

文章编号: 1001-2486 (2001) 05-06

# 机载叶簇穿透超宽带 SAR 系统关键指标设计\*

周智敏, 黄晓涛, 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 对影响叶簇穿透超宽带 SAR 系统性能的三个最主要的技术参量(工作频率、极化形式和分辨率)进行了深入系统的分析, 其结论性意见对超宽带雷达系统顶层设计有实用参考价值。

**关键词:** 叶簇穿透; 超宽带 SAR; 频率; 极化; 分辨力; 指标设计

中图分类号: TN958 文献标识码: A

## Design of Key Specifications for Airborne FOPEN UWB SAR

ZHOU Zhi-min, HUANG Xiao-tao, LIANG Dian-nong

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** This paper thoroughly analyzes the three most important factors that govern the foliage penetration capability of UWB SAR: operational frequency, polarization and resolution. Our conclusions are of significant values to the top-level design of UWB SAR.

**Key words:** Foliage penetration (FOPEN); Ultra-wideband synthetic aperture radar (UWB SAR); Frequency; polarization; resolution; Specification design

叶簇穿透超宽带合成孔径雷达(FOPEN UWB SAR)能穿透叶簇/地表探测隐蔽目标并可高分辨率成像。对FOPEN UWB SAR性能影响最大的系统总体指标是工作频率、极化形式和分辨率。频率的选择在很大程度上决定了穿透叶簇探测隐蔽目标的能力,极化不但影响到穿透性能,更重要的是与获取目标信息量有关,和分辨率一起对目标识别起决定性作用。因此,这三个指标的论证可认为是系统的顶层设计。

本文重点讨论FOPEN UWB SAR工作频率、极化形式和分辨率的论证方法,并对三者的折中考虑进行分析,最后给出结论性意见。

### 1 中心工作频率

选择FOPEN UWB SAR的工作频率,关键是确定中心工作频率,因为信号带宽取决于分辨率。重点考虑以下三方面:叶簇的衰减和后向散射;无线电频率干扰(RFI)环境;雷达系统的研制难度及应用环境。

#### 1.1 叶簇衰减和后向散射与频率的关系

叶簇对电磁波能量的衰减和后向散射,是影响雷达探测叶簇覆盖隐蔽目标的主要因素。高频段SAR不能探测叶簇覆盖隐蔽目标,主要是因为叶簇对雷达波衰减很大及有强的后向散射。理论分析和实验数据均表明,VHF(30MHz~300MHz)波段和UHF波段(300MHz~1000MHz)是叶簇穿透UWB SAR可选的频段,尽管L波段的电磁波对叶簇、地表也有一定的穿透能力,但与VHF/UHF波段相比,还差约10dB。

叶簇对电磁波能量的衰减与雷达频率、极化、入射角度和树木的种类都有关系,要精确地分析它们之间的定量关系是很困难的。文献[1]给出了叶簇衰减(单程)与频率关系的一个近似公式:

$$A(\text{dB/m}) = 0.25(f_{\text{GHz}})^{0.75} \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2001-07-12  
作者简介: 周智敏(1957-),男,教授。

上式中, 频率  $f$  以 GHz 为一个单位。以 UHF 频段 (350MHz) 和 X 频段 (9GHz) 为例, 当叶簇穿透路径为 15m 时, 衰减分别是 1.7dB 和 19dB。由此可见, 高频段 (如 X、Ku) 电磁波不具备叶簇穿透能力。

美国麻省理工学院林肯实验室 (MIT/LL) 于 1993 年利用机载 UWB SAR 进行了大规模的叶簇穿透电磁散射表象学试验研究<sup>[2]</sup>, 其目的是定量地得出各个频段的雷达波在穿透叶簇时的衰减量和叶簇的后向散射系数。叶簇衰减量的统计测量结果见图 1。从图中可见, VHF 波段的雷达在穿越叶簇时的双程衰减, 平均小于 UHF 波段 2dB, 小于 L 波段 15dB, 小于 C 波段 30dB 以上。实验数据表明, 随频率的降低, 叶簇衰减呈单调下降趋势。这说明雷达波在叶簇中的传输衰减与频率之间是一种较简单的关系。试验还表明, 热带雨林的衰减大于北缅因州丛林的衰减, 这是因为雨林生长茂盛, 每公顷面积内的植被密度大于北美丛林。

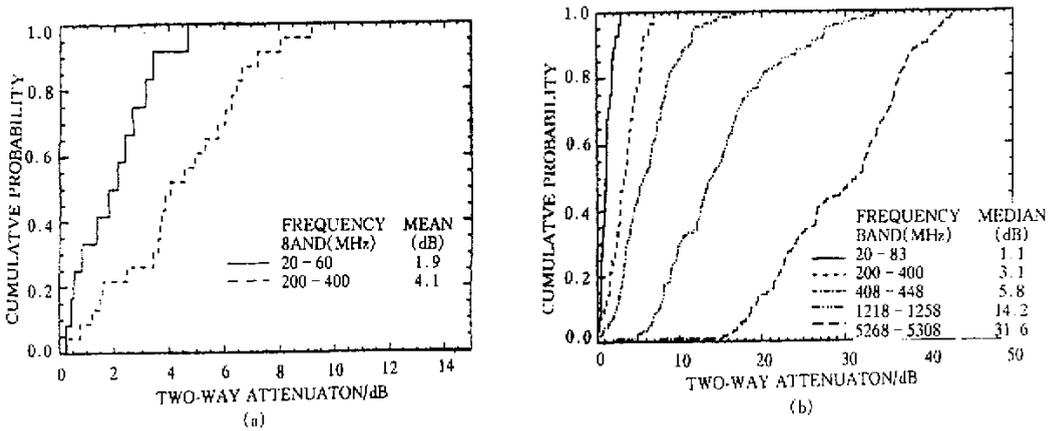


图 1 叶簇 (双程) 衰减量测量 (dB): (a) 巴拿马雨林 (b) 缅因州丛林

Fig.1 Two-way attenuation (dB) (a) Panama rain forest (b) Maine forest

对叶簇后向散射的测量结果表明, VHF 波段的平均后向散射系数  $\sigma_0$  要比 UHF 波段低 9~10dB。但与叶簇传输衰减不同的是, 叶簇后向散射的大小与频率之间并不是单调增/减关系。这说明, 影响叶簇后向散射特性的因素较复杂, 除了频率之外, 分辨率、树木种类、地形地貌等都会影响  $\sigma_0$ 。

综上所述, 可得以下结论:

- (1) VHF 波段的叶簇后向散射低于 UHF 波段, 平均低 9~10dB;
- (2) VHF 波段叶簇传输衰减 (双程) 平均小于 UHF 波段 2dB。

因此, 从穿透性能方面考虑, VHF 波段优于 UHF 波段。但选择 VHF 波段有以下不利之处:

- (1) UWB SAR 方位向分辨率进一步提高受到限制, 因为 SAR 的极限方位向分辨率为  $\rho_a \approx \lambda/4$ ;
- (2) 在 VHF 波段, RFI 比 UHF 波段更为严重;
- (3) 频率过低, 将使天线尺寸很大, 这是机载/星载 SAR 系统难以承受的。

所以, 选择 UWB SAR 工作频率范围, 不能只考虑穿透性能, 而应从系统研制的角度综合考虑。

## 1.2 射频干扰 (RFI) 环境及其特征

VHF 和 UHF 波段是 FOPEN UWB SAR 唯一可选的两个工作频段, 但在这两个频段中拥挤着大量社会公共服务体系的无线电信号, 如电视、移动通信、广播电台等, 这些信号对 UWB SAR 形成射频干扰 (RFI), 对其正常工作构成严重威胁。充分了解和掌握当地的 RFI 情况, 对开展 UWB SAR 系统试验是至关重要的。研究表明, RFI 具有以下特点:

- (1) 窄带性。与 UWB SAR 的信号带宽相比, RFI 信号可视为窄带信号, 一般为几十 KHz 至几 MHz;
- (2) 强度大。在城市区, RFI 功率电平可达 -16dBmW;

(3) 密集性。往往是多个射频发射源拥挤在一个很狭窄的频率范围内，形成一个很强的干扰源。

以长沙市区为例，在 100~500MHz 范围内，调频广播和湖南卫视台信号是两个很强的 RFI。

结论：RFI 是无法回避的问题，通过频率选择来避开 RFI 是不可能的，所能采取的积极措施就是用抑制 RFI 技术尽量减轻和消除其对 UWB SAR 成像质量的影响。而要做到这点，首先就要对 UWB SAR 工作地点周围的 RFI 环境有透彻的了解。

### 1.3 系统研制难度和应用环境

中心频率选择除要考虑穿透性能、抗 RFI 外，还应考虑雷达系统研制难度及应用环境的限制。天线受频率的影响较大，选择频率过低，将导致天线尺寸过大。对于架设在地面（轨道式、车载式）进行基础性研究的 UWB SAR 系统，对天线尺寸的限制可稍微降低一点，但对机载 UWB SAR，则必须严格控制天线的尺寸。减小天线尺寸以满足机载环境的要求，是系统设计应重点考虑的问题。

综合以上分析，频率选择，既要有优良的叶簇（地表）穿透性能，又要兼顾雷达系统研制难度以及抗 RFI。将工作频段选择在 UHF 波段较之 VHF 波段有整体优势。

## 2 极化形式

高分辨率 SAR 可对地物目标细微结构成像，故可获取较多的目标信息，但只靠提高分辨率来增加雷达目标信息是有限的，因为目标后向散射特征在更大程度上取决于雷达波的极化形式而非分辨率。充分利用极化信息对 SAR 图像判读和目标识别是极其重要的，多极化是当前 SAR 发展方向之一。

### 2.1 雷达极化信息在 SAR 目标识别中的应用

#### 2.1.1 地物目标的极化特征

目标对不同极化雷达波的响应不同，同一类目标不同极化的 SAR 图像是有差异的。HH、VV、HV 的雷达图像一般是不同的，尤其是 HV 图像，与 HH 或 VV 图像有明显的差别，目前应用较多的是 HH、VV 和 HV 极化。HV 极化回波分量比同极化回波分量低得多，但 HV 图像能给出地物目标较细微的结构，成像的灰度层次更加丰富，地物界限更分明。对树木的种类，HV 图像有较好的识别能力。表 1 总结了不同地物目标对极化波的散射特征<sup>[3]</sup>。

表 1 不同目标的极化特征

Tab.1 Polarization character of different targets

地物目标	极化特征
粗糙表面，如树林、农作物、耕地	HH 和 VV 回波基本相同
光滑平面，如河滩、水面等	HH 回波比 VV 回波低
房屋、村庄、城镇等目标	HH 回波大于 VV 回波

当波长、斜距、发射功率、俯视角等雷达系统参数确定后，后向散射系数  $\sigma^0$  就成为唯一由目标本身物理性质决定的直接与 SAR 图像灰度相关的物理参数。而  $\sigma^0$  与雷达波的极化有密切关系， $\sigma^0$  与土壤表层（2~5cm）的湿度（ $\text{cm}^2$ （水）/ $\text{cm}^2$ （土））呈线性关系<sup>[4]</sup>：

$$\sigma^0(\text{dB}) = A + BM_s \quad (2)$$

其相关系数达 0.9。式中  $A$  主要受土壤表面粗糙度影响， $B$  主要受土壤质地影响。在同向极化时， $A$  分量占主要地位。而在交叉极化时， $B$  是主要成分。因此，交叉极化的  $\sigma^0$  更能反映土壤含水量的状况，故比较同极化波和交叉极化波雷达的图像，可以鉴定农田湿度。对于有作物覆盖的农田，其后向散射系数由下式决定：

$$\sigma^0 = \sigma^0(\text{地表}) + \sigma^0(\text{植被}) + \sigma^0(\text{地 - 植被交互作用}) \quad (3)$$

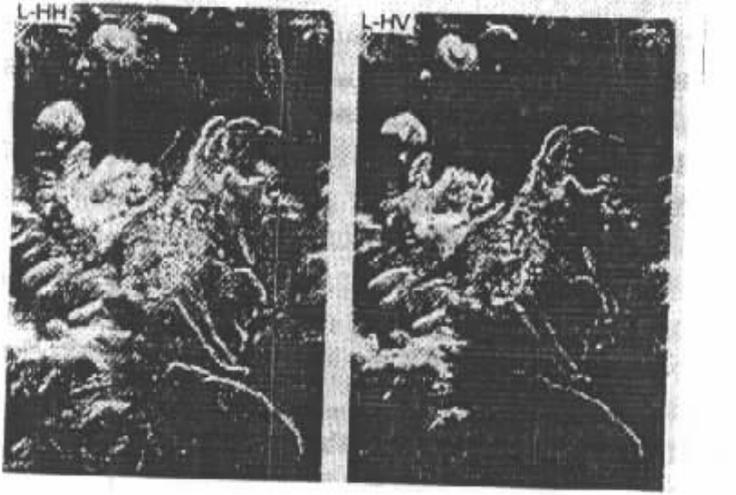
上式第三项是土壤与植被对雷达波信号交互作用，这种交互作用产生雷达波的体散射。交叉极化则可以更好的反映这部分散射所起的作用，提供更多的地物目标特征信息。

总之，不同极化的 SAR 图像反映了地物目标不同的特征与性质，将不同极化的雷达图像进行综

合处理与分析,可增强目标信息,有利于目标识别。

### 2.1.2 不同极化 SAR 成像实例

以美国航天飞机遥感雷达 SIR-C/X-SAR 对中国境内的地物目标遥感成像试验<sup>[51]</sup>为例,说明雷达极化信息在 SAR 图像理解和目标识别中的应用。该航天飞机 SAR 有三个波段:L、C、X,同时有四种极化:HH、HV、VH、VV。图 3 是 SIR-C/X-SAR 对昆仑山火山群的成像结果。从图中可见,L-HV 图像识别火山口的能力明显优于 L-HH 图像,L-HV 图像灰度层次丰富,对比度明显,能描绘



(a) L-HH 成像 (b) L-HV 成像

图 3 西昆仑火山群 SIR-C/X-SAR L 波段不同极化对比

Fig.3 SIR-C/X-SAR L band different polarization of West Kunlun volcano

出火山口的较细微结构和纹理特征。这是因为火山口熔岩形成的去极化作用使得交叉极化优于同极化。结论:以上例子充分说明了雷达极化信息在地物目标识别中的作用,将不同极化的 SAR 图像综合分析判断,可获得比单一极化图像要丰富得多的目标信息。

## 2.2 极化与穿透性能的关系

从穿透的要求考虑,极化的选择准则应是使树木和其他地物后向散射小,同时穿透损耗也要小。树木后向散射包括树冠层(叶簇)后向散射和树干后向散射,电磁波照射有植被层覆盖的地面时,其散射是一个很复杂的过程,其间既有体散射(在植被层内),又有面散射(地面)。可以将有植被覆盖的地面简化成以下模型<sup>[51]</sup>:

将植被层看成具有体散射特征的一层均匀分布的小的散射单元体,下面覆盖着具有后向散射截面为  $\sigma_s$  的地表面,而且这两种散射介质之间没有耦合。忽略掉多次散射,一层散射体的后向散射截面为:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_v \cos \theta}{2\alpha} (1 - e^{-2\alpha H \sec \theta}) \quad (4)$$

其中,  $\sigma_v$ 、 $\alpha$  分别是单元体积的后向散射截面和损耗截面;  $\theta$  是入射角;  $H$  是穿透深度。

则有植被覆盖地面的总后向散射截面:

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_s e^{-2\alpha H \sec \theta} \quad (5)$$

上式右边第一项是植被层的体散射,第二项代表地面散射。

若进一步将由植被覆盖的地面理想化为在一个粗糙表面上覆盖着由短的垂直线状散射体组成的植被层(这对草丛和庄稼以及幼小的树林更为合适),若散射体像短的垂直偶极子一样,则水平极化的入射波不会与植被发生相互作用,即植被层的体散射  $\sigma_{VHH} \approx 0$ , 损耗截面  $\alpha \approx 0$ 。于是整个散射过程变为面散射:

$$\sigma_{HH} = \sigma_{SHH} \quad (6)$$

而垂直极化入射波则与植被和地面都发生作用，体散射和面散射同时存在：

$$\sigma_{VV} = \frac{\sigma_V \cos \theta}{2\alpha} [1 - e^{-2\alpha H \sec \theta}] + \sigma_{SVV} e^{-2\alpha H \sec \theta} \quad (7)$$

有体散射就意味着在穿透植被层时有能量损耗 ( $\alpha \neq 0$ )，因此，植被的体散射对 VV 极化雷达波影响较大，而对 HH 极化波影响小。

对于较高大树木 (树干直径  $> 10\text{cm}$ )，树干的向后散射是影响 FOPEN UWB SAR 图像质量的重要因素。较粗的树干可等效为一个圆柱体，当 VHF/UHF 波段的雷达波穿透叶簇照射到树干时，会产生较强的向后散射，对成像形成杂波干扰。HH 极化电场矢量与树干相垂直，而树干直径远小于波长，故透射较好，不会有强反射。而 VV 极化电场矢量与树干平行，且树干与地面构成二面角，故将产生较强的向后散射。因此，从减小树干的影响考虑，HH 极化优于 VV 极化。

### 3 分辨率

#### 3.1 战场侦察对分辨率的要求

SAR 对不同目标侦察时其分辨率的要求不同，根据 1996 年欧洲 SAR 会议公布的图像判读标准<sup>[6]</sup>，可为分辨率的选择提供依据。为探测、识别卡车、坦克等战术目标，分辨率应为 1 米或亚米级。

#### 3.2 影响 SAR 分辨率的因素

从理论分析角度，SAR 的极限分辨率是：距离向： $\rho_r = c/2B$ ，方位向： $\rho_a = D/2$ 。其中  $B$  为信号带宽； $D$  为天线尺寸。一个实际的 SAR 系统其分辨率由系统冲激响应的主瓣  $-3\text{dB}$  宽度决定，任何影响冲激响应形状的因素，都对 SAR 分辨率存在一定的影响。对 FOPEN UWB SAR 而言，影响系统分辨率的因素主要有以下几方面。

##### 3.2.1 叶簇衰减的影响

叶簇对雷达波的衰减，具有低通滤波器效应，对 FOPEN UWB SAR 成像的影响体现在三个方面：一是降低了目标向后散射强度，使 SAR 图像上目标灰度值变小；二是展宽了目标脉冲的时域宽度，从而降低 SAR 的空间分辨率。对于  $20\text{dB}$  的叶簇衰减，脉冲宽度展宽近 1.6 倍<sup>[11]</sup>。在 VHF 波段，这一影响比 UHF 波段的明显。三是使目标成像的旁瓣电平上升，从而影响到强目标附近弱目标的分辨与识别。

##### 3.2.2 成像处理的影响

###### (1) 加权处理

对线性调频 (LFM) 信号体制 SAR，一般用匹配滤波作脉压处理，为降低脉压后的旁瓣电平 (如要求  $\text{PLSR} \leq -40\text{dB}$ )，要用窗口函数作加权，加权处理虽可压制旁瓣，但同时会使主瓣宽度增加，从而使分辨率降低。一般地，加权处理在距离、方位向都要进行 (对冲激脉冲 UWB SAR，则无距离向压缩处理)，故对  $\rho_r$ 、 $\rho_a$  都有影响，其影响大小视采用的窗口函数而定，如 hamming 加权， $3\text{dB}$  主瓣宽度系数为 1.33。对于  $B = 300\text{MHz}$  的 LFM 信号，理论分辨率  $\rho_r = 0.5\text{m}$ ，用 hamming 加权处理后， $\rho_r$  变为  $0.67\text{m}$ 。

###### (2) 运动补偿残余误差的影响

运动补偿是 SAR 成像处理中一个极重要的辅助处理环节，对于机载 SAR 来讲尤为重要。由于 UWB SAR 成像处理的相参积累角很大，合成孔径内积累时间可长达几十秒，远大于常规机载 SAR 的相参积累时间，故运动补偿的难度将很大。运动补偿残留误差主要影响方位向分辨率。因此，高精度的运动补偿技术是实现机载 UWB SAR 方位向高分辨率的关键。

##### 3.2.3 雷达系统中影响分辨率的因素

以 LFM 体制的 SAR 为例，雷达系统构成的各部分中任何引起线性调频信号 (距离向、方位向) 畸变的因素都将影响系统冲激响应形状，因而也影响到 SAR 的分辨率。雷达系统中引起 LFM 信号畸变的主要原因是各种相位误差，包含时相误差和频相误差。随着电子器件和系统技术的快速发展，

SAR 系统构成正朝着数字化方向发展,在数字域(实时或非实时)对系统误差进行校正、补偿的精度很高,可使残留误差极小,整个系统性能可达到接近理论极限的程度。因此,系统误差对分辨率的影响,将不再是未来 SAR 系统的主要威胁。

综上所述,对于 FOPEN UWB SAR 分辨率的选择,有以下结论:

(1)分辨率选择首先应考虑实战应用的要求,1m 的分辨率可满足对大多数战役、战术目标探测/识别的需求;

(2)实现方位向高分辨率是难点所在,关键技术是运动补偿;

(3)影响分辨率的因素有多方面的,随着数字技术的发展,系统误差的影响可逐渐克服;

(4)分辨率的确定与系统其它参数,如频率、测绘带宽、系统功率等,以及载机功率有一定关系,因此,在系统设计时需作一定的折衷考虑。

## 4 频率、分辨率和极化的折衷

工作频率、分辨率、极化形式三者的选择并不是孤立的,而是相互牵连,需作综合、折衷考虑。

### 4.1 分辨率与频率的折衷

SAR 方位分辨率极限值为  $\rho_a = \lambda/4$ ,即分辨率的确定是受到频率的制约。对于高频段 SAR,如 X、S、Ku 波段,方位分辨率远大于  $\lambda/4$ ,故在确定分辨率时,可以不考虑这一制约关系。而 VHF/UHF UWB SAR,分辨率与波长已在一个数量级上,故分辨率与雷达工作频率的确定必须作折衷考虑。或者说,需在分辨率和穿透能力这两个方面作折衷考虑,从这一角度出发,若选择 UWB SAR 分辨率为 1m 时,则工作频率应选择在 UHF 波段。

### 4.2 分辨率与极化的折衷

对于单极化 SAR,目标识别主要取决于分辨率。多极化(或全极化)SAR 所获取的目标信息比单极化 SAR 的要丰富的多,故多极化在一定程度上可弥补分辨率的不足。文献[7]的研究表明,对于全极化 SAR,可适当降低对分辨率的要求。

## 5 结束语

对 FOPEN UWB SAR 三个主要系统参数:频率、极化、分辨率进行了较系统、深入的分析。对工作频率的选择,考虑的重点是叶簇衰减、散射特性及系统研制难度。综合分析表明,选择 UHF 波段更为有利。极化形式的选择则重点考虑叶簇后向散射分量和极化信息对 SAR 图像判读及目标识别的应用,经过分析比较,HH 极化是 FOPEN UWB SAR 的最佳极化形式。分辨率的选择,则基于实战应用对目标识别的要求。最后简要的讨论了频率、分辨率和极化三者之间的关系,指出在系统总体设计时,这三个系统参数的确定必须作折衷考虑。

## 参考文献:

- [1] Robert L.Hutchins and Chris B.Wallace, Effects of Sampling and Propagation loss on Ultrawideband Synthetic Aperture Radar [M]. SPIE (C) vol.1631 Ultrawideband Radar 1992: 36-42
- [2] B.T.Binder, M.F.Toups, S.Ayasli and E.M.Adams., SARFoliage Penetration Phenomenology of Tropical Rain Forest and Northern U.S. Forest [J]. IEEE International Radar Conference, 1995, PP.158-163
- [3] 田国良等.多极化 SAR 图像信息的提取极其鉴别植被效果的评价 [A]. 机载雷达遥感应用试验研究.北京:科学出版社, 1992: 81-85
- [4] 张玮等,多极化雷达图像农田信息的提取与解译 [A]. "机载雷达遥感应用试验研究 [C] 北京:科学出版社, 1992: 86-92
- [5] 陈述彭等,遥感信息机理研究 [M]. 科学出版社, 1998
- [6] Wolfgang Keydel, SAR Technique and Technology, its Present State of the Art with Respect to User Requirements [A]. EUSAR '96: 19-24
- [7] Jacques G.Verly, SAR Frequency-Polarization-Resolution Tradeoffs [A]. EUSAR 2000: 67-70



