

## 基于切趾滤波的线性调频步进信号栅瓣抑制方法

仲利华<sup>\*①②③</sup> 韩冰<sup>①②</sup> 胡东辉<sup>①②</sup> 丁赤飏<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 在线性调频步进信号中, 相邻子脉冲间的频谱重叠将导致脉冲压缩后出现较强的栅瓣, 弱小目标可能被强目标的栅瓣所遮掩。为此, 该文通过分析线性调频步进信号自相关函数的组成, 提出一种新的对子脉冲加权后信号进行切趾滤波的栅瓣抑制方法。通过对子脉冲频谱采用不同的窗函数加权, 改变子脉冲信号自相关函数旁瓣符号, 进而改变调频步进信号栅瓣位置处的符号, 通过多组不同加权结果的对比, 利用切趾滤波的思想实现栅瓣的识别与抑制。数值仿真和实际图像处理证实了该方法的有效性。

**关键词:** SAR 图像处理; 频谱重叠; 栅瓣抑制; 子脉冲加权; 切趾滤波

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)03-0545-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00944

## Grafting Lobe Suppression for Frequency-stepped LFM Signal by Apodization Filtering

Zhong Li-hua<sup>①②③</sup> Han Bing<sup>①②</sup> Hu Dong-hui<sup>①②</sup> Ding Chi-biao<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In the frequency-stepped chirp signal, the frequency spectrum overlap between the neighboring sub pulses would lead to grating lobes in the result of range compression. The weaker points may be masked or distorted by the grating lobes of strong points. In this paper, a grating lobe suppression algorithm is proposed based on apodization filtering. By weighting the spectrum of sub pulse signals with different functions, the apodization could be done through the results and the grating lobes could be eliminated. Numerical simulations and real data experiment confirm the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** SAR image processing; Spectrum overlap; Grating lobe suppression; Sub-pulse weighting; Apodization filtering

### 1 引言

在 SAR, ISAR 成像中, 为了获得高分辨率距离像, 需要发射大带宽信号, 如线性调频信号。然而, 当发射信号的瞬时带宽太大时, 系统成本和系统复杂度大大增加, 同时受到硬件性能的制约, 系统幅相误差变大, 信号质量下降, 难以满足高分辨率成像的要求。线性调频步进信号(Frequency-Stepped Chirp Signal, FSCS)<sup>[1]</sup> 是指连续发射一组经不同载频调制的子脉冲, 子脉冲为带宽较小的线性调频信号。对子脉冲回波采用频谱合成的方法等效获得大

带宽信号, 大大降低了系统的瞬时带宽, 成为获得高分辨率距离像的有效手段, 并广泛应用于高分辨率 SAR, ISAR 成像<sup>[2-5]</sup>。

通常, 在系统设计时, 线性调频步进信号的相邻子脉冲频谱之间会有一定的冗余, 这将导致脉冲压缩结果中出现较强的栅瓣。强目标的栅瓣不仅会引起虚假目标的出现, 还会导致弱小目标被淹没。针对线性调频步进信号栅瓣抑制的研究由来已久, 文献[6]分析了子脉冲带宽, 时宽和频率步进长度等因素对栅瓣的影响, 提出通过信号参数选择使栅瓣位于脉冲压缩后信号零点处以抑制栅瓣, 该方法需要对信号参数进行复杂的设计优化, 并且通常只能抑制部分栅瓣, 仍然会有较强的残余。文献[7]通过

2012-08-21 收到, 2012-12-04 改回

国家部委基金资助课题

\*通信作者: 仲利华 zlhbuua@163.com

改变子脉冲的脉冲宽度,破坏子脉冲间的周期性来实现栅瓣抑制,文献[8]提出了非线性调频步进信号的设计方法,避免了栅瓣的出现,但都增加了系统的复杂度。文献[9]提出对子脉冲信号和合成后的全脉冲信号分别加权以抑制旁瓣和栅瓣的方法,但会导致系统分辨率下降。在文献[9]的基础上,文献[10]提出对子脉冲加权后对全脉冲信号进行SVA(Spatially Variant Apodization)处理的算法,在不损失分辨率的条件下降低了系统旁瓣和栅瓣,但该方法对信号参数敏感,针对不同的信号参数,抑制效果起伏较大。

本文在文献[10]的基础上通过详细分析线性调频步进信号自相关函数的组成和特点,提出对子脉冲采用不同窗函数加权后,对全脉冲压缩结果进行切趾滤波来抑制栅瓣的方法,并给出了一种基于图像域的快速计算方法。对栅瓣抑制后信号再次采用SVA算法,即可同时实现旁瓣抑制。理论分析和仿真实验表明,针对子脉冲带宽大于调频步进长度的信号,该方法在不损失分辨率的条件下可以有效抑制旁瓣和栅瓣,且对信号参数不敏感,针对不同的信号参数均可获得稳定的抑制效果。

全文结构如下,第2节对线性调频步进信号自相关函数的构成和特点进行了详细分析;第3节在回顾切趾滤波算法的基础上,提出了一种子脉冲加权后对全脉冲信号进行切趾滤波的栅瓣抑制方法,并给出了其在图像域的快速实现方法;第4节通过仿真实验和真实数据处理验证了算法的有效性;第5节为结束语。

## 2 线性调频步进信号栅瓣分析

假设一个线性调频步进信号由 $N$ 个子脉冲组成,子脉冲带宽为 $Bw$  MHz,脉冲宽度和脉冲重复周期分别为 $T_p$ 和 $T_r$ ,子脉冲之间频率步进长度为 $\Delta F$  MHz,则该线性调频步进信号表示形式如式(1)所示。

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} u_0(t - nT_r) \exp[-j2\pi(f_0 + n\Delta F)t] \quad (1)$$

其中 $u_0(t) = 1/\sqrt{T_p} \text{rect}[t/T_p] \exp(j\pi k_r t_r^2)$ 为基带子脉冲信号。该线性调频步进信号瞬时带宽为 $Bw$  MHz,而总带宽为 $(N-1)\Delta F + Bw$  MHz,其对应的距离分辨率为 $\rho = C/2[(N-1)\Delta F + Bw]$ 。

文献[10]对线性调频步进信号的性质做了详细分析,对于式(1)中的信号,其自相关函数如式(2)所示。

$$s(\tau) = \left(1 - \frac{|\tau|}{T_p}\right) \text{sinc}\left[Bw\tau\left(1 - \frac{|\tau|}{T_p}\right)\right] \frac{\sin(N\pi\tau\Delta F)}{N \sin(\pi\tau\Delta F)} \quad (2)$$

式(2)可以分解为两部分的乘积,其中 $s_1(\tau) = (1 - |\tau|/T_p) \text{sinc}[Bw\tau(1 - |\tau|/T_p)]$ 为子脉冲信号的自相关函数。 $s_2(\tau) = \frac{\sin(N\pi\tau\Delta F)}{N \sin(\pi\tau\Delta F)}$ 对应于周期性的频率步进 $\Delta F$ 对自相关函数的影响。

由式(2)可以发现,由于 $s_2(\tau)$ 为周期为 $1/\Delta F$ 的周期信号,且在 $\tau = (g/\Delta F)(g = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm[T_p\Delta F])$ 的位置处, $s_2(\tau)$ 将会出现局部的峰值,这将会导致线性调频步进信号自相关函数 $s(\tau)$ 在对应位置出现较强的栅瓣。在SAR, ISAR系统中,为了防止弱小目标被强目标的栅瓣淹没,对图像判读和目标识别造成影响,必须通过系统设计或信号处理手段对栅瓣进行抑制,以改善图像质量。

## 3 基于切趾滤波的栅瓣抑制算法

### 3.1 切趾滤波栅瓣抑制原理

切趾滤波来源于光学信号处理,并被广泛应用于SAR, ISAR旁瓣抑制中<sup>[11]</sup>。其基本原理是对信号采用不同的频域窗函数进行加权后,逐点判断不同加权结果的符号是否改变来区分主瓣和旁瓣。然而直接将DA, SVA等切趾滤波方法应用于线性调频步进信号并不能实现栅瓣抑制。受到子脉冲频率周期性步进的影响,栅瓣位置处符号在采用不同窗函数加权后并没有改变,导致DA或SVA的判断标准失效,栅瓣被误认为主瓣而被保留。

通过第2节中对线性调频步进信号自相关函数和切趾滤波算法的分析研究<sup>[11]</sup>,本节给出一种基于子脉冲加权的切趾滤波方法,以实现线性调频步进信号栅瓣的抑制。其基本原理如图1所示。

当调频步进频率 $\Delta F$ 小于子脉冲信号带宽 $Bw$ 的时,第1栅瓣出现时刻 $1/\Delta F$ 大于子脉冲第1零点 $1/Bw$ ,因此,所有栅瓣均位于子脉冲自相关函数主

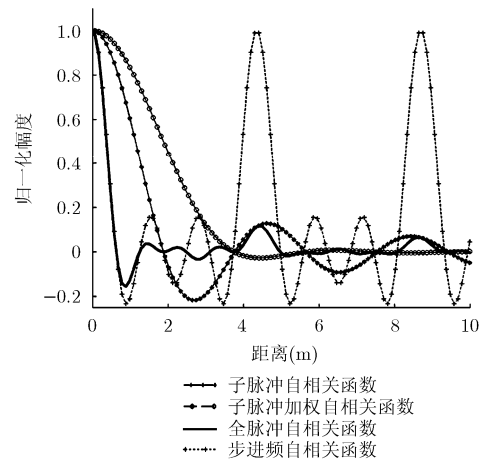


图1 子脉冲加权切趾滤波示意图

瓣之外。由文献[11]可知，对线性调频信号进行适当的频域加权可以改变其自相关函数主瓣之外信号的符号。结合式(2)，通过对子脉冲进行加权，改变  $s_1(\tau)$  主瓣外符号，而  $s_2(\tau)$  保持不变，即可改变  $s(\tau)$  中子脉冲主瓣之外信号的符号，由于所有栅瓣均位于子脉冲主瓣之外，所以可以通过切趾滤波实现对所有栅瓣的抑制。此时， $s(\tau)$  中仍然存在位于子脉冲主瓣内的旁瓣，再次对  $s(\tau)$  采用 SVA 进行处理后即实现对剩余旁瓣的抑制。总结上述分析可以确定基于切趾滤波的栅瓣、旁瓣抑制方法处理流程如图 2 所示。

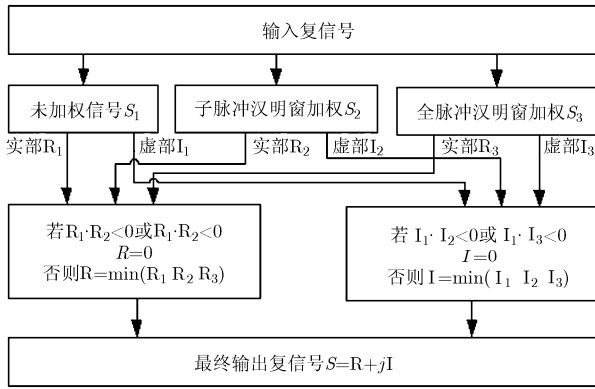


图 2 基于切趾滤波的栅瓣旁瓣抑制算法框图

### 3.2 基于图像域的快速实现算法

3.1 节中的处理流程需要获得信号在不加权、子脉冲加权、全脉冲加权 3 种形式下的脉冲压缩结果，增加了处理的计算量，本节将基于传统的 SVA 算法推导本文方法在图像域的快速实现算法。

采用余弦底座窗函数作为子脉冲频域加权函数，其形式如式(3)所示。

$$W_0(f) = a + \sum_{i=1}^N 2\omega_i \cos(2\pi if/Fs) \quad (3)$$

其中  $a$  和  $\omega_i$  为窗函数系数， $Fs$  为采样率， $f$  为窗函数频率且支撑域为  $|f| \leq Bw/2$ 。

线性调频步进信号由  $N$  个子脉冲构成，将  $W_0(f)$  在频域进行平移构成对第  $k$  个脉冲的加权函数为

$$W_k(f) = W_0(f - k\Delta F) \quad (4)$$

然而受到相邻频谱重叠的影响，总的加权函数并不等于各个子脉冲加权函数的叠加，而是随子脉冲带宽  $Bw$  和频率步进长度  $\Delta F$  的影响而变化。通常， $Bw$  的选择不会远大于  $\Delta F$ ，因此只对  $1 < Bw/\Delta F < 3$  的情况进行讨论。当  $1 < Bw/\Delta F \leq 2$  时，修正的子脉冲窗函数形式如式(5)所示。

$$W_0(f) = \begin{cases} a + \sum_{i=1}^N 2\omega_i \cos(2\pi if/Fs), & |f| \leq \Delta F/2 \\ \frac{1}{2} \left[ a + \sum_{i=1}^N 2\omega_i \cos(2\pi if/Fs) \right], & \Delta F/2 < |f| \leq Bw/2 \\ 0, & |f| > Bw/2 \end{cases} \quad (5)$$

修正后的窗函数脉冲响应为

$$I_0(m) = \frac{a}{2} \text{sinc}(\omega_{s1}m) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \omega_i \{ \text{sinc}[\omega_{s1}(m-i)] + \text{sinc}[\omega_{s1}(m+i)] \} + \frac{a}{2} \text{sinc}(\omega_{s2}m) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \omega_i \{ \text{sinc}[\omega_{s2}(m-i)] + \text{sinc}[\omega_{s2}(m+i)] \} \quad (6)$$

其中， $\omega_{s1} = Fs/\Delta F$ ， $\omega_{s2} = Fs/(Bw)$ 。则  $W(f)$  的时域脉冲响应为

$$I(m) = I_0(m) \frac{\sin(N\pi m\Delta F/Fs)}{N \sin(\pi m\Delta F/Fs)} \quad (7)$$

将上述窗函数作用于未加窗的脉冲压缩结果  $g(m)$  得

$$g'(m) = \alpha g(m) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \omega_i \left[ g\left(m + \left\lfloor \frac{Fs}{Bw} \right\rfloor i\right) + g\left(m + \left\lfloor \frac{Fs}{\Delta F} \right\rfloor i\right) + g\left(m - \left\lfloor \frac{Fs}{Bw} \right\rfloor i\right) + g\left(m - \left\lfloor \frac{Fs}{\Delta F} \right\rfloor i\right) \right] \quad (8)$$

当  $2 < Bw/\Delta F < 3$  时，可以采用类似的分析方法获得最终结果，由于篇幅所限，这里不再给出具体推导过程。

通过选取合适的  $\omega_i$  可以使得  $g'(m)$  最小化。然而在不加任何约束的情况下，最小化的  $g'(m)$  为零，因此，参考 SVA，对  $a$  和  $\omega_i$  做出如下限制：

$$\left. \begin{aligned} a &= 1 - \sum_{i=1}^N \omega_i \left[ \text{sinc}(\omega_{s1}i) + \text{sinc}(\omega_{s2}i) \right] \\ \omega_i &\geq 0 \\ \omega_i &\leq 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

令  $N = 1$ ，式(8)可简化为

$$g'(m) = \alpha g(m) + \frac{1}{2} \omega_1 \left[ g\left(m + \left\lfloor \frac{Fs}{Bw} \right\rfloor\right) + g\left(m + \left\lfloor \frac{Fs}{\Delta F} \right\rfloor\right) + g\left(m - \left\lfloor \frac{Fs}{Bw} \right\rfloor\right) + g\left(m - \left\lfloor \frac{Fs}{\Delta F} \right\rfloor\right) \right] \quad (10)$$

上述问题是一个约束优化问题，不等式(9)表示

的直线构成一个多边形,极值在多边形的顶点处取得。计算各个顶点处 $g'(m)$ 的取值,如果某两个顶点处 $g'(m)$ 值符号相反,则给 $g'(m)$ 赋零;否则取绝对值最小的那个作为 $g'(m)$ 的取值。

下面就本文方法计算量展开分析。设图像距离向大小为 $M$ ,则采用3.1节中频域加权处理方法的运算量和3.2节中快速方法运算量如表1所示。

表1 计算量对比

处理算法	频域加权处理算法	快速算法
乘法次数	$(1/2)M \log_2(M) + 4M$	$4M$
加法次数	$2M$	$8M$
判决次数	$M$	$M$

通常SAR图像距离向大小约为8192~32768,因此根据表1计算可得,本文算法计算量仅为直接频域加权处理算法的1/4~1/5,因此可以有效提高计算速度。

## 4 仿真试验

### 4.1 单点目标仿真实验及性能分析

本节将通过数值仿真实验来对算法性能进行验证。仿真参数的选取与文献[10]保持一致,即线性调频步进信号由11个子脉冲组成,子脉冲信号带宽为80 MHz,脉宽为12  $\mu$ s,子脉冲间频率步进为34.5 MHz,发射时间间隔为15  $\mu$ s。则合成频谱带宽为425 MHz,对应的距离分辨率为0.34 m。

图3(a)给出了点目标匹配滤波结果,由于频谱重叠的存在,1维距离像中存在较强的栅瓣,其中第1栅瓣强度达到-18.6 dB,这将会对弱目标的检测与识别造成影响。

采用全脉冲加权和全脉冲SVA算法处理后旁瓣得到有效抑制,而栅瓣仍保持不变,其结果如图3(a)

所示。图3(b)给出了采用子脉冲加权,子脉冲加权结合全脉冲SVA的处理结果,可以发现,栅瓣得到有效抑制,但第1栅瓣仍然较强,约为-30 dB。图3(c)给出了本文方法处理结果,栅瓣和旁瓣均得到有效抑制。在理想情况下,本文对旁瓣和栅瓣的抑制相对于文献[10]提高了接近30 dB。

图3中各种算法栅瓣及旁瓣抑制效果如表2所示。通过图3的对比分析发现,对子脉冲进行加权的处理方法可以一定程度上实现栅瓣抑制,但最靠近主瓣的若干个栅瓣,尤其是第1栅瓣无法有效抑制。由图1可知,第1栅瓣位于子脉冲主瓣之外,当栅瓣出现位置正好位于子脉冲旁瓣的峰值附近时,将会导致栅瓣幅度较强,而当栅瓣出现位置比较接近子脉冲自相关函数过零点时,栅瓣较弱。栅瓣的强弱和子脉冲旁瓣、过零点之间的关系主要由子脉冲带宽和子脉冲间步进频长决定。因此,在传统的栅瓣抑制方法中,子脉冲带宽 $Bw$ 和步进频长 $\Delta F$ 之间的相对大小将会影响栅瓣抑制效果。在上述其它仿真条件不变的情况下,改变子脉冲信号带宽,以验证 $Bw/\Delta F$ 对不同方法的影响。

根据表2的对比,这里只对匹配滤波结果,子脉冲加权结合全脉冲SVA处理结果和本文方法处理结果进行对比分析。其中,匹配滤波结果作为参考用以衡量抑制效果。图4给出了子脉冲带宽与步进频率不同比值情况下栅瓣抑制性能,可以看出,传统的子脉冲加权类方法对信号参数较为敏感,当 $Bw/\Delta F$ 改变时,性能变化较大,而根据理论推导,由于所有栅瓣均位于主瓣外,所以采用本文方法在 $Bw/\Delta F > 1$ 的条件下均可以得到较为稳定的结果。

### 4.2 多目标仿真实验

对栅瓣、旁瓣进行抑制的目的是为了消除强目标副瓣对弱小目标的遮掩,提高识别能力。为此,

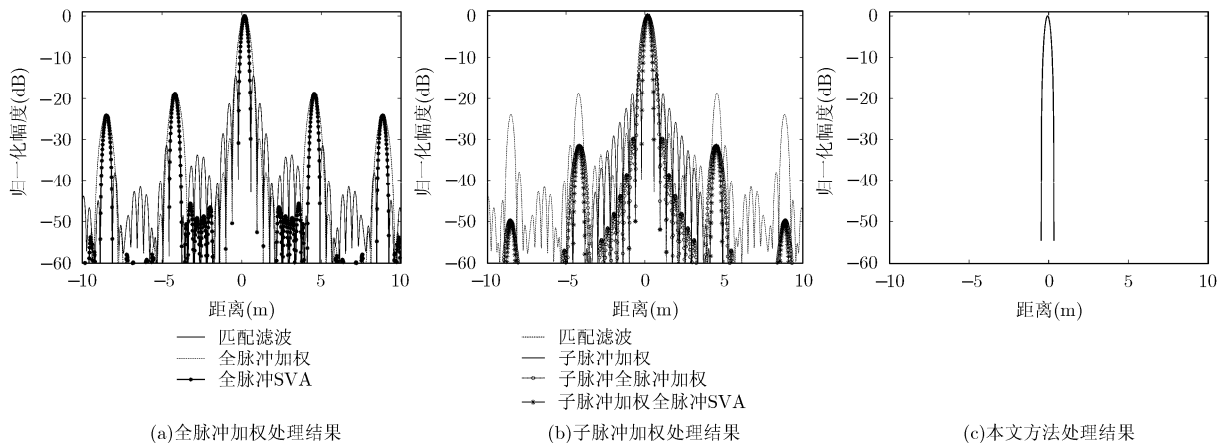


图3 栅瓣抑制效果仿真

表 2 不同算法性能对比

性能	匹配滤波	全脉冲加权	全脉冲 SVA	子脉冲加权	子脉冲全脉冲 两次加权	子脉冲加权, 全脉冲 SVA	本文方法
分辨率(m)	0.34	0.52	0.34	0.34	0.51	0.34	0.34
峰值栅瓣比(dB)	-18.60	-18.87	-18.87	-13.53	-30.51	-31.58	有效抑制
峰值旁瓣比(dB)	-13.26	-29.51	有效抑制	-31.55	-30.76	有效抑制	有效抑制
峰值副瓣比(dB)	-13.26	-18.87	-18.87	-13.53	-30.51	-31.58	有效抑制

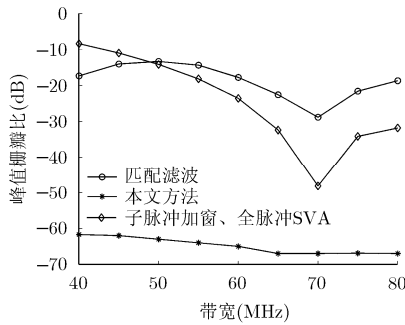


图 4 频率步进为 34.5 MHz 时不同子脉冲带宽下各种算法栅瓣抑制性能对比

本节将通过设置一强一弱两个目标对本文算法性能进行仿真验证。

仍然采用上一节的仿真参数，实验中假设存在两个点目标，其中点目标 1 位于坐标原点，幅度为 100，点目标 2 与点目标 1 的距离为 5 m，幅度为 1，即点目标 2 位于点目标 1 第 1 栅瓣附近，且幅度相对于点目标 1 弱 40 dB。

图 5 给出了匹配滤波结果、文献[10]抑制结果和本文方法抑制结果的对比。从图中看出，点目标 1 第 1 栅瓣强度为 -18.6 dB，经传统方法抑制后降至 -31 dB，但仍然强于目标 2。这时目标 2 被目标 1 第 1 栅瓣遮掩，无法有效识别。而通过本文方法，目标 1 的栅瓣被降至 -60 dB 以下，目标 2 清晰可见。

### 4.3 分布场景目标仿真实验

由于条件限制，尚未获得真实的线性调频步进体制下 SAR/ISAR 图像，本文通过对一幅 SAR 数

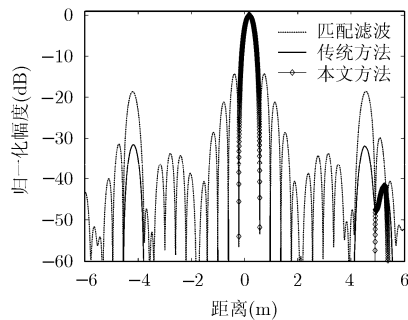


图 5 多点目标仿真

据进行处理，获得等效线性调频步进信号 SAR 图像。将一幅 SAR 数据在距离频域分割为几个子带，每个子带频谱等效为子脉冲频谱，相邻子带间存在一定的冗余，将各个子带频谱拼接等效形成大带宽线性调频步进信号。

原始 SAR 信号参数和等效线性调频步进信号参数如表 3 所示。通过仿真计算，在该组参数下，等效调频步进信号在脉冲压缩后第 1 栅瓣强度为 -14 dB，将会对图像质量产生较大的影响。

表 3 分布场景目标仿真实验参数

原始 SAR 信号参数				等效线性调频 步进信号参数	
载机高度	5000 m	信号带宽	240 MHz	子带数量	5
载机速度	130 m/s	信号脉宽	20 $\mu$ s	子带信号带宽	60 MHz
天线长度	0.5 m	距离向采样率	300 MHz	子带信号间隔	45 MHz

图 6(a)和图 6(b)分别为原始 SAR 图像和等效获得的线性调频步进信号 SAR 图像。图 6(c)和图 6(d)分别为子脉冲加窗全脉冲 SVA 方法和本文方法处理结果。

从图 6(b)中可以看出，相对于原始 SAR 图像，等效线性调频步进信号图像清晰度明显下降，由于栅瓣的影响，强散射点附近出现了周期性的虚假峰值。

图 6(c)为采用文献[10]中的子脉冲加权结合全脉冲 SVA 方法处理结果，可以看出，部分栅瓣被消除，但仍有剩余。图 6(d)为采用本文方法处理结果，图像质量大大提高，栅瓣抑制效果明显。

通常采用图像对比度<sup>[12]</sup>对 SAR 图像质量进行评价，对比度定义如式(11)所示。

$$C = \frac{\sqrt{E\{I^2(m, n) - E[I^2(m, n)]\}^2}}{E[I^2(m, n)]} \quad (11)$$

其中  $C$  为图像对比度， $I(m, n)$  表示第  $(m, n)$  个像素

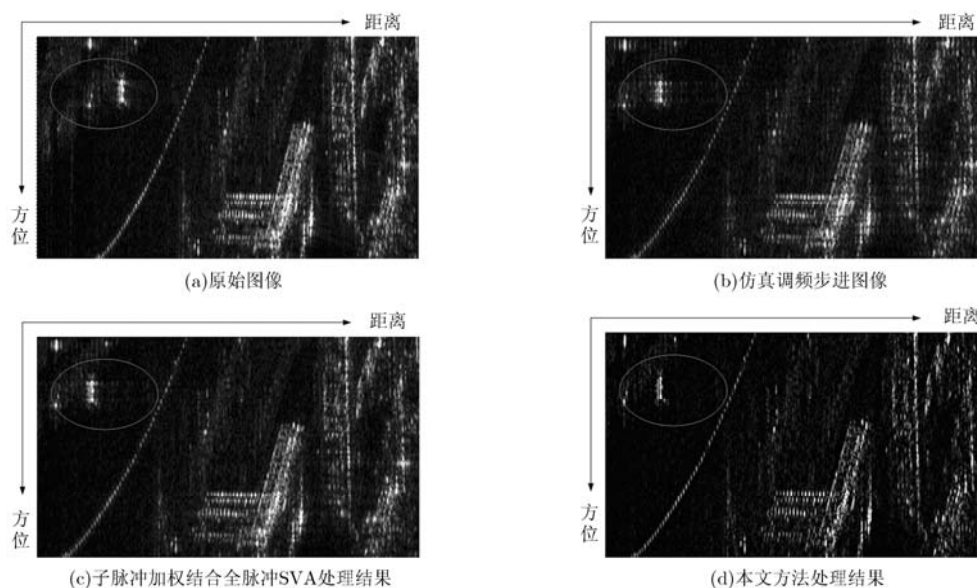


图 6 分布场景目标仿真实验结果

的强度,  $E(\bullet)$  表示图像强度的均值。分别计算各种方法处理结果的对比度并进行比较, 其结果如表 4 所示。

表 4 不同处理方法下图像对比度

处理方法	图像最大对比度
原始图像	13.92
等效调频步进信号图像	12.77
子脉冲加权结合全脉冲 SVA	15.91
本文方法	18.09

经过视觉观测和量化对比可知, 本文方法较好地抑制了栅瓣的影响, 图像对比度相对于子脉冲加权结合全脉冲 SVA 算法提高了约 13%, 图像整体质量得到改进。

## 5 结束语

针对线性调频步进信号由于子脉冲间频谱重叠导致的栅瓣, 本文提出了一种基于子脉冲加权后采用切趾滤波进行栅瓣抑制的方法, 并给出了其在图像域的一种快速实现方法。仿真实验表明, 本文方法对栅瓣的抑制效果优于传统方法。此外, 本文 3.1 节提出的基本方法同样适用于非线性调频步进信号, 而 3.2 节的快速算法由于隐含了子脉冲之间线性步进的条件, 对于非线性步进的情况将不再适用。

然而, 本文方法只适用于频谱间存在重叠的线性调频步进信号, 当步进频率大于子脉冲带宽, 频谱间存在间隙时, 会造成部分栅瓣落于子脉冲主瓣内, 根据本文方法该部分栅瓣无法得到抑制。未来

工作将重点扩展算法的适用性, 使其也适用于频谱间不存在重叠的线性调频步进信号。

## 参考文献

- [1] Levanon N. Stepped-frequency pulse-train radar signal[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2002, 149(6): 297-309.
- [2] Liu Y, Xing M, Zhang L, et al. Novel range profile synthesis algorithm for linearly stepped-frequency modulated inversed synthetic aperture radar imaging of remote maneuvering target[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(4): 496-506.
- [3] Zhu Feng, Zhang Qun, Lei Qiang, et al. Reconstruction of moving target's HRRP using sparse frequency-stepped Chirp signal[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(10): 2327-2334.
- [4] 何劲, 罗迎, 张群, 等. 随机线性调频步进雷达波形设计及成像算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(9): 2068-2075.  
He Jin, Luo Ying, Zhang Qun, et al. Waveform design and imaging algorithm research of random frequency stepped Chirp signal ISAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2068-2075.
- [5] Wang Hong-xian, Liang Yi, Xing Meng-dao, et al. ISAR imaging via sparse frequency-stepped chirp signal[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2012, 55(4): 877-888.
- [6] Nadav L and Mozeson E. Nullifying ACF grating lobes in stepped-frequency train of LFM pulses[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(2): 694-703.
- [7] Gladkova I and Chebanov D. Grating lobes suppression in stepped-frequency pulse train[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(4): 1265-1275.

- [8] Gladkova I and Chebanov D. Suppression of grating lobes in stepped-frequency train[C]. Proceedings of IEEE International Radar Conference, Arlington, Va, USA, May 2005: 371-376.
- [9] Li Hai-bin, Zhang Yun-hua, and Wu Jie. Sidelobes and grating lobes reduction of stepped-frequency Chirp signal[C]. IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings, Beijing, China, August 2005: 1210-1213.
- [10] 李海滨. 调频步进信号及逆合成孔径雷达成像方法研究[D]. [硕士论文], 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2005.
- [11] 倪崇, 王岩飞, 徐向辉, 等. 一种基于改进SVA的SAR旁瓣抑制算法[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(12): 1485-1494.  
Ni C, Wang Y F, Xu X H, *et al.* A SAR sidelobe suppression algorithm based on modified spatially variant apodization[J]. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, 2010, 53(10): 2542-2551.
- [12] Berizzi F and Corsini G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(3): 1185-1191.
- 仲利华: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为ISAR成像.
- 韩冰: 女, 1980年生, 助理研究员, 研究方向为星载SAR成像.
- 胡东辉: 男, 1970年生, 副研究员, 主要研究方向为SAR/ISAR成像.
- 丁赤飏: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为SAR成像及SAR地面处理系统.