

# 机载 PD 雷达 DBS 实时成像研究

毛士艺,李少洪,黄永红,陈远知  
(北京航空航天大学电子工程系,北京 100083)

摘要: 本文简述了工程化 DBS 实时处理原理,讨论了实时处理中的几个问题,结合 PD 雷达给出实时 DBS 软、硬件设计方案,以及飞行实验结果.

关键词: 雷达成像;多普勒波束锐化;实时信号处理;数字信号处理

中图分类号: TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2000) 03-0032-03

## Study of Real-Time Image by DBS on Airborne PD Radar

MAO Shi-yi, LI Shao-hong, HUANG Yong-hong, CHEN Yuan-zhi  
(Dept. of E. E., Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper describes simply the principle of real-time DBS, discusses a few problems on real-time approach, provides the designed software and hardware combined with a PD radar, and show the result of the flying test.

Key words: radar imaging; doppler beam sharpening; real-time signal processing; digital signal processing

### 1 引言

高分辨率成像已是目前机载火控雷达的重要模式之一. 在地形匹配导航、空地监视、地面目标识别等工作模式中均要求高分辨率图像,而微波雷达成像是全天候的重要遥感手段. 获得高分辨率图像的主要困难在于雷达的横向分辨能力. 当前聚焦的合成孔径雷达(SAR)可以获得小于1米的横向分辨率,其代价是要设计包含极大运算量和存储空间的矢量处理器和精确的平台运动参数估计. 此外还有一些运行上的限制. 人们可以在非聚焦的多普勒锐化(DBS)到聚束式(Spotlight) SAR之间,在计算量和分辨率要求之间权衡,得出若干工作模式<sup>[1]</sup>. DBS是一种在全程范围进行孔径时间不变的非聚焦 SAR. 也是一种可在前视、大范围扫描条件下,计算负荷较低的一种成像方式. 1951年C. Wiley提出了DBS的原理,1953年在DC-3飞机上试飞. 此后,国外在此领域中发展很快,美国的现役战斗机均有DBS功能,扇扫时锐化比可达40:1,小区域成像时可达64:1. 这种中等分辨率成像模式,已同实孔径RBM、SAR、Spotlight构成新一代机载脉冲多普勒(PD)雷达必备的对地测绘功能<sup>[2]</sup>对提高飞机性能有着十分重要的意义.

DBS研究在我国开展了十多年. 1984年,北京航空航天大学在中航总607所的资助下,开展了DBS的研究. 苗楠<sup>[3]</sup>在他的博士学位论文中对DBS成像原理、信号处理过程进行了详细阐述,提出了DBS系统实现方法,并通过计算机仿真论证了方法的可行性;张直中<sup>[4]</sup>在PD雷达上获得非实时DBS成像;张庆文<sup>[5]</sup>等则对DBS运动补偿问题进行了深入的研究,给出了运动补偿方案的计算机仿真结果.

本文在深入研究DBS技术工程实现基础上,应用当前先进的DSP技术设计实现了DBS实时成像处理器,该处理器应用于机载PD雷达,首次在我国从空中取得实时的32:1锐化比成像结果.

### 2 实时成像处理原理

机载PD雷达下视照射地面,形成近似椭圆的照射区、雷达视线上多普勒频率为:

$$f_d = (2v/\lambda) \cos \theta \cos \alpha \quad (1)$$

其中  $v$  为机载速度,  $\lambda$  为雷达波长,  $\theta$  为天线俯仰角,  $\alpha$  为天线方位角. 对于高分辨雷达,波束照射区视为面目标,回波信号多普勒频率将被展宽:

$$F_d = (2v/\lambda) \cos \alpha \cos \theta \sin \alpha \quad (2)$$

其中  $\alpha_a$  为天线波束方位角宽度.

如图1所示,可以将波束照射区按距离向和方位向进行2维划分,划分后的每个单元可视为点目标. 对于照射区域内的任意点目标  $(i, j)$ ,由式(1)可知,在  $v, \lambda$  确定条件下,多普勒频率  $f_d(i, j)$  由点目标俯仰角  $\theta(i)$  和方位角  $\alpha(j)$  确定.

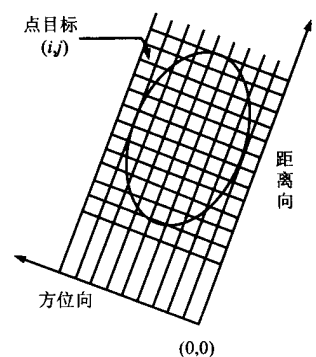


图1 照射区2维划分

实际上, DBS 模式时距离向细化(距离分辨率)通过窄脉冲和相应距离采样实现,由距离采样窗序号可以确定  $i(i)$  点目标  $(i, j)$  之  $f_d(i, j)$  可以从雷达回波中求出,从而可由式(1)反求  $a(j)$ ,即完成方位向高分辨(波束锐化).在实时 DBS 系统中,通常使用 FFT 求取  $f_d(i, j)$ ,这就需要对雷达回波积累足够长的观测时间,称这段时间为一帧.对一帧回波数据按距离窗进行实时 FFT 处理,所得输出为一个子孔径图像;依据载机与测绘地面相对运动的空间几何关系,对各子孔径图像进行实时拼接,即可获得实用的 DBS 实时图像.

### 3 实时处理中的几个问题

#### 3.1 对锐化比的限制

锐化比是衡量 DBS 性能的重要指标,理论上锐化比可以任意提高,但在工程中锐化比是有限制的,其原因如下:

锐化比的提高依赖于对多普勒频率分辨的提高,实时工程系统中使用 FFT 进行多普勒频率分辨,提高频率分辨率意味着延长相干观测时间和压缩子滤波器通带宽度.对于前斜视 PD 雷达,地面点目标多普勒频率是一个近似线性的时变量,延长观测时间及压缩带宽,将导致多普勒频率超出窄带滤波器,不能实现正确相干积累.

工程可实现 DBS 系统,最大相干观测时间为:

$$T_{max} = \sqrt{R_0/2} / \left( v \sqrt{1 - \cos^2 i \cos^2 a} \right) \quad (3)$$

其中  $R_0$  为照射区斜距.

在满足式(3)条件下,可实现的锐化比为:

$$= \frac{2vN_a \cos i \sin a}{K_w F_r} \quad (4)$$

其中  $N_a$  为相干积累点数(即 FFT 长度),  $K_w$  为滤波器加窗展宽系数,  $F_r$  为发射脉冲重复频率.

#### 3.2 保持锐化比恒定

要得到具有较好几何视觉效果的 DBS 图像,需要保证图像在不同方位向保持恒定锐化比.从式(4)可以看出,当  $v$ 、 $a$ 、 $N_a$ 、 $K_w$ 、 $F_r$ 、 $i$  保持恒定时,  $R_0$  将随  $a$  变化而变化,即对应不同的方位角锐化比不同,这将严重影响图像质量.考虑到工程易实现性, DBS 系统通常通过适时调节  $F_r$  以保证扫描模式时锐化比的恒定.

$F_r$  的连续变化会影响正确的相干积累,通常采用分段变化.  $F_r$  分段越多,锐化比恒定效果越好.但  $F_r$  的变化将引起方位像素空间的不一致,导致图像拼接中的模糊.经折衷处理,通常在  $15^\circ \sim 60^\circ$  扫描范围内将  $F_r$  变化分成  $5 \sim 10$  段为合适.

为保持  $R_0$  恒定,  $F_r$  与  $a$  的函数关系为:

$$F_r = \frac{2vN_a \cos i \sin a}{K_w} = K_{PRF} \sin a \quad (5)$$

#### 3.3 参数与性能设计

依据载机与雷达技术性能及 DBS 基本要求,设计有关系统参数如下:载机高度:  $h = 4000\text{m}$ ;载机速度:  $v = 240\text{m/s}$ ;天线俯仰角:  $i = 12^\circ$ ;天线方位角(成像区):  $a = 15^\circ \sim 45^\circ$ ;波长:  $\lambda = 0.03\text{m}$ ;波束宽度:  $\theta \times \alpha = 3.5^\circ \times 3.5^\circ$ ;距离窗数:  $N_r = 80$ ;

相干积累点数:  $N_a = 64$ ;天线扫描速度:  $\dot{s} = 13.5^\circ/\text{s}$ ;发射脉冲宽度:  $\tau = 0.4\mu\text{s}$ ;

发射脉冲频率与方位角对应关系为,在  $15^\circ \sim 45^\circ$  分为六段,  $F_r$  相应地在  $500\text{Hz} \sim 1.1\text{kHz}$  范围变化.

根据设计的系统参数,可算出 DBS 有关技术指标如表 1.

表 1

指标名称	计算值	指标名称	计算值
成像斜距	20km	锐化比	26 ~ 33
距离向测绘宽度	5.3km	方位向测绘宽度	10.5km
距离分辨率	60m	方位分辨率	47 ~ 37m

### 4 实时处理器设计

DBS 主要是一个信号处理问题,工程化的关键是实时处理器,包括实时处理器软件的设计和实时处理器硬件的设计.

#### 4.1 实时处理器软件的设计

依据实时 DBS 处理原理和工程实现特点,我们设计出 DBS 实时处理流程如图 2 所示.

数据缓存和方位向 FFT 主要有专用硬件电路完成,只要编写少量控制流程,不用设计处理软件.

多普勒频谱中心是子孔径图像中心,是子孔径图像拼凑的参考点.理论上,谱中心可以根据天线指向角及载机速度等参数求出,工程上由于这些参数测量存在较大误差,不能满足精度要求.可以采用从回波数据中估计谱中心的方案.

子孔径图像是按照极坐标系描述的,不便于图像拼接和显示,需要转换到直角坐标系,转换关系式为:

$$x(i, j) = R(i) \cos i(j) \sin a(j) \quad (6)$$

$$y(i, j) = R(i) \cos i(j) \cos a(j) \quad (7)$$

子孔径拼接是将极坐标变换后子孔径图像拼接到整幅图像中,它是图像合成的重要环节.拼接的依据是载机运动状况和天线扫描状况,以及从回波中估计的谱中心.

显示处理包括根据显示曲线进行灰度转换,和根据显示处理模块要求的数据格式生成显示坐标和灰度码.

#### 4.2 实时处理器硬件设计

实时处理器硬件设计是在 PD 雷达已有资源和结构基础上进行的,设计完成的硬件组成和结构如图 3 所示.

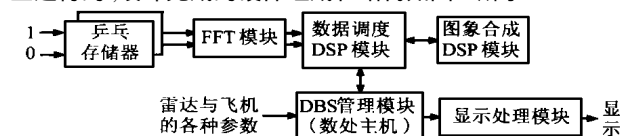


图 2 实时处理软件流程

图 3 实时处理器硬件组成与结构

在图 3 中, FFT 单元和图像合成 DSP 模块是两个主要模块,其运算速度是处理能否实时完成的关键.本方案中,要求

FFT 单元速度为 :64 点加窗复数 FFT 时间小于  $720\mu\text{s}$ , 要求图像合成模块速度为 :10MOPS.

选择 TMS320C30 实现图像合成模块.

## 5 结论与实验结果

在地面联试基础上, 近期进行了多次飞行试验, 取得了较

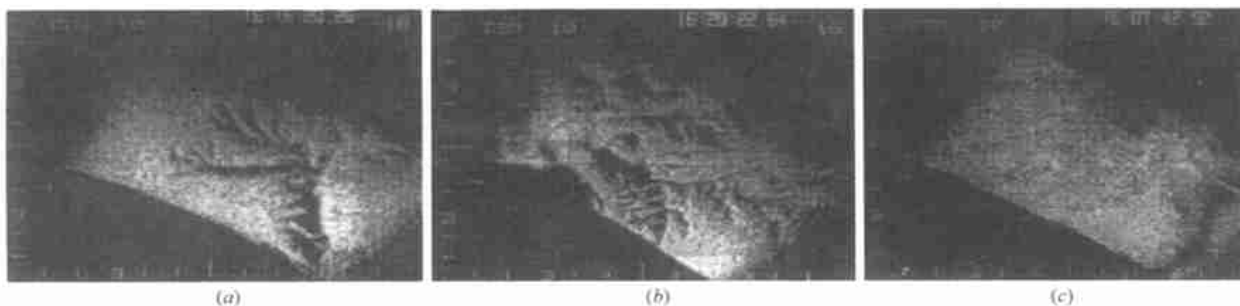


图 4

锐化比 是机载雷达 DBS 技术最主要的技术指标. 系统分析表明机载 DBS 锐化比是有限制的. 如只由式 (4) 看, 似乎提高 FFT 点数  $N_a$  和降低 PRF, 即降低子滤波器带宽  $B_s = F_r / N_a = 1 / (N_a \times T_r)$ , 就可提高锐化比. 实际上子滤波器带宽的变窄受限于下面因素:

(1) 在处理中目标回波谱宽应小于子滤波器带宽, 这要求点目标回波的相干时间不能太短. 即使回波信号为单频信号, 由于天线扫描时照射点目标时间有限, 回波谱展宽, 要求回波相干观测时间大于  $N_a \times T_r$ .

(2) 由于飞机飞行, 点目标回波近似为线性调频信号. 因此要求在处理间隔内点目标回波多普勒频率变化的范围要小于  $B_s$ , 因此一幅子图像处理间隔 ( $N_a \times T_r$ ) 不能太大.

(3) 由于飞机飞行, 目标相对飞机的距离是相对变化的. 若在一幅子图像处理间隔 ( $N_a \times T_r$ ) 中, 目标斜距离变化超过一个距离分辨单元 (即出现距离徙动), 则将降低距离分辨率.

在前述设计参数下, 锐化比 在 32 左右性能已接近极限. 实际的分辨率还受限于载机运动补偿的性能. 64 1 以上的锐化比, 应采用天线不扫描或聚束方式才可能实现.

本项目获中航总机载局和 607 所的资助, 在联试和试飞中受到 607 所有关技术人员的热情帮助. 特致以诚挚的谢意.

## 参考文献

- [ 1 ] Morris G. et al. Airborne Pulsed Doppler Radar, pp215 ~ 256, Artech House, 1996

满意的结果. 图 4 是在飞行试验中从雷达显示器上拷贝的实时图像. 图 4 (a) 是山沟地貌图像; 图 4 (b) 是丘陵地貌图像; 图 4 (c) 是三门峡市及公路大桥 (飞行员在导航地图帮助下很容易识别出该图像). 试验结果验证了 DBS 算法和硬件结构的正确性.

- [ 2 ] M. Tobin. Real Time Simultaneous SAR/ GMTI in a Tactical Airborne Environment. European Conference on Synthetic Aperture Radar, pp. 63 ~ 66, Germany, Mar 1996
- [ 3 ] 苗楠. 高分辨率实时雷达成像理论与试验系统设计. 博士学位论文, 中科院电子所, 1986
- [ 4 ] Zhang Zhizhong. The Principle and Technique of Doppler Beam Sharpening (DBS). CIE 1991 International Conference on Radar, Beijing, China 1991
- [ 5 ] 张庆文, 张剑云. 多普勒波束锐化运动补偿方法的研究. 航空学报, 1994, 11 (11) : 1348 ~ 1356



毛士艺 1958 年毕业于北京航空学院, 现任北京航空航天大学教授, 博士生导师, 中国电子学会会士. 主要研究领域为高分辨力雷达成像、弱信号检测、非高斯信号建模、信号分类、多传感器融合、数据互联和多目标跟踪等.



李少洪 1962 年毕业于北京航空学院无线电系, 现任北京航空航天大学信号与信息处理教研室主任, 教授, 博士生导师. 主要从事雷达、信号与数据处理、多目标跟踪和目标识别等方面的研究工作.