



一种基于改进 SVA 的 SAR 旁瓣抑制算法

倪崇^{①②*}, 王岩飞^①, 徐向辉^①, 周长义^①, 崔鹏飞^{①②}

① 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;

② 中国科学院研究生院, 北京 100039

* E-mail: chidu_2002@163.com

收稿日期: 2009-10-30; 接受日期: 2010-03-29

中国科学院创新基金(批准号: 053Z170138)资助项目

摘要 针对现有的 Spatially Variant Apodization(SVA)算法不能有效抑制旁瓣或损失主瓣能量的问题, 该文提出了一种改进的 SVA 算法. 该算法把传统的滤波器从 3 点扩展到 5 点, 并且根据采样率的不同, 设定相应的滤波器参数, 得到满足约束优化理论的最优解. 改进的 SVA 算法能够与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像算法相结合, 在距离压缩和方位压缩中, 分别利用改进的 SVA 算法来抑制旁瓣. 该算法适用于任意奈奎斯特采样率, 既能有效地抑制旁瓣, 又能保持主瓣的能量和信号的高分辨率. 实验结果表明, 与传统的频域加窗方法相比, 该方法能够在保持图像高分辨率的前提下, 更有效地抑制旁瓣.

关键词

合成孔径雷达
旁瓣抑制
分辨率
SVA

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种高分辨率成像雷达, 不受气候和昼夜影响, 可以在能见度极差的气象条件下得到类似光学照相的高分辨率雷达图像. 常规 SAR 发射线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号, 并对接收到的回波信号进行距离向和方位向的匹配滤波, 得到被测区域的雷达图像. 由于成像系统的二维频域支撑域有限, 使得 SAR 的脉冲响应函数在距离向和方位向均为 sinc 函数^[1], 旁瓣电平很高. 特别是对于舰船和建筑等雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)很大的成像场景, 旁瓣抑制显得尤为重要. 通常通过在频域加窗^[2]来抑制图像的旁瓣, 但这种方法会使主瓣展宽, 损失分辨率, 影响 SAR 图像的质量.

利用切趾滤波^[3]和神经网络^[4]的方法可以在不损失分辨率的情况下, 极大地压低旁瓣电平, 但这两种方法都需要事先给出目标函数, 通过迭代的方法来抑制旁瓣. Spatially Variant Apodization(SVA)算法^[5]

在不需要任何先验知识的前提下, 利用非线性技术, 能够有效地抑制旁瓣. SVA 算法在超分辨率技术^[6]、稀疏孔径填充处理^[7]、斜视 SAR^[8]、干涉 SAR^[9]、逆 SAR^[10]和探测雷达^[11]中都有广泛的应用, 能够实现 SAR 的高分辨率成像. Stankwitz 提出的 SVA 算法^[12]只对整数倍奈奎斯特采样的信号有效; Brian Hendee Smith 提出了非整数倍奈奎斯特采样率的通用 SVA(General SVA, GSVA)算法^[13], 这种方法能够在保持分辨率的前提下较好地抑制旁瓣, 但还会有一些剩余旁瓣; Carlos Castillo-Rubio 在 GSVA 的基础上, 提出一种鲁棒的 SVA(Robust SVA, RSVA)算法^[14], 把滤波器从 3 点扩展到 5 点, 在任意奈奎斯特采样率的情况下都能够有效地抑制旁瓣, 但该方法有时会损失主瓣能量. 本文在 RSVA 的基础上提出了一种改进的 SVA(Modified SVA, MSVA)算法, 该算法利用约束优化理论, 根据参数值的不同分情况进行讨论, 在任意奈奎斯特采样率的情况下, 既能有效地抑

制旁瓣, 又能保持主瓣的能量和图像的分辨率. 把这种新方法应用到 SAR 成像过程中, 能够得到低旁瓣的高质量 SAR 图像, 实验结果验证了该方法的有效性.

1 SVA 算法及其改进

设 $g(m)$ 表示未加窗的 LFM 信号匹配滤波的结果, f_s 表示采样率, f_0 表示信号带宽, $g'(m)$ 表示加窗后的信号, m 表示序号.

这里考虑一个通用对称的 $2n+1$ 有限冲击相应滤波器, 则

$$g'(m) = ag(m) + \sum_{i=1}^n w_i \left[g\left(m + i \left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor\right) + g\left(m - i \left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor\right) \right], \quad (1)$$

其中 a 和 w_i 是滤波器的系数, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整的意思.

为了抑制旁瓣, 要找到合适的 a 和 w_i , 使得 $|g'(m)|$ 最小. 但使得 $|g'(m)|$ 最小的无约束解总是等于零, 因此需要对 a 和 w_i 加一些约束条件.

(1)式在频域的窗函数形式为

$$W(f) = a + \sum_{i=1}^n 2w_i \cos\left(2\pi i \frac{f}{f_s}\right), \quad (2)$$

其中, 频率 f 的取值范围为 $\left[-\frac{f_0}{2}, \frac{f_0}{2}\right]$.

(2)式的脉冲响应为

$$I(m) = a \sin c(w_s m) + \sum_{i=1}^n w_i \left\{ \sin c\left[w_s \left(m - i \left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor\right)\right] + \sin c\left[w_s \left(m + i \left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor\right)\right] \right\}, \quad (3)$$

其中, $\sin c(m) = \frac{\sin(\pi m)}{\pi m}$, $w_s = \frac{f_0}{f_s}$.

为了避免产生无效的窗函数, 引入约束式(4)~(6), 其中归一化增益要求(4)式成立, 正对称函数要求在中心采样处值最大((5)式), 并且向两边单调递减((6)式).

$$I[0] = 1, \quad (4)$$

$$W\left[\frac{f_0}{2}\right] \geq 0, \quad (5)$$

$$W[0] \geq W\left[\frac{f_0}{2}\right], \quad (6)$$

令 $n=2$, (4)式可以简化为

$$a = 1 - 2w_1 \sin c\left(\left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor w_s\right) - 2w_2 \sin c\left(2\left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor w_s\right). \quad (7)$$

(5)~(6)式也可以简化, 简化的同时把 a 用(7)式代替,

$$\left[\sin c\left(\left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor w_s\right) - \cos(\pi w_s) \right] w_1 + \left[\sin c\left(2\left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor w_s\right) - \cos(2\pi w_s) \right] w_2 \leq 0.5, \quad (8)$$

$$[\cos(\pi w_s) - 1] w_1 + [\cos(2\pi w_s) - 1] w_2 \leq 0, \quad (9)$$

这时, (1)式可以表示成

$$g'(m) = g(m) + \left\{ \begin{aligned} &-2 \sin c\left(\left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor w_s\right) g(m) \\ &+ g\left(m + \left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor\right) + g\left(m - \left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor\right) \end{aligned} \right\} w_1 + \left\{ \begin{aligned} &-2 \sin c\left(2\left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor w_s\right) g(m) \\ &+ g\left(m + 2\left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor\right) + g\left(m - 2\left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor\right) \end{aligned} \right\} w_2. \quad (10)$$

还要对 w_i 做一些限制,

$$0 \leq w_1 \leq 1, \quad (11)$$

$$0 \leq w_2 \leq 1. \quad (12)$$

这是一个约束优化问题^[15], 在(8), (9), (11)和(12)式的约束下, 求 $|g'(m)|$ 的最小值. Brian Hendee Smith 的 GSVA 算法只考虑一维($n=1$)的情况^[13], 比较 w_1 的两个端点(最小值和最大值)处 $g'(m)$ 的值, 如果两个端点处 $g'(m)$ 的值符号相反, 给 $g'(m)$ 赋零值; 如果两端点处的 $g'(m)$ 的值符号相同, 那么取绝对值较小的那个作为 $g'(m)$ 的取值, GSVA 的算法流程如图 1 所示. GSVA 算法能够在一定程度上抑制旁瓣, 但还有一些剩余旁瓣.

这些不等式表示的直线构成一个多边形, 根据约束优化的理论, 极值在多边形的顶点处取得. Carlos Castillo-Rubio 的 RSVA 算法^[14]是从某个顶点开始计算 $g'(m)$ 的取值, 如果遇到某两个顶点处 $g'(m)$ 的值符号相反, 那么停止计算其它顶点处 $g'(m)$ 的值, 直接给 $g'(m)$ 赋零值; 如果所有顶点处的 $g'(m)$ 的值符号都相同, 那么取绝对值最小的那个作为 $g'(m)$ 的取值. RSVA 的算法流程如图 2 所示.

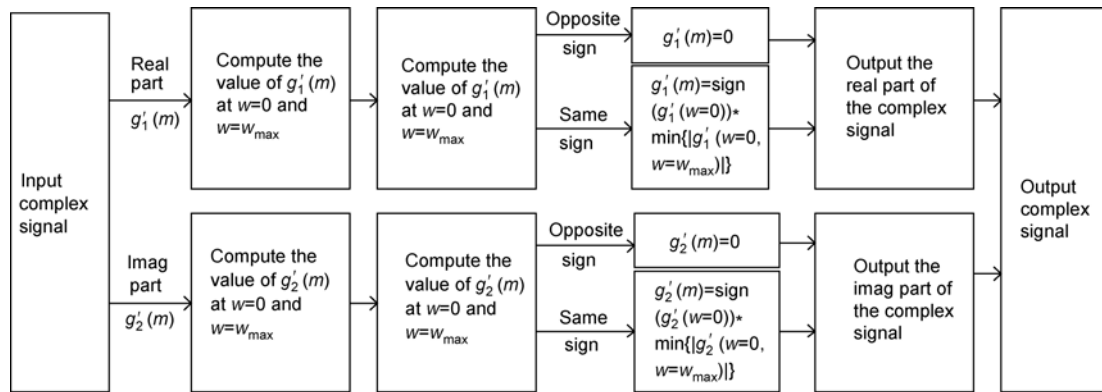


图 1 GSVA 的算法流程

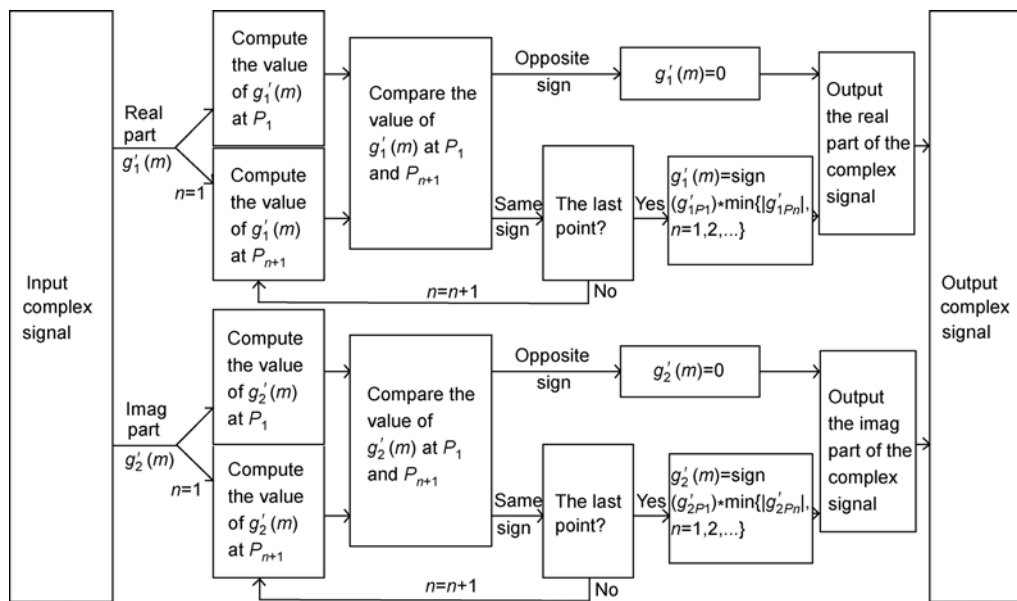


图 2 RSVA 的算法流程

RSVA 算法^[14]能够有效地抑制旁瓣, 但有时会降低主瓣能量, 原因在于: 有些顶点可能不在有效区内(这对旁瓣是没有影响的), 当 $g(m)$ 在主瓣内时, 这时如果该顶点处 $g'(m)$ 的取值比原来该处主瓣的取值小, 那么该点处 $g'(m)$ 就会取该较小值, 使主瓣能量降低. 因此有必要根据不等式中 w_i 的系数的不同取值, 分情况进行讨论, 不同情况下有效的多边形是不同的. 为了方便起见, 记

$$p_a = \sin c \left(\left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor w_s \right) - \cos(\pi w_s),$$

$$p_b = \sin c \left(2 \left\lfloor \frac{f_s}{f_0} \right\rfloor w_s \right) - \cos(2\pi w_s),$$

$$p_c = \cos(\pi w_s) - 1,$$

$$p_d = \cos(2\pi w_s) - 1.$$

在 w_1 - w_2 的二维平面内, (9)式所表示的直线过零点 $P_1(0,0)$; (9)式所表示的直线与(8)式所表示的直线的交点是 $P_2(0.5/(p_a - p_b \cdot p_c/p_d), 0.5p_c/(p_b \cdot p_c - p_a \cdot p_d))$; (8)式所表示的直线与 w_2 轴的交点为 $P_3(0, 0.5/p_b)$, 与 w_1 轴的交点为 $P_4(0.5/p_a, 0)$; (12)式所表示的直线与 w_2 轴的交点为 $P_5(0,1)$, 与(8)式所表示的直线的交点为 $P_6((0.5 - p_b)/p_a, 1)$; (11)式所表示的直线与 w_1 轴的交点为 $P_7(1, (0.5 - p_a)/p_b)$, 与(12)式所表示的直线的交点为 $P_8(1,1)$. 如图 3 所示, 根据参数值不同, 分成 15 种情况讨论, 不同情况的有效

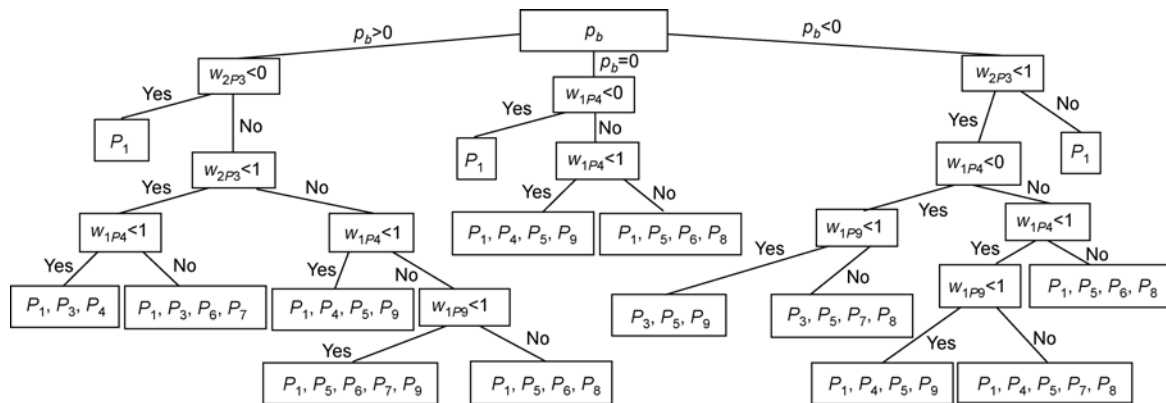


图 3 MSVA 的分情况讨论框图

点是不同的. 计算不同有效点的值, 按照上面介绍的规则进行计算和判决, 得到的信号既保持了主瓣能量, 又有效地抑制了旁瓣.

更一般地, 在(8), (9), (11)和(12)式的约束下, 要求 $|g'(m)|$ 的最小值, 可以先分别求 $|g'(m)|$ 的最大值和最小值, 即

$$\min |g'(m)|, \quad \text{s.t. (8), (9), (11), (12)式}$$

和 $\max |g'(m)|, \quad \text{s.t. (8), (9), (11), (12)式}$

可以用单纯形法^[15]或内点法^[16]来求解该线性规划问题. 如果最大值和最小值的符号相反, 那么直接给 $g'(m)$ 赋零值; 如果最大值和最小值的符号相同, 那么把绝对值较小的那个赋给 $g'(m)$. 此处, 称这种改进

的 SVA 算法为 MSVA(Modified SVA), 算法流程如图 4 所示.

频域加窗, GSVA, RSVA 和 MSVA 的特点对比如表 1 所示.

频域加窗, GSVA, RSVA 和 MSVA 的联系和演化关系如图 5 所示.

MSVA 算法的一种情况如图 6 所示.

对传统的加窗方法, GSVA, RSVA, MSVA 的运算量和判决次数进行了分析, 归纳如表 2 所示, 其中 M 是图像的大小. 采用图 7 所用的参数进行仿真, 各种算法的运行时间也在表 2 中有显示(仿真环境: Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU T6500@2.10 GHz).

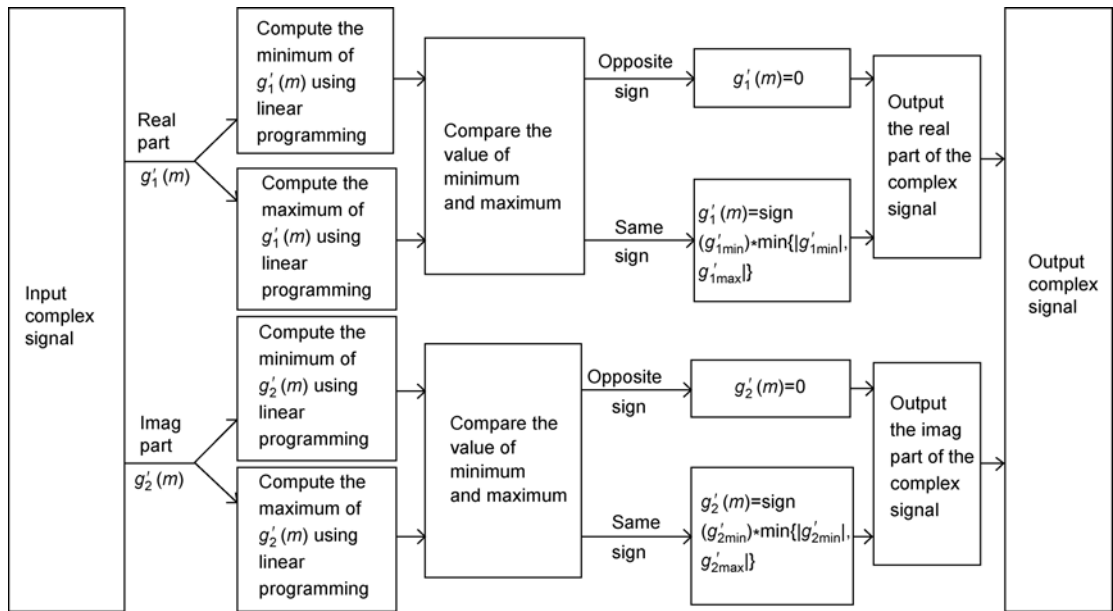


图 4 MSVA 算法流程

表 1 各种算法的特点

算法	特点
频域加窗	一定程度上抑制旁瓣, 但主瓣展宽
GSVA	较好地抑制旁瓣, 主瓣不展宽
RSVA	有效的抑制旁瓣(理想情况下完全抑制), 主瓣不展宽, 但有时损失主瓣能量
MSVA	有效的抑制旁瓣(理想情况下完全抑制), 主瓣不展宽, 并且不损失主瓣能量

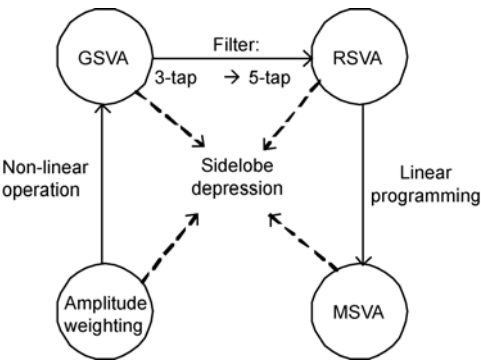


图 5 各种算法之间的联系和演化关系

表 2 各种算法运算量分析

	传统加窗方法	GSVA	RSVA	MSVA
乘法次数	$2M$	$4M$	$18M$	最多 $10M$
加法次数	$2M$	$4M$	$54M$	最多 $30M$
判决次数	0	M	最多 $8M$	最多 $9M$
运行时间	0.0210 s	0.0450 s	0.1760 s	0.1530 s

旁瓣抑制效果越好, 运算量也相应随之增长. 在批量处理的时候, 可以采用比较粗糙的方法; 精细处理的时候可以采纳比较精确的方法.

如图 7 所示, LFM 信号带宽为 400 MHz, 脉冲宽度为 1 μ s, 采样频率为 560 MHz, 分别采用频域加窗和 SVA 算法来抑制信号的旁瓣, 其中, 实线是矩形窗, 虚线是 Hanning 窗, o 线是 GSVA, 点线是 RSVA, *线是 MSVA. 从图 7 和表 3 都可以看出, Hanning 窗能够抑制旁瓣, 但主瓣被展宽; GSVA 能够保持主瓣宽度,

但还有一些剩余旁瓣; RSVA 能够保持主瓣宽度, 并且有效地抑制旁瓣, 但主瓣能量降低; MSVA 能够保持主瓣能量、有效抑制旁瓣, 图像分辨率也保持不变. 表 3 中的各主瓣能量都是除以矩形窗的主瓣能量进行归一化以后的结果. 对于理想的 LFM 信号, RSVA 和 MSVA 能够完全抑制旁瓣, 所以它们的 PSLR 和 ISLR 这两项指标都记为“有效抑制”.

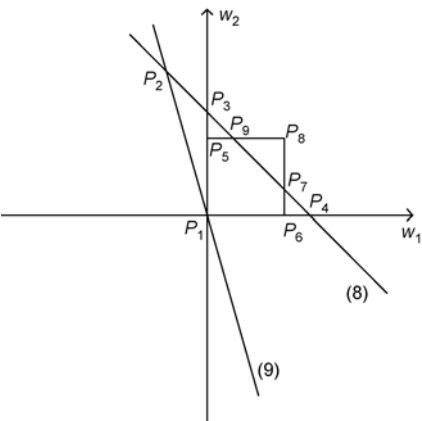


图 6 各直线位置示意图(其中一种情况)

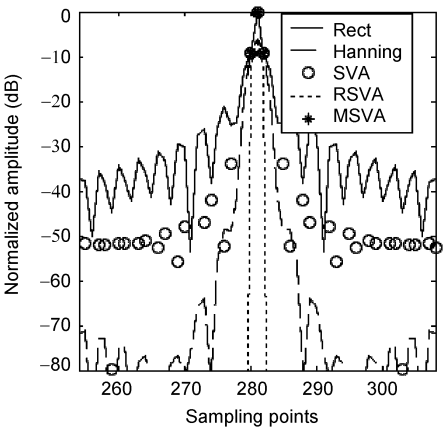


图 7 各算法性能比较

表 3 各算法性能比较

	矩形窗	Hanning 窗	GSVA	RSVA	MSVA
PSLR (dB)	-13.25	-31.46	-33.77	有效抑制	有效抑制
ISLR (dB)	-9.69	-34.28	-36.21	有效抑制	有效抑制
IRW	1	1.60	1	1	1
主瓣能量	1	1	1	0.48	1

2 基于 MSVA 的 SAR 旁瓣抑制算法

在 SAR 成像过程中, MSVA 算法可以分别用在距离向压缩和方位向压缩^[17]中, 达到抑制旁瓣的目的, 这里把 MSVA 算法和 Chirp Scaling(CS)算法^[18]结合起来, 简称 MSVA-CS 算法, 如图 8 所示。

设雷达发射信号的复包络为 $s_t(\tau)=a_r(\tau)\exp(j\pi K\tau^2)$, 对场景中的一点目标进行分析, 接收到的回波为

$$s(\tau, t; R_0) = a_r \left(\tau - \frac{2R(t; R_0)}{c} \right) a_a(t) \times \exp \left[-j\pi K \left(\tau - \frac{2R(t; R_0)}{c} \right)^2 \right] \times \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t; R_0) \right], \quad (13)$$

其中 τ 为快时间, t 为慢时间, R_0 是点目标到飞行航线的垂直距离, K 是发射的 LFM 信号的调频率, a_r 和 a_a 分别为雷达 LFM 信号的窗函数和方位窗函数, λ 为波长, c 为光速。

经过方位向 FFT, CS 相位函数操作、距离压缩、二次距离压缩、距离徙动校正和距离向 IFFT 之后, 得到的信号^[18]为

$$s(\tau, f_a; R_0) = C \sin c \left[K \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \right] a_a \left(-\frac{r\lambda f_a}{2V^2(r)} \right) \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r \left[1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V(r)} \right)^2 \right]^{1/2} - j\Theta_\Delta(f_a; r) \right\}, \quad (14)$$

其中 C 是常数, f_a 表示方位向频率, V 表示载机的速度, Θ_Δ 表示剩余相位误差。

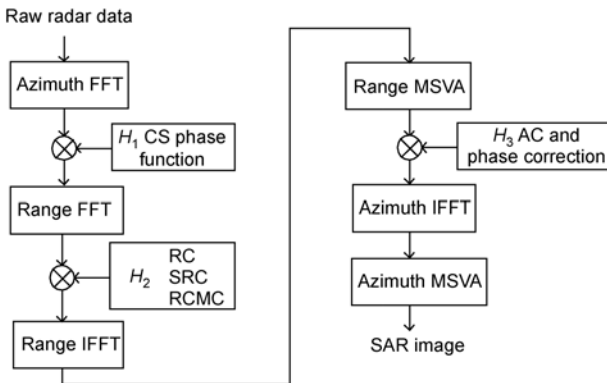


图 8 MSVA-CS 算法结构图

(14)式中的 $\sin c \left[K \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \right]$ 是距离压缩的结果, 利用 MSVA 可以抑制它的旁瓣。记

$$s_{\text{real}}(\tau, f_a; R_0) = \text{real}[s(\tau, f_a; R_0)],$$

$$s_{\text{imag}}(\tau, f_a; R_0) = \text{imag}[s(\tau, f_a; R_0)],$$

$$s_{\text{angle}}(\tau, f_a; R_0) = \text{angle}[s(\tau, f_a; R_0)],$$

其中 real, imag, angle 分别表示取实部、虚部和相位角的操作。

对 $s(\tau, f_a; R_0)$ 的实部和虚部分别进行 MSVA 操作, 得到 $s'_{\text{real}}(\tau, f_a; R_0)$ 和 $s'_{\text{imag}}(\tau, f_a; R_0)$, 在进行 MSVA 时,

$$w_{sr} = \frac{B_r}{f_{sr}},$$

其中 B_r 是距离向带宽, f_{sr} 是距离向采样频率。

经过距离向 MSVA 之后的信号^[19]为

$$s(\tau, f_a; R_0) = \sqrt{s_{\text{real}}'^2(\tau, f_a; R_0) + s_{\text{imag}}'^2(\tau, f_a; R_0)} \times \exp[j \times s_{\text{angle}}(\tau, f_a; R_0)], \quad (15)$$

对 $s(\tau, f_a; R_0)$ 进行方位向脉冲压缩、剩余相位补偿、方位向 IFFT, 得到^[18]

$$s(\tau, t; R_0) = C g_r \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \sin c(B_a t). \quad (16)$$

(14)式中的 $g_r \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right)$ 是旁瓣抑制后的距离向

信号, $\sin c(B_a t)$ 是方位压缩的结果。和距离向类似, 利用 MSVA 可以抑制方位向的旁瓣, 记

$$s_{\text{real}}(\tau, t; R_0) = \text{real}[s(\tau, t; R_0)],$$

$$s_{\text{imag}}(\tau, t; R_0) = \text{imag}[s(\tau, t; R_0)],$$

$$s_{\text{angle}}(\tau, t; R_0) = \text{angle}[s(\tau, t; R_0)],$$

对 $s(\tau, t; R_0)$ 的实部和虚部分别进行 MSVA 操作, 得到实部 $s'_{\text{real}}(\tau, t; R_0)$ 和虚部 $s'_{\text{imag}}(\tau, t; R_0)$, 在进行方位向 MSVA 时,

$$w_{sa} = \frac{B_a}{\text{PRF}} = \frac{2V\beta}{\lambda} \frac{1}{\text{PRF}},$$

其中 B_a 是方位向带宽, PRF 是脉冲重复频率, V 代表载机速度, β 代表方位向天线波束角。

经过方位向 MSVA 之后的信号^[19]为

$$s(\tau, t; R_0) = \sqrt{s_{\text{real}}'^2(\tau, t; R_0) + s_{\text{imag}}'^2(\tau, t; R_0)} \times \exp[j \times s_{\text{angle}}(\tau, t; R_0)]. \quad (17)$$

最后得到的信号可以近似表示为

$$s(\tau, t; R_0) = Cg_r\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right)g_a(t), \quad (18)$$

其中 $g_r\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right)$ 表示旁瓣抑制后的距离向信号, $g_a(t)$ 表示旁瓣抑制后的方位向信号.

3 实验结果及性能分析

为了检验 MSVA 算法应用到 SAR 成像中的效果, 本文分别采用频域加窗以及 MSVA 算法在 SAR 成像过程中进行旁瓣抑制, 并把它们的处理结果进行对比. 此处设定 SAR 工作模式为条带式正侧视, 选取的 SAR 系统参数如表 4 所示.

表 5 是距离向和方位向处理后的各项指标. 图 9 是矩形窗加权的点目标, 图 10 是 Hanning 窗加权的点目标, 图 11 是 MSVA 的点目标, 它们与表 5 是一致的. 图 12 是 SAR 距离向剖面图, 实线是矩形窗加权的结果, 虚线是 Hanning 窗加权的结果, 点线是 MSVA 的结果. 可见, Hanning 窗能够抑制旁瓣, 但主瓣展宽了 1.60 倍, MSVA 算法能够更有效地抑制旁瓣, 主瓣也没有展宽. 图 13 是 SAR 方位向剖面图, 结果跟距离向处理后的情况类似.

图 14 是三个目标的例子. 两个具有相同 RCS 的

表 4 SAR 系统参数

参数	值	参数	值
载波波长	0.03 m	脉冲重复频率	400 Hz
发射信号带宽	400 MHz	载机速度	100 m/s
脉冲持续时间	1 μs	方位向天线长度	0.5 m
信号采样频率	500 MHz	场景中心斜距	10 km

表 5 性能比较

	准则	矩形窗	Hanning	MSVA
距离向	PSLR (dB)	-13.23	-31.48	有效抑制
	ISLR (dB)	-9.65	-34.26	有效抑制
	IRW	1	1.60	1
方位向	PSLR (dB)	-13.21	-31.47	有效抑制
	ISLR (dB)	-9.64	-34.26	有效抑制
	IRW	1	1.60	1

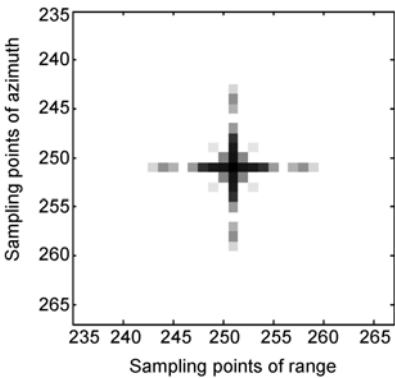


图 9 矩形窗点目标

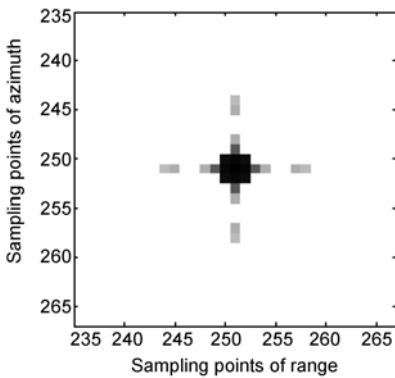


图 10 Hanning 窗点目标

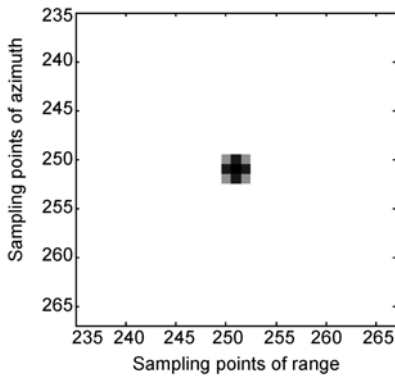


图 11 MSVA 点目标

目标距离很近, 刚能分开, 另一个距离较远的目标 RCS 比这两个点目标低 40 dB. 图 15 是加矩形窗的处理结果, 可见, 两个 RCS 较大的目标能够检测到, RCS 较小的目标被湮没在旁瓣当中. 图 16 是加 Hanning 窗的处理结果, 因为主瓣被展宽, 所以 RCS 较大的两个目标已经区分不开, RCS 较小的目标勉强能被检测到. 图 17 是 MSVA 的处理结果, 三个目标都清晰可

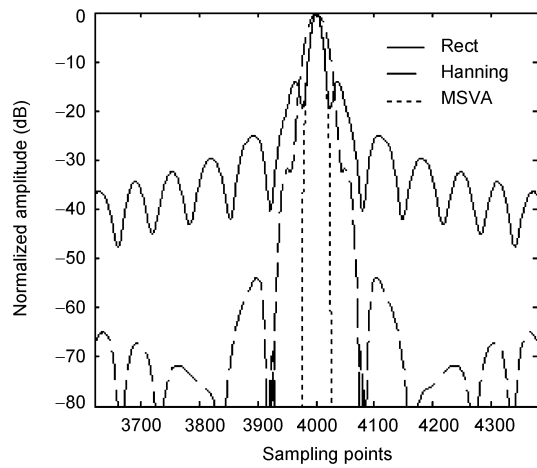


图 12 距离向剖面图

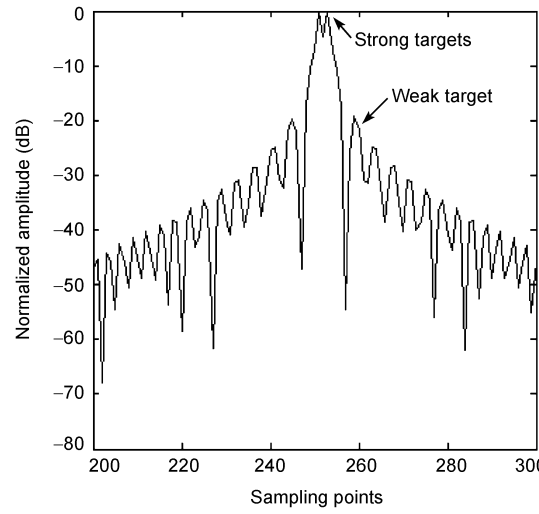


图 15 三个目标, 矩形窗

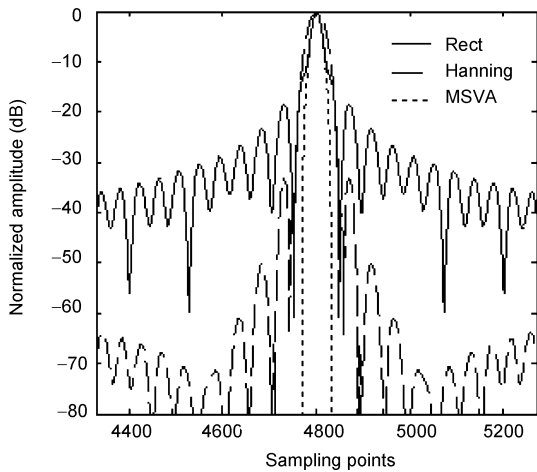


图 13 方位向剖面图

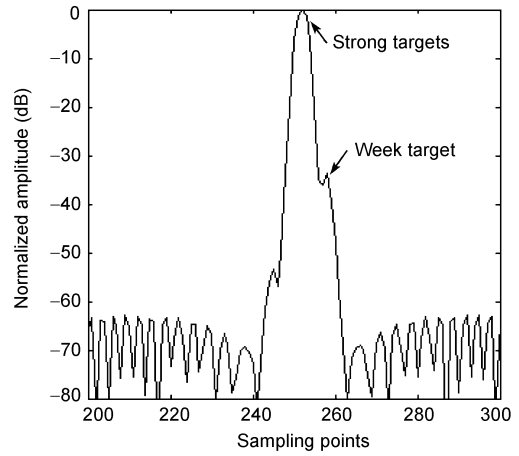


图 16 三个目标, Hanning 窗

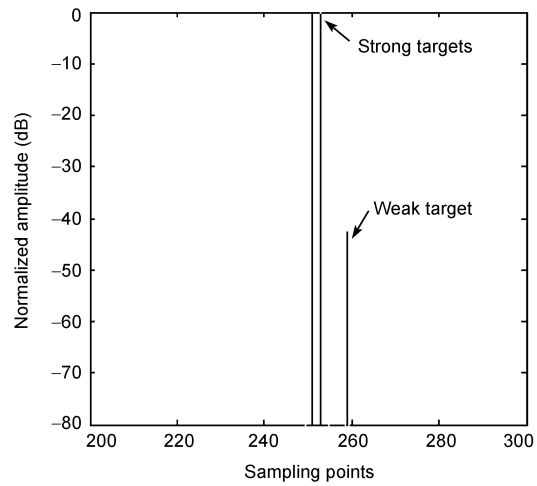


图 14 三个点目标的位置

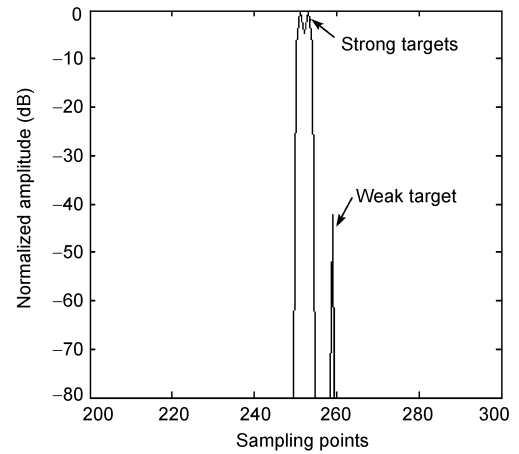


图 17 三个目标, MSVA

辨, 并且旁瓣被有效地抑制.

把本文的 MSVA 方法应用到实际数据中, 效果明显. 把 MSVA 方法应用到 RADARSAT 数据处理中, 图 18 是 Hanning 窗处理的结果, 图 19 是 GSVA 处理的结果, 图 20 是 MSVA 处理的结果. 可以看出, 跟频域加窗的方法相比, SVA 能够更有效地抑制旁瓣, 并且能够提高分辨率, 而 MSVA 抑制旁瓣的效果优于 GSVA. 如表 6 所示, 计算各种方法处理后的图像

表 6 各种方法图像对比度比较

	星载 SAR 图像	机载 SAR 图像
Hanning 窗	4.9251	9.7038
GSVA	7.3459	11.6527
MSVA	9.0378	12.6819

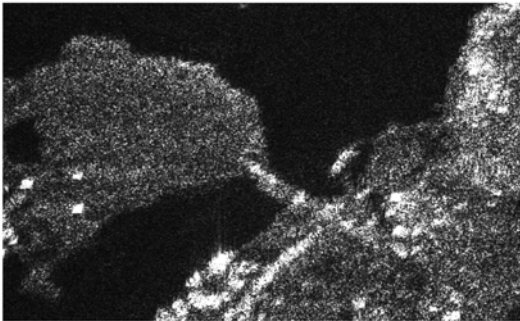


图 18 RADARSAT, Hanning 窗, 图像对比度 4.9251

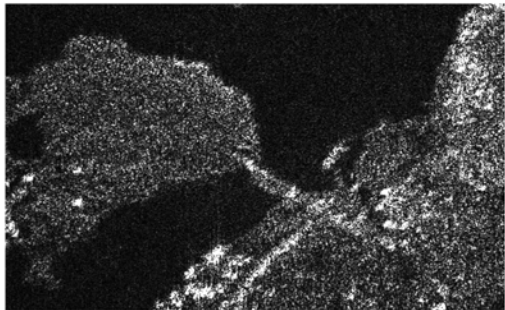


图 19 RADARSAT, GSVA, 图像对比度 7.3459

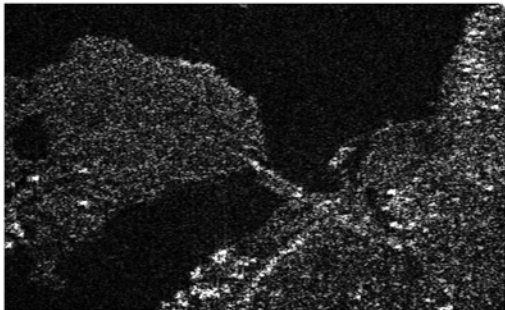


图 20 RADARSAT, MSVA, 图像对比度 9.0378

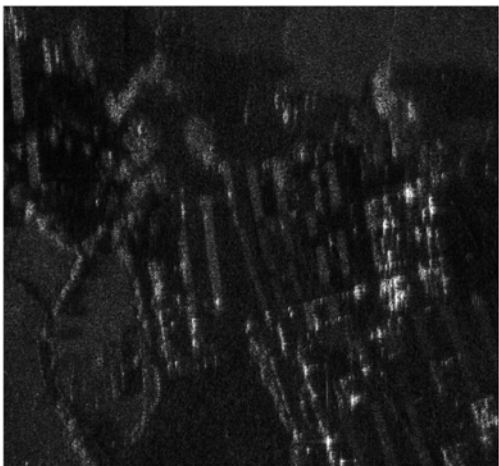


图 21 机载, Hanning 窗, 图像对比度 9.7038

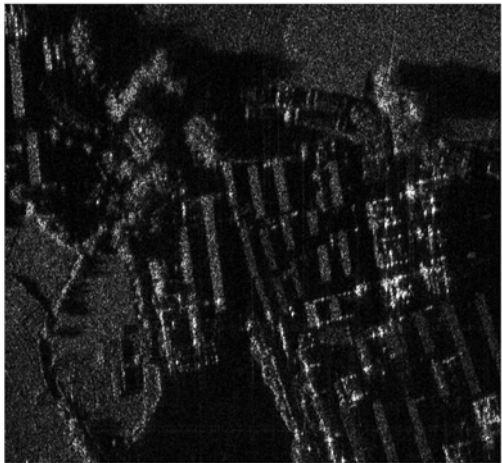


图 22 机载, GSVA, 图像对比度 11.6527

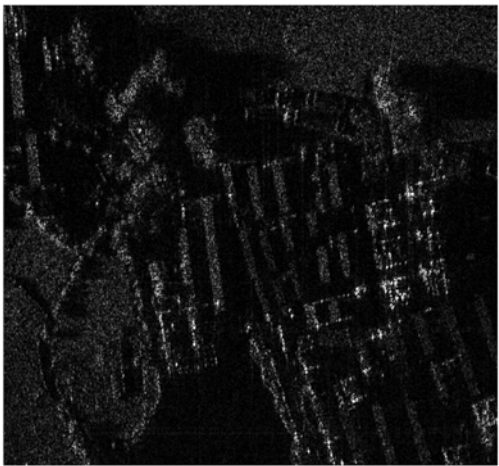


图 23 机载, MSVA, 图像对比度 12.6819

对比度, 经 MSVA 方法处理后的图像对比度最大, 这也说明该方法的有效性. 把 MSVA 方法应用到某机载 SAR 图像上, 效果也很明显, 如图 21~23 和表 6 所示. 图像对比度的定义^[20]如(19)式所示.

$$C = \frac{\sqrt{E\{I^2(m, n) - E[I^2(m, n)]\}^2}}{E[I^2(m, n)]}, \quad (19)$$

其中 C , $I^2(m, n)$, $E[\cdot]$ 分别表示图像的对比度、第 (m, n) 个像素的强度以及图像强度的均值.

4 结论

SAR 成像系统的二维频域支撑域有限, 使得 SAR 的脉冲响应函数在距离向和方位向均为 sinc 函数, 旁瓣电平很高, 通过频域加窗可以降低旁瓣电平,

但是主瓣的分辨率会降低. 跟频域加窗相比, SVA 算法能够在保持图像的高分辨率的同时, 更有效地抑制旁瓣. SVA 算法在超分辨率技术、稀疏孔径填充处理、斜视 SAR、干涉 SAR、逆 SAR 和探测雷达中都有广泛的应用, 能够实现 SAR 的高分辨率成像. 但原始的 SVA 算法对非整数倍奈奎斯特采样失效, 而一些改进的 SVA 算法都存在一定的缺陷(有剩余旁瓣或损失主瓣能量). 针对这些问题, 本文提出的 MSVA 算法, 把传统的滤波器从 3 点扩展到 5 点, 并且根据采样率的不同, 设定相应的滤波器参数, 得到满足约束优化理论的最优解. 该算法适用于任意奈奎斯特采样率, 不仅能有效地抑制旁瓣, 而且能保持图像的高分辨率和主瓣能量. 把 MSVA 算法应用到 SAR 成像处理中, 可以得到低旁瓣的高分辨率 SAR 图像.

参考文献

- 1 Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation. Norwood: Artech House, Inc., 2005
- 2 Nuttall A H. Some windows with very good sidelobe behavior. IEEE T Acoust, Speech, Signal Proc, 1981, 29: 84—91
- 3 张先义, 苏卫民, 史记, 等. 切趾滤波旁瓣抑制技术在合成孔径雷达中的应用. 电子与信息学报, 2008, 30: 902—905
- 4 Kwan H K, Lee C K. A neural network approach to pulse radar detection. IEEE T Aero Electron Syst, 1993, 29: 9—21
- 5 Stankwitz H C, Dallaire R J, Fienup J R. Spatially variant apodization for sidelobe control in sar imagery. In: Record of the 1994 IEEE National Radar Conference, 1994. 132—137
- 6 Stankwitz H C, Taylor S P. Super-resolution for SAR/ISAR RCS measurement using spatially variant apodization (Super-SVA). In: Antenna Measurement Techniques Association 17th Annual Meeting & Symposium, The Williamsburg Lodge, 1995. 251—256
- 7 Stankwitz H C, Kosek M R. Sparse aperture fill for sar using super-SVA. In: Proceedings of 1996 IEEE Radar Conference, Ann Arbor, MI, 1996. 70—75
- 8 Castillo-Rubio C, Romano S L, Burgos-Garcia M. Spatially variant apodization for squinted synthetic aperture radar images. In: IEEE Transactions on Image Processing, 2007. 16: 2023—2027
- 9 Zhai W S, Zhang Y H. Apply spatially variant apodization to SAR/INSAR image processing. In: 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan, China, 2007. 54—57
- 10 Xu X J, Narayanan R M. Enhanced resolution in SAR/ISAR imaging using iterative sidelobe apodization. IEEE T Image Proc, 2005, 14: 537—547
- 11 Fischer J, Pupeza I, Scheiber R. Sidelobe suppression using the SVA method for SAR images and sounding radars. In: 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2006), Dresden, Germany, 2006
- 12 Stankwitz H C, Dallaire R J, Fienup J R. Nonlinear apodization for sidelobe control in SAR imagery. IEEE T Aeros Electr Syst, 1995, 31: 267—279
- 13 Smith B H. Generalization of spatially variant apodization to noninteger nyquist sampling rates. IEEE T Image Proc, 2000, 9: 1088—1093
- 14 Castillo-Rubio C, Romano S L, Burgos-Garcia M. Robust SVA method for every sampling rate condition. IEEE T Aeros Electr Syst, 2007, 43: 571—580
- 15 胡良剑, 孙晓君. MATLAB 数学实验. 北京: 高等教育出版社, 2006
- 16 姜启源, 邢文训, 谢金星, 等. 大学数学实验. 北京: 清华大学出版社, 2005
- 17 Cheng Y P, Lu Y L, Lin Z P. A super resolution SAR imaging method based on CSA. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '02), 2002. 6: 3671—3673
- 18 Rancy R K, Runge H, Bamler R, et al. Precision SAR processing using chirp scaling. IEEE T Geosci Remote Sens, 1994, 32: 786—799
- 19 Ji H B, Wang Y D, Wu Y R, et al. A modified apodization method in SAR/ISAR processing. IGARSS2003, Toulouse, France, 2003. 6: 3991—3994
- 20 Berizzi F, Corsini G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization. IEEE T Aeros Electron Syst, 1996, 32: 1185—1191