



传统成像方法

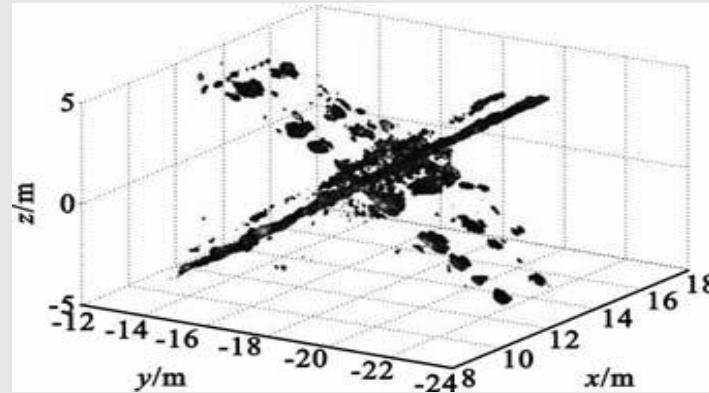
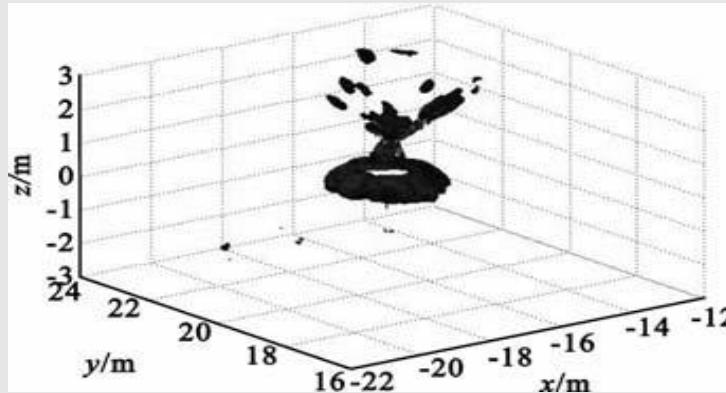


超分辨率成像方法

美国空军AFRL实验室，机载GOTCHA圆周数据

▶ 三维合成孔径雷达 (three-dimensional SAR, 3-D SAR)

➤ 圆周SAR成像处理结果

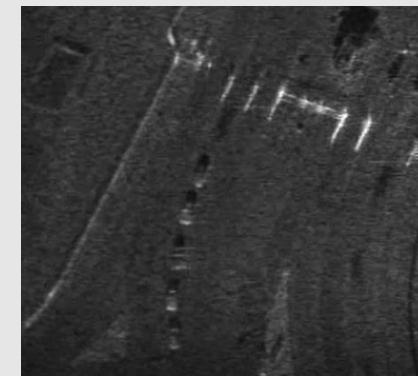


▶ 视频SAR

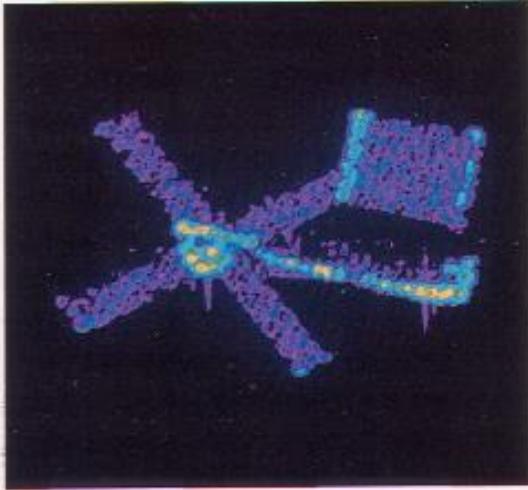
- 美国圣地亚实验室视频SAR实验，科特兰空军基地出入口



- 图中移动的阴影即为汽车
- 汽车停止时**阴影的头部**出现汽车聚焦图像



- 汽车启动后头部的图
像散焦，重新变为移
动的阴影



目录

Contents

- 1 雷达是什么?
- 2 成像雷达
- 3 合成孔径雷达成像
- 4 逆合成孔径雷达成像

上：美国Skylab空间站

下：ALCOR ISAR成像结果，1973

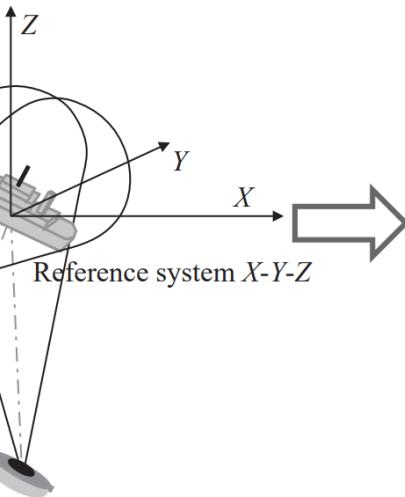
▶ 逆合成孔径成像(Inverse SAR, ISAR)

□ 传统ISAR定义：雷达静止，目标运动

聚束SAR构型

(a)

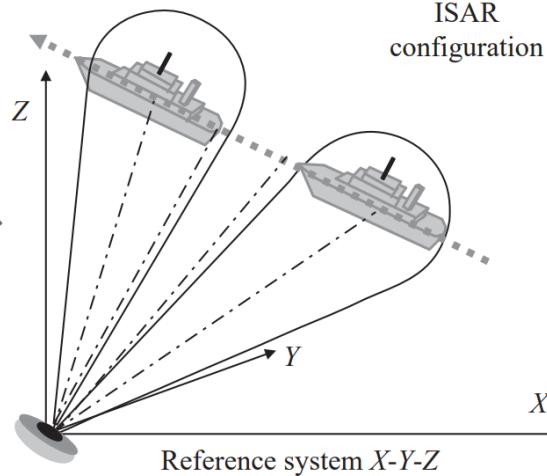
Spotlight SAR
configuration



ISAR构型

(b)

ISAR
configuration



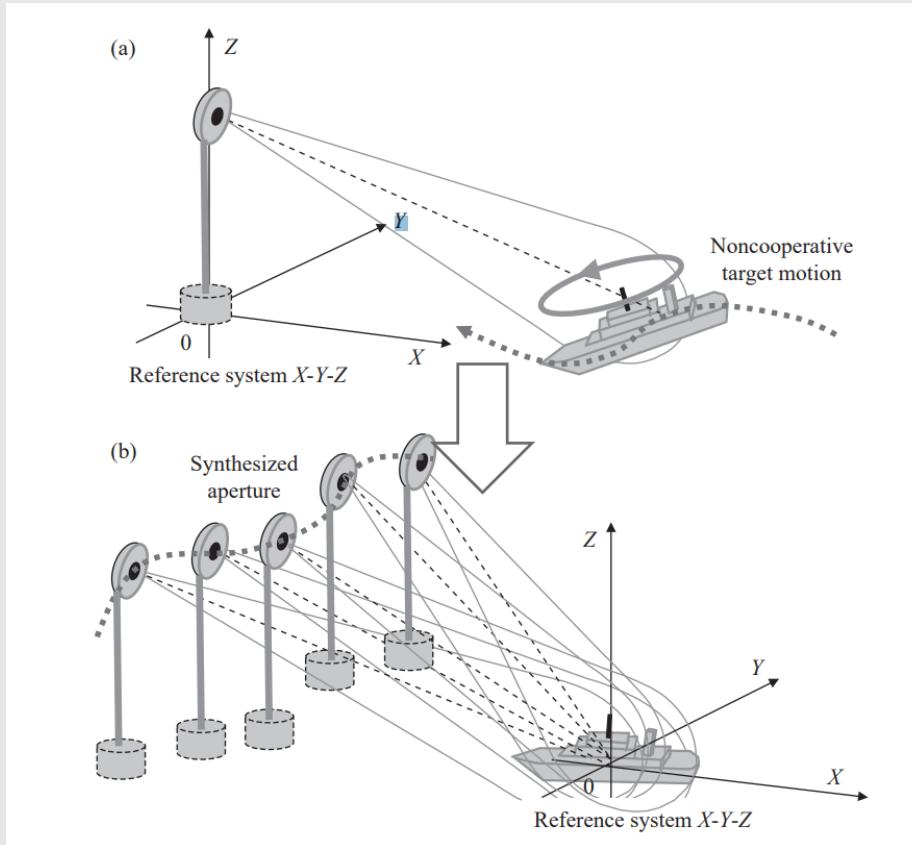
雷达飞行平台运动合成孔径

目标运动合成孔径

SAR和ISAR的区别仅在于雷达目标的相对运动关系？

ISAR有没有研究意义？

▶ 逆合成孔径成像ISAR



在实际应用中，ISAR观测的**目标非合作**

➤ 目标非合作ISAR构型



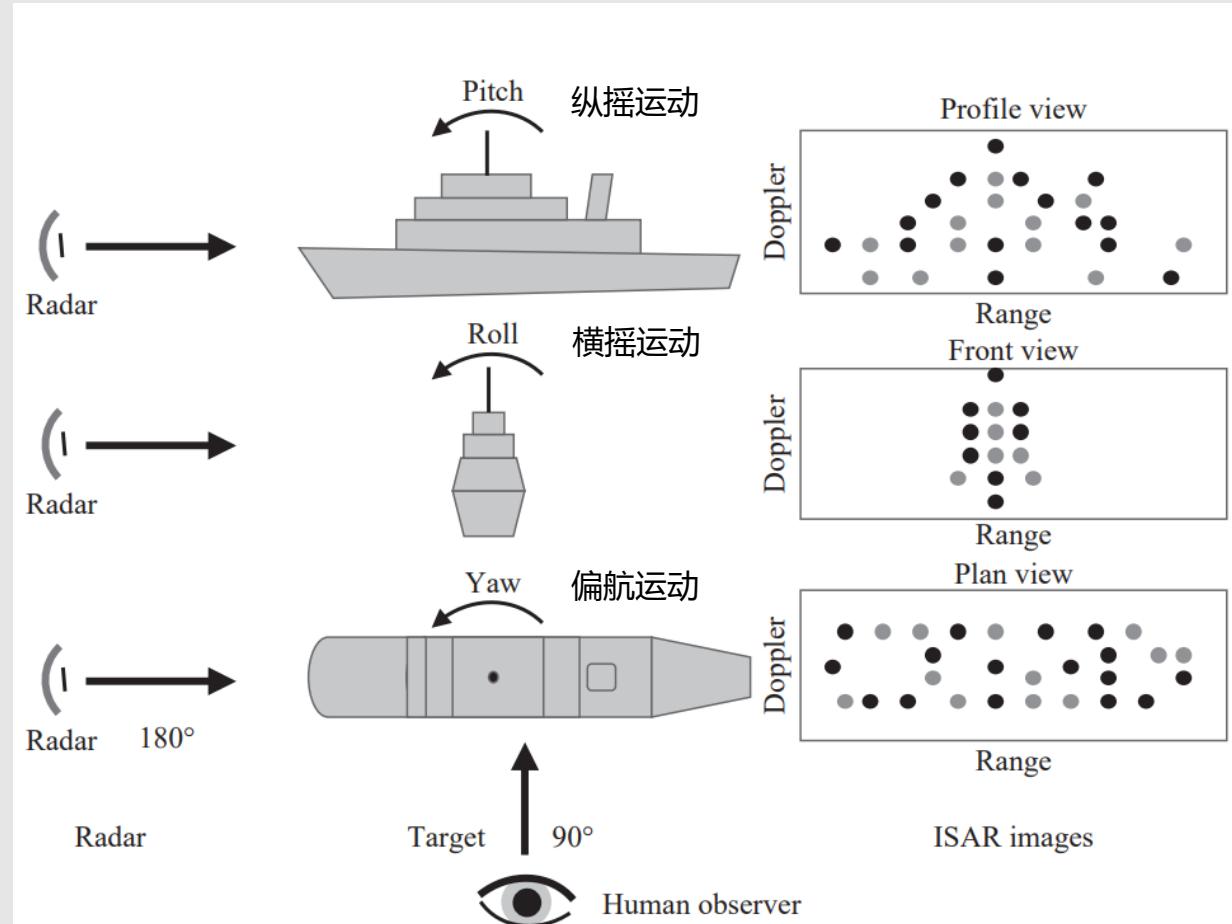
➤ 等效的合成孔径，未知不可预测曲线

ISAR研究的问题：精确的运动误差补偿、
ISAR成像算法、目标识别与分类

▶ 逆合成孔径成像ISAR

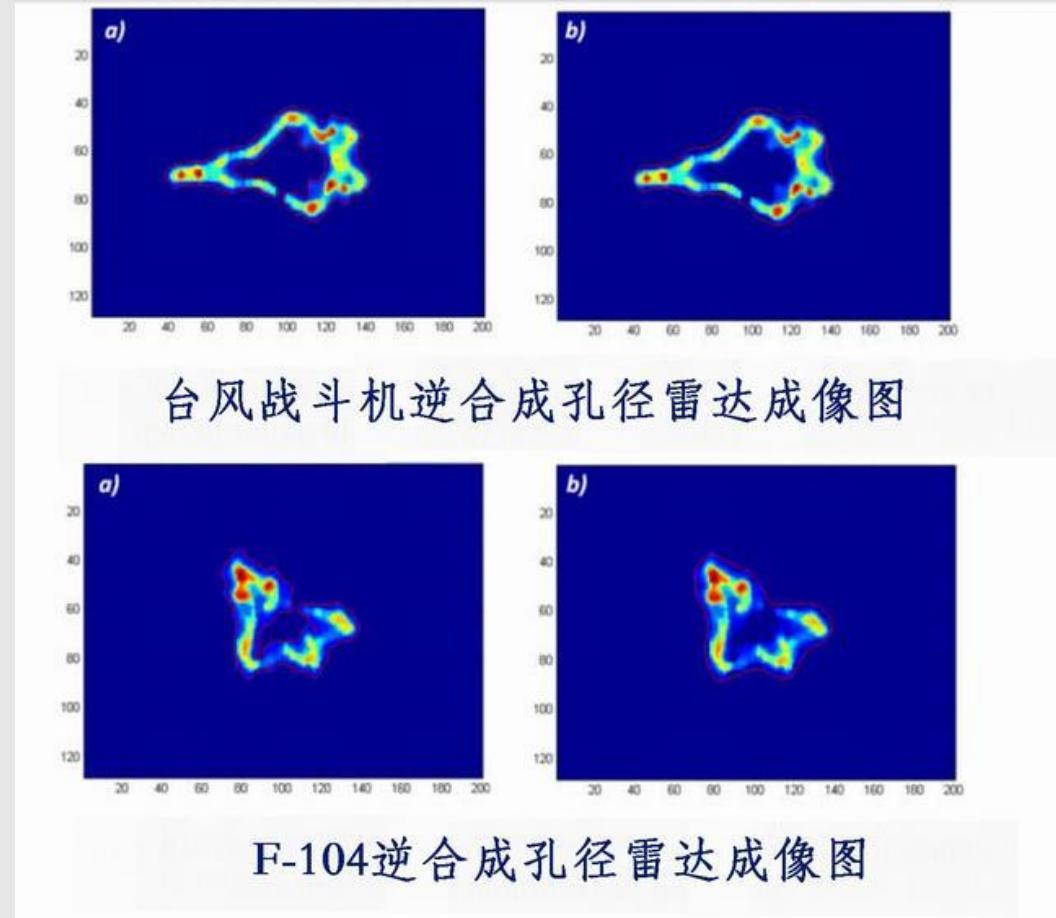
□ 与光学图像的区别

- 投影平面不同
- 雷达视线方向和人眼视线方向差90°
- 人眼直接看船体的侧视、前视、下视图
- ISAR通过船体的**纵摇**、**横摇**、**偏航运动**获得船体**侧视**、**前视**、**下视图**



▶ 逆合成孔径成像ISAR应用

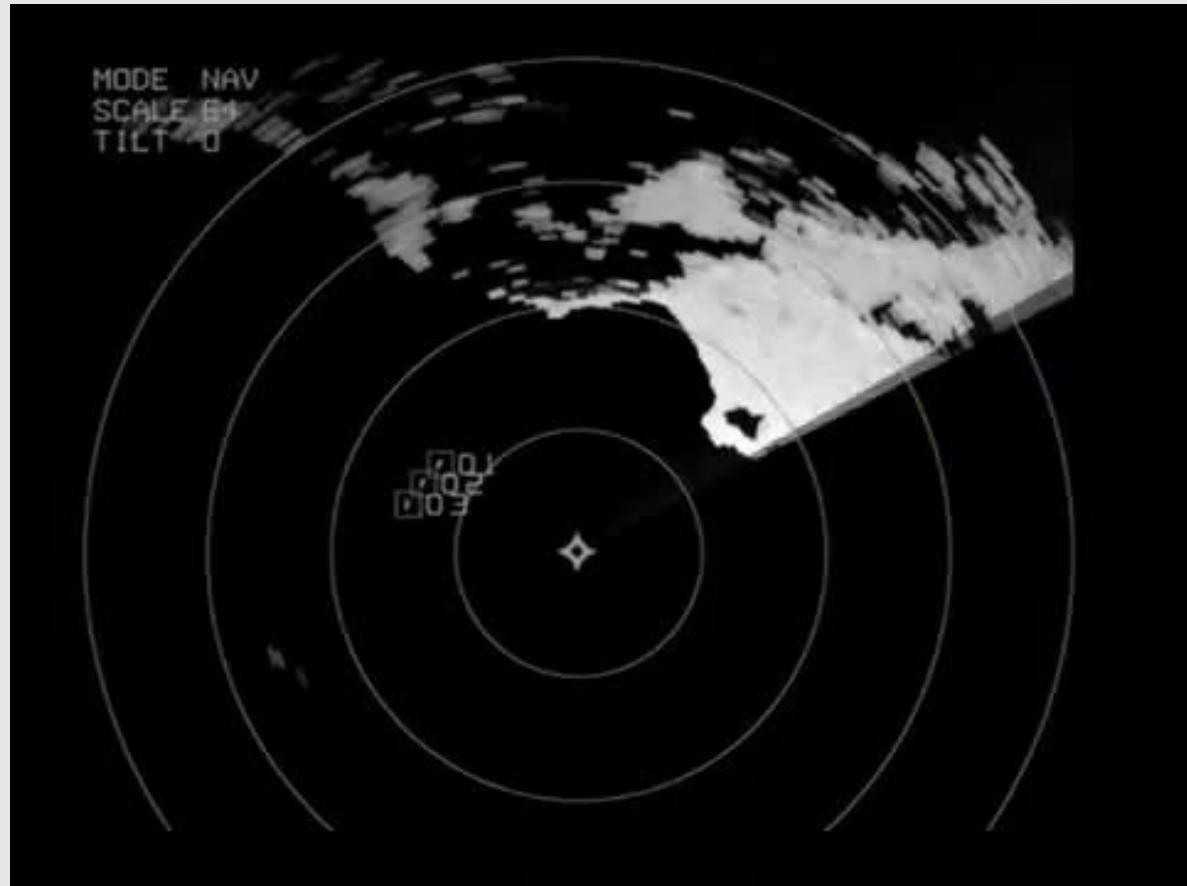
➤ ISAR战斗机成像测试



▶ 逆合成孔径成像ISAR应用

➤ ISAR舰船识别（视频）

ISAR舰船成像结果

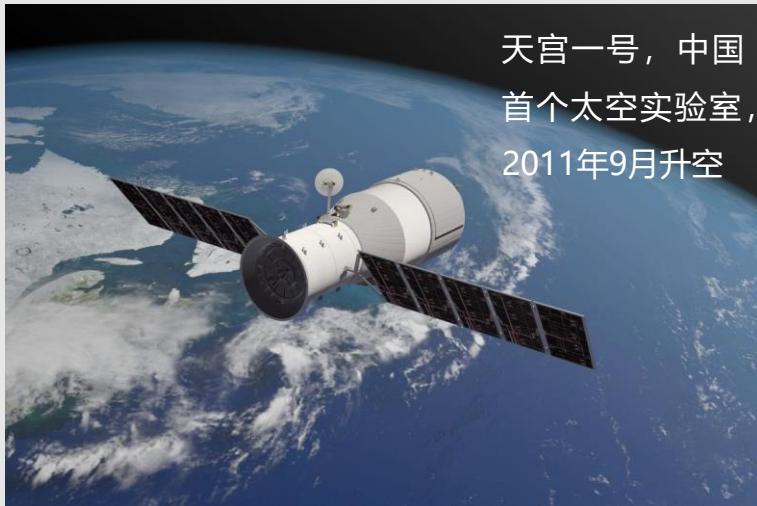


▶ 逆合成孔径成像ISAR应用

➤ ISAR卫星识别

2018年3月-4月，德国弗劳恩霍夫高频物理和雷达技术研究所(Fraunhofer FHR)的科学家利用TIRA(跟踪及成像雷达)拍摄了天宫一号重返地球的“画面”

TIRA系统包括一个**Ku波段逆合成孔径成像雷达**和一个L波段跟踪雷达

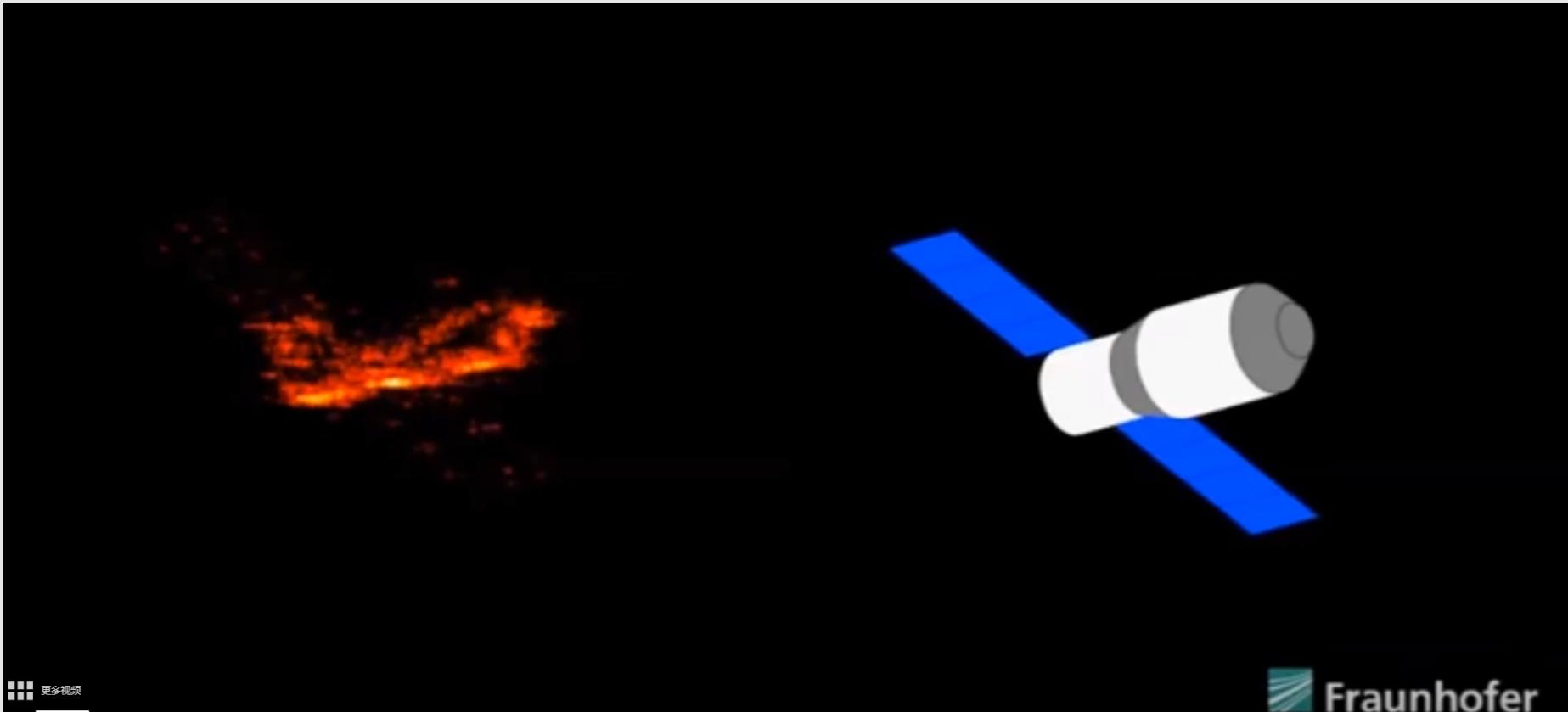


TIRA系统所用34m抛物线天线



▶ 逆合成孔径成像ISAR应用

- ISAR卫星识别（视频）



▶ 新体制成像雷达

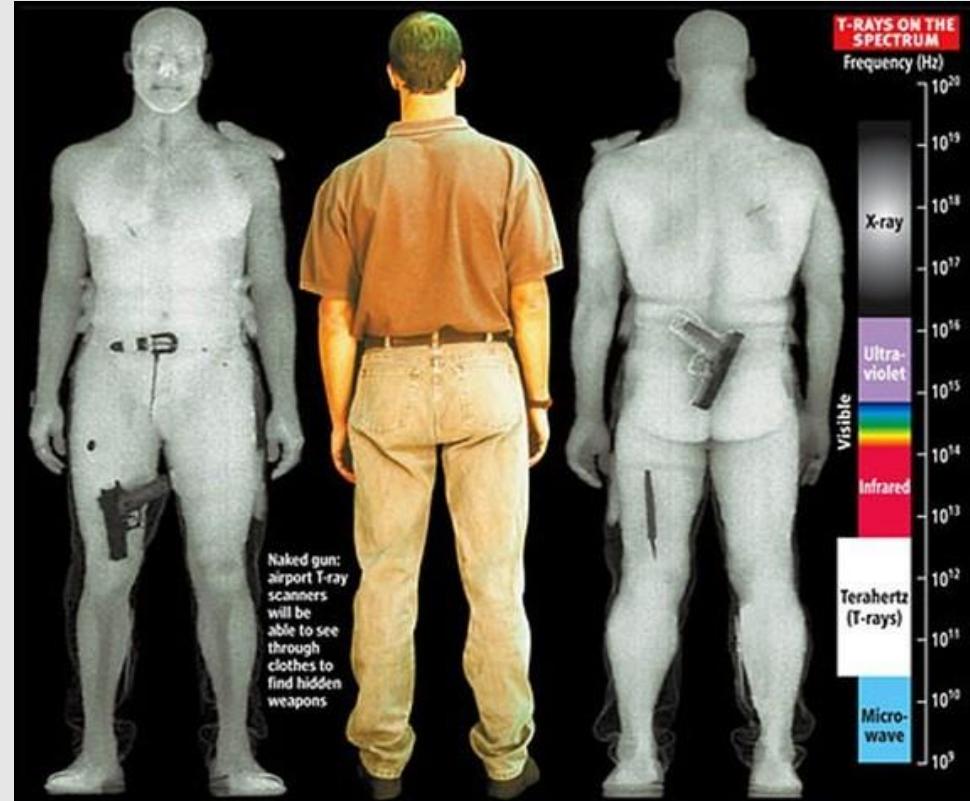
口太赫兹雷达

口量子雷达

口激光雷达

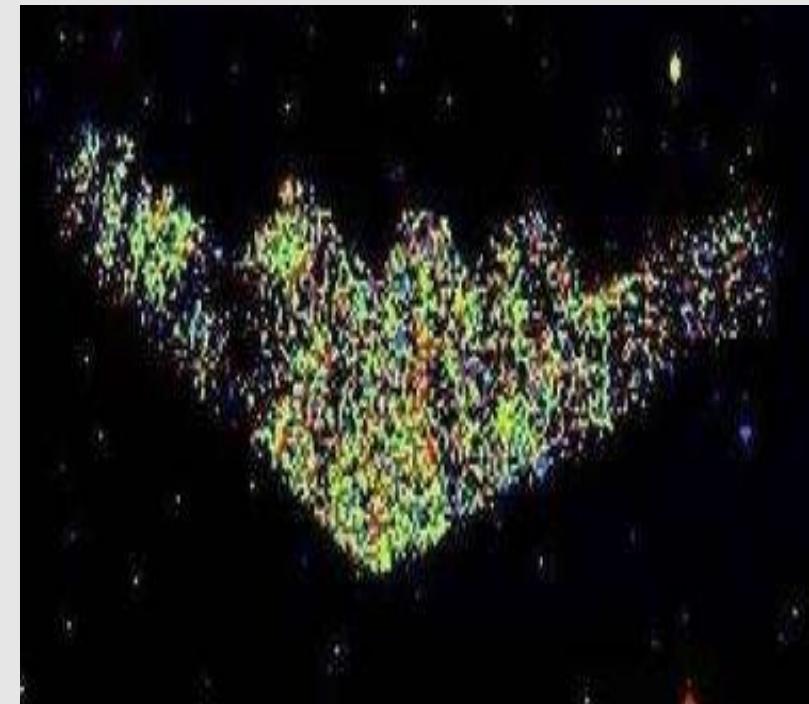
▶ 新体制成像雷达

太赫兹雷达用于安检



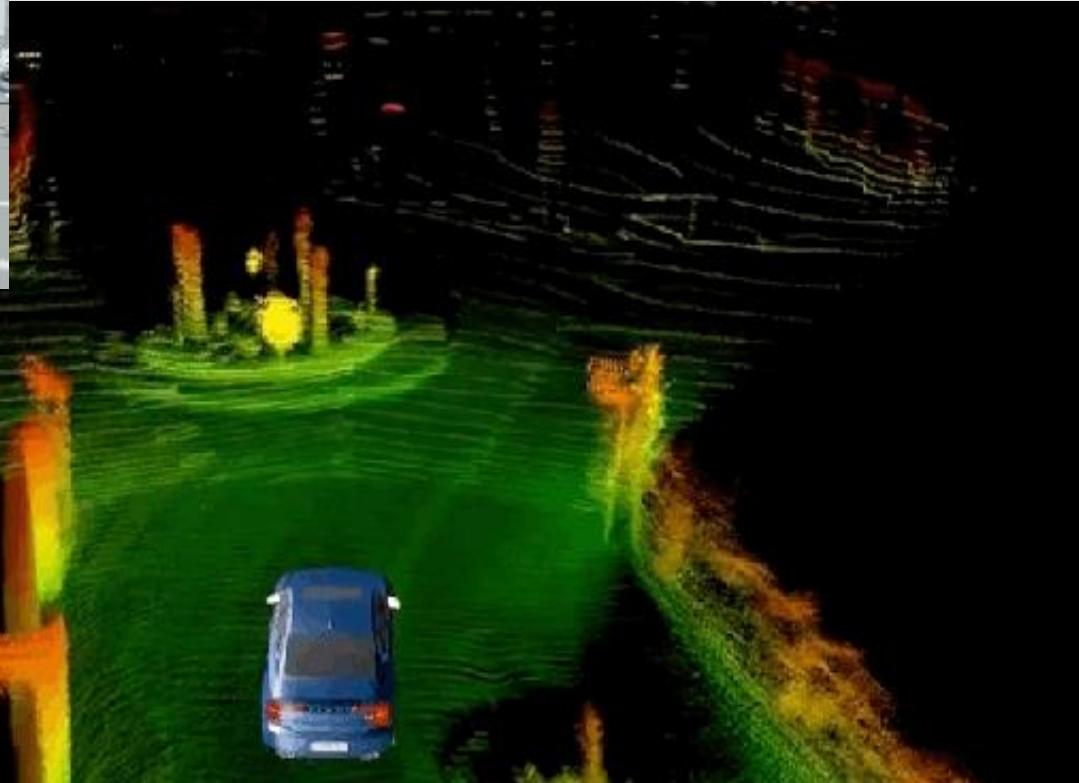
▶ 新体制成像雷达

量子雷达用于隐身飞机探测



▶ 新体制成像雷达

激光雷达用于智能无人驾驶



Mission: Magellan

Target: Venus

Image Credit: NASA/JPL/USGS



电子科技大学
University of Electronic Science and Technology of China

走进雷达成像
看世界的另一双“眼”

张晓玲 信息与通信工程学院

Planetary Radius (km)

6048 6050 6052 6054 6056 6058 6060 6062