

# 变量切趾技术在 SAR/ISAR 图像处理中的应用<sup>1</sup>

王一丁 纪慧波 洪峻

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要:** SAR/ISAR 图像处理需要进行二维傅里叶变换, 傅里叶变换本身具有较高的旁瓣电平, 虽然通过加权处理可以降低旁瓣电平, 但是主瓣的分辨率会降低。变量切趾技术在 SAR 图像处理中能够抑制旁瓣电平, 同时保持图像的高分辨率。该文分析了传统的变量切趾技术和算法, 通过加强约束条件, 提出了改进的变量切趾算法。与原有方法相比, 获得更高的分辨率和低的旁瓣电平, 对一幅二维 ISAR 图像进行处理证明了这种方法的正确性。

**关键词:** 变量切趾, SAR/ISAR, 旁瓣, 分辨率, 分辨率

**中图分类号:** TN951, TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2003)12-1622-06

## Application of Apodization Method in SAR/ISAR Processing

Wang Yi-ding Ji Hui-bo Hong Jun

(Institution of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** SAR/ISAR image processing involves a 2D Fourier transform that produce high intensity sidelobes which obscure low intensity scatters in the image. Although sidelobes can be reduced using parametric windows, the image resolution becomes worse. Apodization technique can reduce sidelobe levels while maintaining the image resolution. In this paper, based on the analysis of apodization algorithm, a modified apodization method is presented via stronger constraint. The modified method has higher resolution and lower sidelobe levels than the original method. The correctness of this method is proved by using a real ISAR image.

**Key words** Apodization, SAR/ISAR, Sidelobe, Resolution

### 1 引言

随着星载 SAR 技术的发展, 如何提高图像的分辨率已经成为当前的研究工作之一。但是, 通过增加整个雷达系统的带宽达到提高图像分辨率的目的在工程以及实际应用中存在较大的困难。为了达到改善图像质量的目的, SAR 图像的超分辨处理技术应运而生<sup>[1-3]</sup>。该技术利用非线性技术能够改善图像分辨率, 提高信杂比, 降低乘性相干斑干扰。SAR 图像的超分辨处理技术包括自适应滤波、线性预测、信号杂波子空间分解和参数模型等方法。变量切趾技术是这些方法中的一种, 它是一种特殊的自适应旁瓣抑制法, 它使用不同加权函数, 同时实现提高主瓣分辨率和降低旁瓣的效果<sup>[4,5]</sup>。

本文第 2 节分析了传统的变量切趾技术和算法; 第 3 节通过信号能量最小约束, 将约束分解到信号的实部和虚部, 进一步加强约束条件, 提出了改进的变量切趾技术和算法; 第 4 节对一幅二维 ISAR 图像进行两种方法的处理, 与改进前方法相比, 改进后方法获得更高的分辨率和低的旁瓣电平; 最后结论证明了改进方法的正确性。

<sup>1</sup> 2002-06-20 收到, 2002-12-02 改回

## 2 变量切趾算法

在 SAR/ISAR 成像处理过程中, 常采用回波信号加权的方法抑制旁瓣电平。这种加权函数通常是余弦函数的组合, 可以描述为<sup>[4,6]</sup>

$$w(n) = 1 + \alpha_c \cos(2\pi n/N) \quad (1)$$

式 (1) 的离散傅里叶变换为

$$W(k) = \delta_{k,0} + \alpha_c(\delta_{k,-1} + \delta_{k,1}) \quad (2)$$

其中

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} 1, & k = j \\ 0, & k \neq j \end{cases} \quad (3)$$

式 (2) 说明通过窗函数参数  $\alpha_c$  的选择, 根据成对回波理论可以有效降低选定频率处的信号强度。当  $\alpha_c = 0$  (矩形窗) 时, 分辨率最佳, 旁瓣电平最大; 当  $\alpha_c = 0.5$  (汉宁窗) 时, 分辨率变坏, 旁瓣电平降低。因此, 参数  $\alpha_c$  的选择是至关重要的, 对于不同频率位置, 自适应地解出参数  $\alpha_c$ , 使该频率处的旁瓣电平最低, 这就是变量切趾技术, 具体算法如下:

假设原始图像如下:

$$g(m) = I(m) + iQ(m) \quad (4)$$

将该图像式 (4) 与式 (2) 中的频域窗函数卷积产生滤波图像:

$$g'(m) = g(m) + \alpha_c(m)g(m-1) + \alpha_c(m)g(m+1) \quad (5)$$

其中  $\alpha_c$  随着  $m$  变化。参数  $\alpha_c$  应使滤波后图像的能量最小, 即

$$\begin{aligned} |g'(m)|^2 = & \{I(m) + \alpha_c(m)[I(m-1) + I(m+1)]\}^2 \\ & + \{Q(m) + \alpha_c(m)[Q(m-1) + Q(m+1)]\}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式 (6) 对  $\alpha_c$  求偏导数并令等于零, 计算出最佳参数  $\alpha_c$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha_c(m)} |g'(m)|^2 = & 2\{I(m) + \alpha_c(m)[I(m-1) + I(m+1)]\} \cdot [I(m-1) + I(m+1)] \\ & + 2\{Q(m) + \alpha_c(m)[Q(m-1) + Q(m+1)]\} \\ & \times [Q(m-1) + Q(m+1)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \alpha_c = & -\frac{I(m)[I(m-1) + I(m+1)] + Q(m)[Q(m-1) + Q(m+1)]}{[I(m-1) + I(m+1)]^2 + [Q(m-1) + Q(m+1)]^2} \\ = & -\operatorname{Re} \left[ \frac{g(m)}{g(m-1) + g(m+1)} \right] \\ = & \frac{-|g(m)|}{|g(m-1) + g(m+1)|} \cos\{\arg[g(m)] - \arg[g(m-1) + g(m+1)]\} \end{aligned} \quad (8)$$

考虑到窗的形状应在矩形窗和汉宁窗的形状之间变化, 即  $0 \leq \alpha_c(m) \leq 1/2$ . 最终的输出图像是<sup>[5]</sup>

$$g'(m) = \begin{cases} g(m), & \alpha_c(m) < 0 \\ g(m) + \alpha_c(m)[g(m-1) + g(m+1)], & 0 \leq \alpha_c(m) \leq 1/2 \\ g(m) + (1/2)[g(m-1) + g(m+1)], & \alpha_c(m) > 1/2 \end{cases} \quad (9)$$

### 3 改进的变量切趾算法

根据上一节的分析, 参数  $\alpha_c$  是图像信号实部和虚部 (见式 (5)) 的联合函数. 变量切趾算法是在能量最小约束下, 求出最佳的参数  $\alpha_c$ . 这里面存在这样的问题, 当复信号的能量最小时, 信号的模值构成一个圆 (见图 1). 图 1 中,  $a$  点和  $b$  点具有相同的模值, 但是  $aq < bq$ ,  $ai > bi$ , 也就是说信号的实部和虚部不一定能同时达到最小, 亦即参数  $\alpha_c$  的解不唯一. 理论上讲, 复信号的能量并没有降到最低, 原有的变量切趾算法的解不一定是最优的. 根据上面的分析, 我们提出了改进的变量切趾算法, 该算法进一步加强约束, 对复信号的实部和虚部同时给予约束, 这样加权窗函数参数  $\alpha_c$  由一个变成约束力更强的两个  $\alpha_{ci}$  和  $\alpha_{cq}$ , 使复信号的实部和虚部能量同时达到最小, 相应地复信号的总能量一定最小, 使参数  $\alpha_{ci}$  和  $\alpha_{cq}$  成为唯一解.

根据式 (6), 以信号实部为例, 改进的变量切趾算法如下:

$$|g'_i(m)|^2 = \{I(m) + \alpha_{ci}(m)[I(m-1) + I(m+1)]\}^2 \quad (10)$$

式 (10) 对  $\alpha_{ci}$  求偏导数并令等于零, 计算出最佳参数  $\alpha_{ci}$ :

$$\alpha_{ci}(m) = -\frac{I(m)}{[I(m-1) + I(m+1)]} \quad (11)$$

最终的输出图像实部是

$$g'_i(m) = \begin{cases} I(m), & \alpha_{ci}(m) < 0 \\ I(m) + \alpha_{ci}(m)[I(m-1) + I(m+1)], & 0 \leq \alpha_{ci}(m) \leq 1/2 \\ I(m) + (1/2)[I(m-1) + I(m+1)], & \alpha_{ci}(m) > 1/2 \end{cases} \quad (12)$$

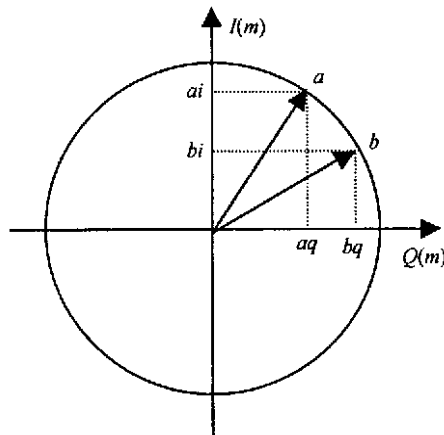


图 1 信号能量模值

同理, 信号虚部的最佳参数  $\alpha_{cq}$  :

$$\alpha_{cq}(m) = -\frac{Q(m)}{[Q(m-1) + Q(m+1)]} \quad (13)$$

最终的输出图像虚部是

$$g'_q(m) = \begin{cases} Q(m), & \alpha_{cq}(m) < 0 \\ Q(m) + \alpha_{cq}(m)[Q(m-1) + Q(m+1)], & 0 \leq \alpha_{cq}(m) \leq 1/2 \\ Q(m) + (1/2)[Q(m-1) + Q(m+1)], & \alpha_{cq}(m) > 1/2 \end{cases} \quad (14)$$

最终的输出图像是

$$g'(m) = g'_i(m) + j \times g'_q(m) \quad (15)$$

上面针对复信号的实部和虚部图像, 分别求出各自最佳的加权窗参数  $\alpha_{ci}$ ,  $\alpha_{cq}$ 。一般来讲,  $\alpha_c$ ,  $\alpha_{ci}$  和  $\alpha_{cq}$  都是不相等的, 特别是  $\alpha_{ci}$  和  $\alpha_{cq}$  不相等时, 用传统变量切趾算法解出的加权窗参数  $\alpha_c$  处理复信号的实部和虚部图像不能获得最佳效果。使用改进的变量切趾算法对复信号的实部和虚部图像分别进行最佳处理, 最终的输出图像才是最好的。

## 4 实验

为了证明本文改进的变量切趾算法的有效性, 我们对美国海军实验室公开的真实波音 727 飞机 ISAR 图像数据进行了处理。该数据由工作频率 9GHz, 带宽 150MHz 的频率步进雷达采集得到  $128 \times 128$  的复数图像。实验中分别采用矩形窗算法、汉明窗算法、传统变量切趾算法和改进的变量切趾算法对原始数据进行处理, 并比较了加权窗参数  $\alpha_c$ ,  $\alpha_{ci}$  和  $\alpha_{cq}$  的最佳选择。

图 2 为矩形窗算法得到的飞机图像, 图 3 为汉明窗算法得到的飞机图像, 图 4 为传统变量切趾算法得到的飞机图像, 图 5 为改进的变量切趾算法得到的飞机图像, 图 6 为加权窗参数选择的结果, 从上到下依次是参数  $\alpha_c$ ,  $\alpha_{ci}$  和  $\alpha_{cq}$ 。通过研究比较, 矩形窗算法具有高的分辨率和旁瓣电平; 汉明窗算法能够最好地抑制旁瓣电平, 图像的分辨率损失也最大; 变量切趾算法在矩形窗和汉明窗间获得了折衷, 在获得图像高分辨率的同时, 有效抑制了旁瓣电平。

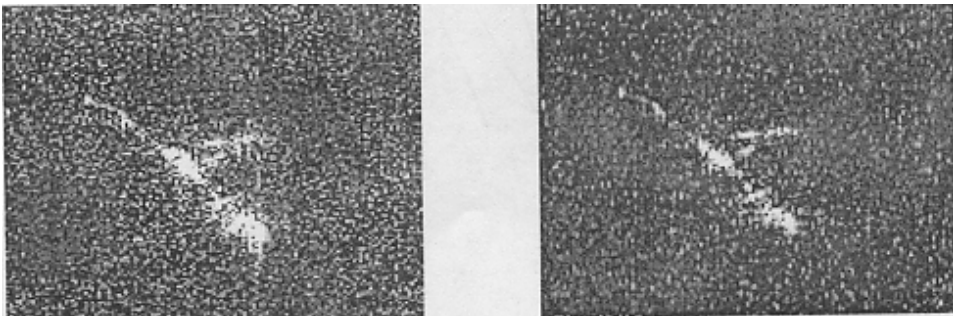


图 2 矩形窗算法

图 3 汉明窗算法



图 4 变量切趾算法

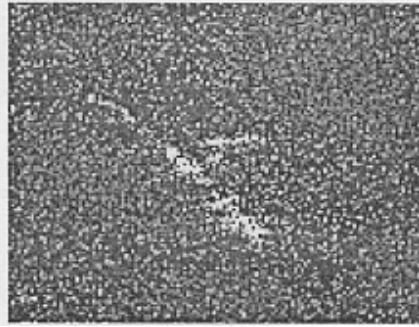


图 5 改进的变量切趾算法

从图 6 可以发现最佳加权窗参数  $\alpha_c$ ,  $\alpha_{ci}$  和  $\alpha_{cq}$  都是不相等的, 特别是  $\alpha_{ci}$  和  $\alpha_{cq}$  不相等, 因此, 原有的变量切趾算法和改进的变量切趾算法得到的图像结果不同。比较图 4 和图 5, 可见通过增强约束条件, 对复信号的实部和虚部图像分别进行最佳处理获得的输出图像与原有方法输出图像结果相比, 图 5 像素尺寸更小, 图像分辨率更高, 图 5 目标区域外的旁瓣电平总体上更小。

为了更清楚地说明问题, 我们对模拟多频信号进行同样的处理, 多频信号的归一化频率为 0.03, 0.1, 0.115; 幅度分别为 17.7828, 10.0000, 12.5893, 处理结果如图 7- 图 9 所示。

图 7 为矩形窗算法得到的多频信号频谱, 图 8 为改进变量切趾算法得到的多频信号频谱, 图 9 为传统变量切趾算法得到的多频信号频谱。通过比较可以发现, 图 8 和图 9 都实现了变量切趾技术的目标, 改进的变量切趾算法的信号频谱更接近矩形窗算法的信号频谱, 因此, 与传统变量切趾算法相比, 改进的变量切趾算法的分辨率更高。在图 8 和图 9 上, 在多频信号的主谱峰以外的信号旁瓣区域内, 变量切趾算法的信号总能量要大于改进的变量切趾算法的信号总能量。总之, 仿真实验证明了改进的变量切趾算法具有更高的分辨率和更低的旁瓣电平。

### 5 结 论

本文研究了 SAR 图像超分辨率技术之一的变量切趾算法, 该方法利用非线性优化技术能够改善图像分辨率, 降低信号自身的旁瓣电平。文中对变量切趾算法进行了详细推导和分析, 在此基础上, 针对权参数解唯一性问题, 进一步加强约束, 将约束分解到信号的实部和虚部,

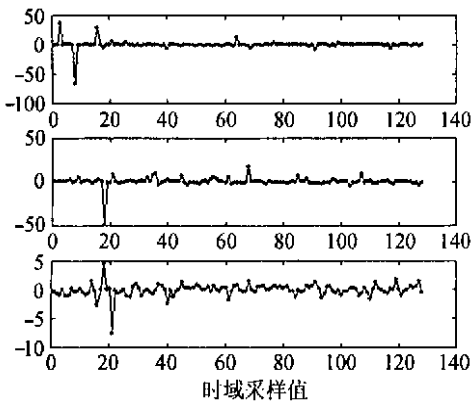


图 6 参数  $\alpha_c$ 、 $\alpha_{ci}$  和  $\alpha_{cq}$

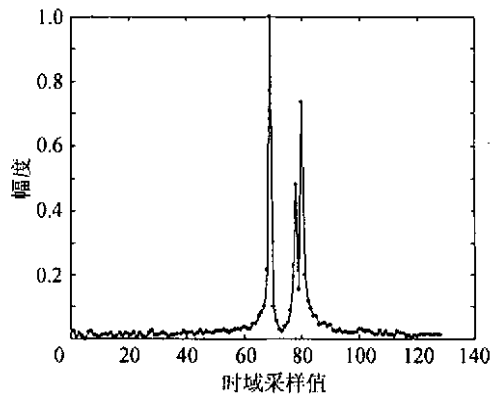


图 7 矩形窗算法

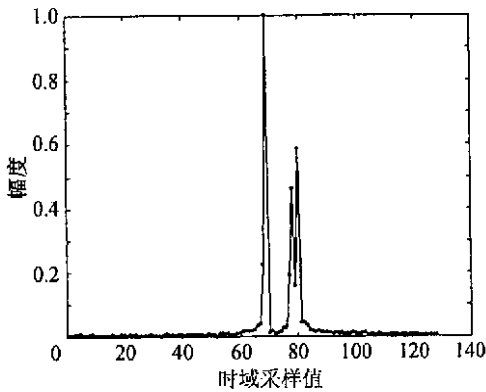


图 8 改进的变量切趾算法

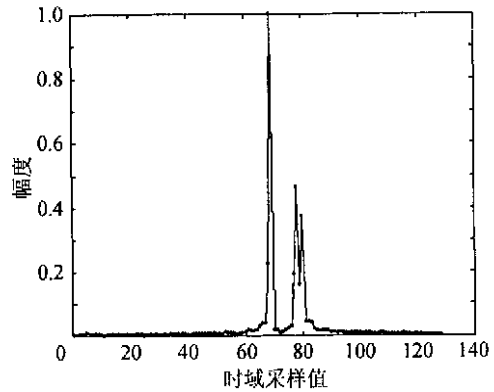


图 9 变量切趾算法

提出了改进的变量切趾技术和算法实现过程。对一幅真实二维 ISAR 图像进行了两种方法的处理, 与原有方法相比, 改进后方法获得更高的分辨率和更低的旁瓣电平。实验结果证明了改进的变量切趾算法的正确性和有效性。

### 参 考 文 献

- [1] Degraaf S R. SAR imaging via modern 2D spectral estimation methods. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1998, 7(5): 729-761.
- [2] Benitz G R. Adaptive high definition imaging. *Proc. of SPIE*, 1994, Vol.2230: 106-119.
- [3] Li J, Stoica P. An adaptive filtering approach to spectral estimation and SAR imaging. *IEEE, Trans. on SP.*, 1996, 44(6): 1469-1484.
- [4] Thomas G, et al.. SAR sidelobe apodization using parametric windows, *Proc. of SPIE*, 1999, Vol.3721: 68-77.
- [5] Stankwitz H C, et al.. Non-linear apodization for sidelobe control in SAR imagery. *IEEE Trans. on AES.*, 1995, 31(1): 267-279.
- [6] Harris F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proc. IEEE*, 1978, 66(1): 135-147.

王一丁: 男, 1967 年生, 副研究员, 已发表论文 30 余篇, 其中 1 篇被 SCI 收录, 15 篇被 EI 收录, 并获专利一项。目前主要从事合成孔径雷达信号处理和军事目标识别等方面的研究。

纪慧波: 男, 1978 年生, 硕士生, 研究方向为信号与信息处理。

洪峻: 男, 1960 年生, 研究员, 十多年来主要从事 SAR 及其应用研究, 完成了多项研究课题, 获得了多项中科院科学技术进步奖。目前主要的研究方向是 SAR 图像处理、定标及应用技术。