

# 合成孔径雷达多普勒频谱的盲分裂解法

许 稼<sup>1,3</sup>, 李 骏<sup>1</sup>, 彭应宁<sup>1</sup>, 夏香根<sup>2</sup>, 李 刚<sup>1</sup>

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. Dept of ECE, University of Delaware, Newark, DE 19716, USA;  
3. 空军雷达学院四系, 湖北武汉 430010)

摘 要: 针对合成孔径雷达中由于多普勒中心偏移和谱宽扩展导致的“频谱分裂”问题, 本文提出了一种基于“双门限”处理的频谱盲解分裂方法. 基于单个距离单元的采样数据, 新方法无需辅助信息便可实现正确的频谱解分裂. 仿真性能分析和实际数据验证了新方法的有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 频谱分裂; 双门限处理; 频谱盲解分裂

中图分类号: TN 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 06 0974-03

## Blind Splitting Solution of Doppler Spectrum for Synthetic Aperture Radar

XU Jia<sup>1,3</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, PENG Ying-ning<sup>1</sup>, XIA Xiang-gen<sup>2</sup>, LI Gang<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Beijing 100080, China;  
2. Department of Electronic and Computer Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716 USA;  
3. Fourth Department, Radar Academy of Air Force, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: Due to the width spread and center shifting of the Doppler spectrum, the “spectrum splitting” phenomena may be drawn in synthetic aperture radar. Based on a proposed double threshold processing, a novel method of blind spectrum splitting is developed. Via a single range unit sampling, the proposed method may correctly realize spectrum splitting without any other auxiliary information. Lastly, simulation experiments and real data are also provided to validate the proposed method.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); spectrum splitting; double threshold processing; blind splitting solution

### 1 引言

回波信号的多普勒中心、多普勒谱宽、多普勒调频率等参数, 不仅是合成孔径雷达 (SAR) 平台运动和系统参数的客观反映, 也是 SAR 正确成像的关键<sup>[1-7]</sup>. 现有的多普勒参数估计方法通常利用快速傅立叶变换 (FFT) 获取接收信号的多普勒频谱, 进而通过频谱分析得到相关参数的估计. 并且, 由于复杂度低和适用性广, 这类估计方法得到了普遍的应用<sup>[3-7]</sup>.

然而, 实际 SAR 信号的多普勒频谱是复杂多变的. 首先, 由于雷达波束指向及平台运动的不稳定等原因, 信号的多普勒中心  $f_{dc}$  是不断变化的. 在大斜视、高波段、大面积测绘等 SAR 应用中, 偏离预定值的现象常见的, 甚至可远远超过脉冲重复频率<sup>[3, 4]</sup>, 即

$$f_{dc} = K \cdot f_p + f_{dc}, \quad f_{dc} \in [-f_p/2, f_p/2] \quad (1)$$

其中  $K$  是一个未知的整数, 即存在多普勒中心模糊问题. 其次, 由于平台自身运动会导致 SAR 多普勒频谱显著展宽. 在正侧视条带模式 SAR 中, 杂波谱宽为

$$f_B = 2v_s/D \quad (2)$$

其中  $v_s$  为前向速度,  $D$  为 SAR 阵元的方位向尺寸. 由式 (2) 可见: 在小阵列、高速运动平台等 SAR 应用场合中, 杂波的多普勒频谱展宽是非常显著的. 综上所述, 由于存在中心偏移及

谱宽扩展等原因, 对 SAR 的多普勒频谱的简单处理往往得不到正确的多普勒参数估计结果.

为确定多普勒模糊数  $K$ , 传统 SAR 信号处理已经提出了子孔径相关法<sup>[4]</sup>、频域分集法<sup>[8]</sup>等方法. 这些方法或利用系统设计, 或直接利用数据已能较好地解决了多普勒中心解模糊问题. 随着导航和稳定平台等方面的技术进步, 结合惯导和全球定位系统 (GPS) 数据, 模糊数  $K$  已可通过辅助数据直接估计到. 然而, 大量的 SAR 实际数据分析中发现: 即使  $K$  已知, 但当  $|f_{dc}| \rightarrow f_p/2$  时, 频谱的部分能量会泄露并反折到频谱的另一端, 从而使得频谱分裂在频谱区间  $[-f_p/2, f_p/2]$  的两端. 在此, 本文称这种现象为“频谱分裂”. 并且, 如果没有正确地判别频谱是否分裂及判定分裂的原因, 即“频谱解分裂”, 则会导致后继的信号处理环节失效. 例如, “质心法”<sup>[3]</sup> 可以通过如下内积运算完成  $f_{dc}$  的估计, 即

$$\tilde{f}_{dc} = \frac{\int P(f) f df}{\int P(f) df} \quad (3)$$

其中  $P(f)$  代表 SAR 的方位频谱, 可见“质心法”在运算量方面相对“能量均衡”<sup>[4]</sup> 等常用方法具有明显优势. 但“质心法”需要保证频谱的轴对称性, 当“频谱分裂”时, 频谱的对称轴并不反映  $f_{dc}$ . 因此, 有必要引入“频谱解分裂”的预处理环节, 避免多普勒参数估计的错误. 频谱解分裂同样可以利用硬件记录的系统参数值 (如波束指向, 前向速度, 径向速度

等), 预估  $f_{dc}$  和多普勒谱宽及确定“频谱分裂”<sup>[3]</sup>. 这种解分裂方法对设备精度要求高, 不能满足实际需要. 为此, 本文提出一种基于“双门限”处理的多普勒频谱盲解分裂新方法. 该方法不需要硬件记录的系统和平台参数等先验知识, 直接根据数据进行解分裂, 因此本文称之为“盲解分裂”.

## 2 “双门限”多普勒频谱盲解分裂

虽然, 导致“频谱分裂”的物理原因无非是  $f_{dc}$  正偏或负偏, 但如何正确判定“频谱分裂”及分裂原因仍然是困难的. 首先, 在 SAR 的方位信号频谱中存在噪声成分, 在杂噪比 CNR 较低时, 很难肯定频谱是否分裂; 其次,  $f_{dc}$  正偏和负偏导致的“频谱分裂”在形式上是非常相似的, 从频谱形式上难以区分. 为此, 本文首先将多普勒中心解模糊后的频谱分为如下五种情况:

情况 1 频谱未分裂, 且频谱的主要能量分布在区间  $[-f_p/2, 0]$  中;

情况 2 频谱未分裂, 且频谱的主要能量分布在区间  $[0, f_p/2]$  中;

情况 3 频谱未分裂, 且频谱的主要能量分布在 0Hz 的两侧;

情况 4 由于  $f_{dc}$  负偏, 导致“频谱分裂”;

情况 5 由于  $f_{dc}$  正偏, 导致“频谱分裂”;

显然, 如果能够将频谱归结为以上五种情况之一, 就不难结合“质心法”法获得正确的多普勒中心估计: 当频谱为情况 1~3 时: 由于未发生频谱分裂, 可直接在频谱区间  $[-f_p/2, f_p/2]$  获得  $f_{dc}$  的估计; 当为情况 4 时: 将正负频谱搬移并在  $[-f_p, 0]$  范围内获得  $f_{dc}$  的估计; 当为情况 5: 将正负频谱搬移并在  $[0, f_p]$  范围内获得  $f_{dc}$  的估计. 至此, 本文将频谱解分裂问题归结为频谱进行正确分类问题. 在以上对频谱的分类基础上, 首先给出“双门限”盲解分裂方法流程如图 1 所示, 并就图 1 各步骤逐一解释其意义及各待定参数的确定方法.

### 2.1 门限 $T_1$ 的确定

不失一般性, 设归一化的杂波的功率谱函数具有高斯型包络<sup>[2, 6]</sup>为

$$P_c(f) = \sqrt{2\pi\sigma_B^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_B^2}} \exp(-(f-f_{dc})^2/2\sigma_B^2) = \sqrt{2\pi\sigma_B^2} N(f_c, \sigma_B) \quad (4)$$

其中,  $\sigma_B = f_B/2 \cdot 355$  是谱宽的扩展系数,  $N(f_c, \sigma_B)$  为分别以  $f_c$  和  $\sigma_B$  为均值和方差的正态分布函数. 当接收信号的杂噪比  $\gamma = \text{CNR} = 10\log(1/\sigma_v^2)$  已知时, 有  $\sigma_v = 10^{-(\gamma/20)}$  (5) 其中  $\sigma_v$  为噪声的起伏强度的均方差. 根据以上假设可得实际信号的功率谱在区间  $[-f_p/2, 0]$  及  $[0, f_p/2]$  中的能量分别为

$$E_1 = \sqrt{2\pi\sigma_B^2} F(f_c, \sigma_B, -f_p/2, 0) + \sigma_v^2 \cdot f_p/2 \quad (6)$$

$$E_2 = \sqrt{2\pi\sigma_B^2} F(f_c, \sigma_B, 0, f_p/2) + \sigma_v^2 \cdot f_p/2 \quad (7)$$

其中  $F(a, b, c, d) = \int_c^d \frac{1}{\sqrt{2\pi}b} \exp(-(x-a)^2/2b^2) dx$  (8)

根据正态函数的性质可知  $F(a, b, -\infty, +\infty) = 1$ . 实际应用中, 不妨设  $F(f_c, \sigma_B, -f_p/2, 0) > 0.99$  对应情况 1, 而  $F(f_c, \sigma_B, 0, f_p/2) > 0.99$  对应情况 2, 如此可得

$$T_1 = \frac{0.99 \sqrt{2\pi\sigma_B^2} + \sigma_v^2 f_p/2}{0.01 \sqrt{2\pi\sigma_B^2} + \sigma_v^2 f_p/2} \quad (9)$$

需要指出, 当 SAR 信号方位功率谱满足其他形式时, 只需修改式(8)的积分式, 而式(9)的形式同样适用. 另外, 实际应用中的  $\gamma$  需要通过实际数据估计得到, 而当 CNR 较高时, 即  $\sigma_v \rightarrow 0$ , 可进一步得  $T_1 = 99$ .

### 2.2 门限 $T_2$ 的确定

通过门限  $T_1$ , 可以判断频谱能量是否分配在双边的区间内, 但由于情况 3 的存在, 频谱能量分配在正负区间内并不意味着发生了“频谱分裂”. 为此设计门限  $T_2$  以区分情况 3. 正负区间内频谱能量的重心可表示为

$$f_1 = \int_{-f_p/2}^0 f \exp(-(f-f_c)^2/2\sigma_B^2) df / E_1 \quad (10)$$

$$f_2 = \int_0^{f_p/2} f \exp(-(f-f_c)^2/2\sigma_B^2) df / E_2 \quad (11)$$

易证情况 3 时, 有  $B = |f_1 - f_2| \approx f_B$ . 为了鲁棒地实现对情况 3 的区分, 不妨设定  $T_2 = 1.1 * f_B$  (12)

### 2.3 情况 4 和情况 5 的区分

通过上述处理, 已可确定是否出现“频谱分裂”, 但并不能确定分裂是  $f_{dc}$  正偏或负偏引起的. 由于本文双门限法前提是多普勒中心已经正确地解模糊(如图 1 所示), 因此有  $f_{dc} \in [-f_p/2, f_p/2]$  成立. 另一方面, SAR 对均匀场景接收信号的多普勒功率谱, 主要受 SAR 天线收发方向图影响且为中心对称的. 显然,  $f_{dc}$  负偏造成频谱分裂时, 必有  $E_1 > E_2$  成立; 同理,  $E_1 < E_2$  也可判断频谱正偏造成分裂. 至此, 频谱分裂的五种情况已经能够正确判别.

## 3 新方法验证

本文以中国电子科技集团华东电子工程研究所 (ECRIEE) 研制的 X 波段机载合成孔径雷达 (ECRIEE SAR) 为原型验证新方法性能. 设定该雷达为正侧视工作模式, 即  $f_{dc}$  在 0 附近波动. 接收信号的杂波带宽  $f_B = 2\theta\beta/\lambda \approx 167.5$  Hz.

表 1 ECRIEE SAR 系统参数

系统参数	参数值
飞行高度	$h = 3000$ m
方位向波束宽度	$\beta = 1.5^\circ$
载波波长	$\lambda = 0.03125$ m
信号带宽	$B = 70$ MHz
脉冲重复频率	$f_p = 700$ Hz
载机速度	$v_s = 100$ m/s

### 3.1 仿真性能分析

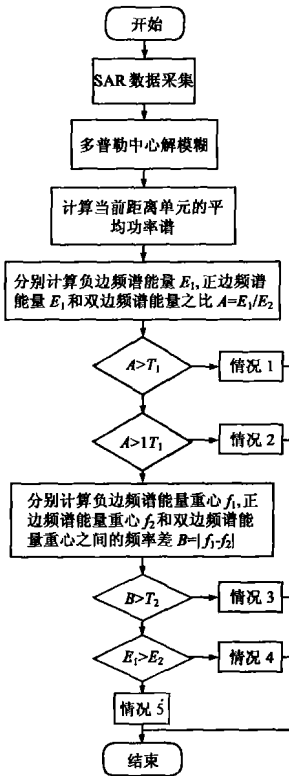


图 1 “双门限”频谱解分裂流程图

假设 SAR 波束的方位角  $\varphi = 86.5^\circ$ , 此时接收信号的  $f_{dc} = 2v_s \cos \varphi / \lambda \approx 390.7 \text{ Hz}$ , 由于  $f_p = 700 \text{ Hz}$ , 频谱由于  $f_{dc}$  正偏会导致“多普勒中心模糊”及“频谱分裂”, 即情况 4. 为此, 本文对 4096 个脉冲采集数据, 采用双门限法进行  $N = 500$  次解分裂的 Monte Carlo 实验. 图 2 给出了不同杂噪比 (CNR) 情况下, 双门限法解分裂的正确概率曲线, 图中正确概率的估计定义为

$$p = N_c / N \quad (13)$$

其中  $N_c$  为得到正确解分裂结果的数目.

图 2 可见当 CNR 大于 0dB 时, 双门限法几乎以百分之百的概率实现正确的解分裂. 在 SAR 的实际数据中, 由于雷达下视, 杂波强度一般远大于噪声起伏, 即 CNR 大于 0dB. 另外, 实际处理时, 还可以利用多个距离单元多普勒频谱的平均进一步提高 CNR.

### 3.2 实测数据验证

图 4 是 2001 年上半年 ECRIEE SAR 系统对黄河河道地区采集部分数据的成像结果. 该图像分辨率约为  $3\text{m} \times 3\text{m}$ . 其对应区域约为  $1\text{km} \times 4\text{km}$  (纵向)(横向), 其中图像纵向为平台飞行方向, 横向为雷达斜距方向. 该成像场景中包含的地物类型比较丰富, 图像的左部为黄河, 右部为山区和高原. 本文截取高原平坦区域实测数据的功率谱如图 3 所示, 可见此时已经发生了“频谱分裂”. 采用前文提出的双门限盲解分裂方法, 结合“质心法”可估计出此数据对应的多普勒中心  $f_{dc} = 368.1 \text{ Hz}$ , 即为情况 4 且发生了  $f_{dc}$  的模糊. 进一步得到成像结果如图 4 所示, 以上结果也证明了本文提出的盲解分裂方法的正确性.

## 4 结论

本文在将 SAR “频谱分裂”分为五类情况的基础上, 提出了一种基于“双门限”处理的盲解分裂方法. 该方法无需硬件记录的平台运动信息, 能够在杂噪比大于 0dB 的应用中, 基于单个距离单元的多普勒信号以概率 1 实现正确的频谱解分裂. 本文的新方法可以提供频谱的一种有效分析工具, 也可为“质心法”等多普勒参数估计方法提供必要的预处理.



图 4 X 波段 SAR 对黄河地区的成像结果

致谢 感谢 ECRIEE 提供 SAR 的实测数据和无私帮助.

### 参考文献:

[ 1 ] Jia Xu, Yingning Peng, Xiang Gen Xia. parametric SAR autofocusing: inherent accuracy limitations and realization[J]. IEEE Trans on GRS, 2004, 42( 11): 2397- 2411.

[ 2 ] Jia Xu, Yingning Peng, Qun Wan, et al. Doppler distributed clutter model of airborne radar and its parameters estimation[J]. Science in China (Ser. F), 2004, 47( 5): 577- 587.

[ 3 ] 黄勇. 直升机载战场侦察雷达自适应杂波抑制和慢速目标检测研究[D]. 北京: 清华大学, 2000. Y. Huang. Study on adaptive clutter suppression and slow speed target detection for helicopter battlefield surveillance radar[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2000.

[ 4 ] 禹卫东. 合成孔径雷达信号处理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1997. W Yu. Synthetic aperture radar signal processing[D]. Nanjing: Nanjing Aeronautic and Aerospace University, 1997.

[ 5 ] 黄永红, 毛士艺. 星载合成孔径雷达多普勒参数估计[J]. 电子学报, 1994, 22( 6): 10- 16. Y Huang, Shiyi Mao. Doppler parameter estimation of spaceborne synthetic aperture radar[J]. Acta Electronica Sinica (in Chinese), 1994, 22(6): 10- 16.

[ 6 ] D C Schleher. MTI and Pulsed Doppler Radar[M]. Artech House Inc., London, 1991.

[ 7 ] S N Madsen. Estimating the Doppler centroid of SAR data[J]. IEEE Trans AES, 1989, 25(2): 134- 140.

[ 8 ] R Bamler, H Runge. PRF ambiguity resolving by wavelength diversity [J]. IEEE Trans GRS, 1992, 29( 6): 997- 1003.

### 作者简介:



许 稼 男, 1974 年生, 空军雷达学院教员, 现为清华大学电子工程系博士后, 研究领域包括雷达及水声领域的目标检测和识别、参数估计、仿真模拟、合成孔径/逆合成孔径成像、混沌非线性理论等, 目前已经在《IEEE Trans. on GRS》、《中国科学》、《声学学报》、《电子学报》等国内外刊物及各类学术会议上发表和录用论文四十余篇, 其中被 SCI、EI、ISTP 等检索二十余篇. E-mail: xujia@mail.tsinghua.edu.cn.



彭应宁 男, 1939 年生, 清华大学电子工程系教授, 博导, 原清华大学电子工程系高速信号处理和网络传输研究所所长, 长期从事雷达信号处理领域的研究, 已发表学术论文近 200 篇, 其中被 SCI、EI 和 ISTP 收录的论文 120 多篇, 出版专著 4 部, 并获十多项国家级和部委级科技进步奖.

夏香根 男, 美国 Delaware 大学电子与计算机系教授, 博导. 在信号处理领域发表的 SCI 检索论文 90 余篇, 担任 IEEE Signal Processing 等多个学会的汇刊和杂志的编委.