

运用 Super-SVA 方法处理频谱不连续调频步进信号

翟文帅 张云华

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘要: 调频步进信号是高分辨率雷达中经常采用的一种信号形式。它是线性调频信号和频率步进信号的结合, 兼有两者的优点。在实际雷达系统设计中, 如果频率步进值能够大于子脉冲带宽, 对于以更少的子脉冲数来获得更大的带宽, 从而降低目标运动对合成信号质量的影响是非常有帮助的。但此时会出现很高的栅瓣, 并导致假目标的出现或者掩盖小的目标。该文利用 Super-SVA 超分辨方法拓展各子脉冲的频谱从而使合成频谱连续起来, 解决了此情况下的栅瓣问题。再利用 Super-SVA 方法对合成的 1 维距离像进行处理, 则能进一步降低旁瓣。文中给出了计算仿真结果验证了算法的有效性。

关键词: 调频步进信号; Super-SVA; 栅瓣; 旁瓣; 超分辨

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2848-05

Apply Super-SVA to Processing Stepped Frequency Chirp Signal with Bandwidth Gaps

Zhai Wen-shuai Zhang Yun-hua

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Stepped Frequency Chirp Signal (SFCS) is one of usually used signals in high-resolution radar. It is a combination of chirp signal and stepped frequency continuous waveform, and has advantages of the both signals. In the design of real radar system, if the frequency step (Δf) can be larger than the bandwidth of sub-chirp (B_m), then it will be very helpful for using less number of sub-chirps to obtain larger bandwidth and reducing the influence of target motion on the quality of synthesized signal. However there will have high grating lobes in range profile when $\Delta f > B_m$ if without further processing. Here an algorithm is proposed by using Super-SVA to extrapolate the bandwidth of each sub-chirp so as to fulfill the bandwidth gaps between sub-chirps and efficiently eliminate grating lobes. Super-SVA is also applied to the synthesized range profile, then the sidelobes can be further depressed. The simulation results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Stepped Frequency Chirp Signal(SFCS); Super-SVA(Spatially Variant Apodization); Grating lobe; Side lobe; Super resolution

1 引言

在雷达成像中, 高距离分辨率的获得需要采用大带宽信号, 线性调频(chirp)信号和频率步进连续波(Stepped Frequency Continuous Waveforms, SFCW)信号是高分辨率雷达中较常采用的两种宽带信号形式。调频步进信号(Stepped Frequency Chirp Signal, SFCS)把这两者结合了起来, 用线性调频信号替代频率步进信号中的简单矩形子脉冲, 既保留了频率步进信号低采样率以及窄带处理的优点, 又具备线性调频信号大时宽和大带宽的特性, 近年来得到了较多的研究和应用^[1-6]。Doerry 在 SANDIA 实验室的研究报告中分析和讨论了将调频步进信号用于相控阵雷达实现宽带相控阵雷达的技术优势^[6]。然而调频步进信号的处理也有其复杂性和

特殊性。尤其是对于高速运动目标, 其相对于雷达视线角度及位置在不同脉冲重复周期的显著变化, 限制了可进行相干处理的子脉冲的个数。增加子脉冲数目, 会使得运动补偿变得复杂。但减小子脉冲数目必然减小合成带宽, 从而牺牲分辨率。本文提出用 Super-SVA(Super Spatially Variant Apodization)^[7]方法来处理调频步进信号, 可以解决这个矛盾, 在保持总的合成带宽不变的前提下减小子脉冲数目。

Super-SVA 是 Stankwitz 于 1995 年提出的一种高效超分辨方法, 它不需要成像场景的先验知识和参数模型, 通过 SVA 处理和频域的幅度反加权这两个步骤的循环, 能够将原信号频谱外推 2 倍以上, 以实现超分辨。Stankwitz 还提出将其应用于估计 SAR 数据中频谱缺失或者因受干扰而丢弃的部分^[8], Xu Xiaojian 将其应用于机载 SAR 目标识别,

3 维干涉 ISAR 精度提高以及超宽带 SAR 叶簇穿透成像^[9], Zhuang Long 将其应用于稀疏孔径雷达以获得全孔径数据^[10], 本文将其应用于调频步进信号处理中, 均得到了较好的效果。

在调频步进信号的设计中, 为了避免栅瓣的出现, 频率步进值不能大于子脉冲带宽。若在保持总的合成带宽不变的前提下减小子脉冲数目, 频率步进值必然增大, 使得各子脉冲频谱不再重叠, 合成频谱出现间隙, 此时成像后的栅瓣幅度和主瓣非常接近。本文用 Super-SVA 方法外推各子脉冲的频谱, 估计出信号没有覆盖到的频率的信息, 使得合成信号频谱连续起来, 从而解决了栅瓣问题, 这就打破了频率步进值必须小于子脉冲带宽的限制, 可以在保持总的合成带宽不变的前提下减小脉冲串中子脉冲的数目, 从而在不改变分辨率的前提下降低了运动补偿的复杂性。对于已经抑制了栅瓣的合成 1 维距离像, 用 Super-SVA 方法进行循环操作, 但保持分辨率, 不外推频谱, 则能进一步降低旁瓣, 得到更好的效果。

2 调频步进信号的数学形式及频域子孔径处理方法

调频步进信号是一串载频跳变的线性调频脉冲。设子脉冲的数目为 N , 调频带宽为 B_m , 子脉冲宽度和脉冲重复周期分别为 T_p 和 T_r , 调频斜率为 $K = B_m/T_p$, 频率进步量为 Δf , 第一个子脉冲的中心频率为 f_0 , 则第 i 个子脉冲的中心频率为 $f_i = f_0 + (i-1) \cdot \Delta f$, 其中 $i = 1 \sim N$, 雷达发射的第 i 个子脉冲信号为

$$u_i(t) = \exp[j2\pi(f_i - KT_p/2)t + jK\pi t^2], \quad 0 \leq (t - iT_r) \leq T_p \quad (1)$$

对于距离为 $r_1 \sim r_2$ 的观测区域, 其回波信号可以表示为

$$s_i(t) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} g_i(\tau) \exp[j2\pi(f_i - KT_p/2)(t - \tau) + jK\pi(t - \tau)^2] d\tau, \quad 0 \leq (t - iT_r - \tau) \leq T_p, i = 1 \sim N \quad (2)$$

其中 $\tau = 2r/c$ 为回波延迟时间, 相应地, $\tau_1 = 2r_1/c$, $\tau_2 = 2r_2/c$; $g_i(\tau)$ 为观测区域的对第 i 个脉冲的目标反射系数。

式(2)可以表示为如下的卷积形式:

$$s_i(t) = g_i(t) * u_i(t) \quad (3)$$

式(3)经接收机下变频处理, 表达式为

$$s_i(t) \cdot e^{-j2\pi f_i t} = [g_i(t) * u_i(t)] \cdot e^{-j2\pi f_i t} \quad (4)$$

对式(4)进行傅里叶变换得

$$S_i(\omega - \omega_i) = G_i(\omega - \omega_i) \cdot U_i(\omega - \omega_i) \quad (5)$$

式中 $\omega_i = 2\pi f_i$; $(\omega - \omega_i) \in [-\pi KT_p, \pi KT_p]$ 为基带信

号频率范围, $S_i(\omega - \omega_i)$ 为第 i 个子脉冲的回波的基带信号频谱, $U_i(\omega - \omega_i)$ 为第 i 个发射脉冲的基带频谱, $G_i(\omega - \omega_i)$ 为距离目标函数的第 i 个基带观察频谱。于是得到

$$G_i(\omega - \omega_i) = \frac{S_i(\omega - \omega_i)}{U_i(\omega - \omega_i)} = S_i(\omega - \omega_i) \cdot U_i^*(\omega - \omega_i) \quad (6)$$

其中 $U_i^*(\omega)$ 为 $U_i(\omega)$ 的复共轭, 这一步代表频域匹配滤波。然后进行第 2 次变频处理:

$$G_i(\omega - \omega_i + (i-1)\Delta\omega) = S_i(\omega - \omega_i + (i-1)\Delta\omega) \cdot U_i^*(\omega - \omega_i + (i-1)\Delta\omega) \quad (7)$$

式中 $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ 。

最后将 N 个脉冲得到的 G_i 进行相干合成, 得

$$G(\omega) = \sum_{i=1}^N G_i(\omega - \omega_i + (i-1)\Delta\omega) = \sum_{i=1}^N S_i(\omega - \omega_i + (i-1)\Delta\omega) \cdot U_i^*(\omega - \omega_i + (i-1)\Delta\omega) \quad (8)$$

最终获得 1 维距离像

$$g(t) = \text{FFT}^{-1}[G(\omega)] \quad (9)$$

以上就是调频步进信号的频域子孔径处理方法^[5], 该方法简单且易于程序实现。

3 SVA 及 Super-SVA 原理

3.1 SVA

SVA^[11] 是一种非线性加权方法, 用于 SAR, ISAR 或者光学图像处理中, 它使得图像的每个像素点从一系列的窗函数中得到一个特定的频域加权窗函数, 从而在不展宽主瓣的前提下降低甚至消除图像的旁瓣。它基于余弦底座频域加权函数:

$$W(n) = 1 + 2\alpha \cos(2\pi n/N), \quad 0 \leq \alpha \leq 0.5 \quad (10)$$

对式(10)进行长度为 N 的离散傅里叶变换可以得到 Nyquist 脉冲响应(IPR)抽样方程为

$$w(m) = \alpha\delta_{m,-1} + \delta_{m,0} + \alpha\delta_{m,1} \quad (11)$$

其中

$$\delta_{m,n} = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (12)$$

从式(11)可以看到, IPR 只包含 3 个非零点, 也就是说, 加权后的图像由相邻 3 点卷积生成:

$$g'(m) = \alpha g(m-1) + g(m) + \alpha g(m+1) \quad (13)$$

SVA 可以把 I 和 Q 分开处理, 式(13)中 $g(m)$ 代表原图像第 m 个像素点的实部 I 或者虚部 Q, $g'(m)$ 表示此点加权后的值。SVA 的目标就是在 $0 \leq \alpha \leq 0.5$ 的范围内, 为每一个像素点 $g(m)$ 寻找合适的 α 值得 $|g'(m)|^2$ 最小, 这相当于为每一个像素点选择一

个最合适的窗函数来抑制旁瓣。

若 α 没有取值范围限制, 可以求出使 $|g'(m)|^2$ 最小的 α 值为

$$\alpha_u(m) = \frac{-g(m)}{g(m-1) + g(m+1)} \quad (14)$$

此时 $g'(m) = 0$ 。若限制 α 在 $[0, 0.5]$ 区间, 则有

$$g'(m) = \begin{cases} g(m), & \alpha_u(m) < 0 \\ 0, & 0 \leq \alpha_u(m) \leq 0.5 \\ g(m) + 0.5 \times [g(m-1) + g(m+1)], & \alpha_u(m) > 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

3.2 Super-SVA

Super-SVA 是在 SVA 的基础上发展起来的超分辨率方法^[7,8], 它通过 SVA 处理和频域幅度反加权的反复迭代实现频谱外推。它的实现过程如图 1 所示: 首先对图像进行 SVA 处理, 消除旁瓣, 得到了近乎只保留了散射点主瓣的图像。下一步是做逆 FFT, 得到傅里叶频谱, 因为 SVA 是非线性操作, 此时的图像空间频谱宽度已经比原图像的空间频谱展宽了。接下来进行 SVA 反卷积操作, 这通过在频谱上乘以一个幅度反加权函数来实现, 此反加权函数为 sinc 函数主瓣的逆傅里叶变换。加权后的数据需要适当截断以避免出现奇点, 一般使外推的频谱不超过原信号的 60%。并且可以用原信号替换已拓宽的频谱的中间部分, 以提高保真度。最后 FFT 回到图像域, 就得到了分辨率更高的图像。此过程可以重复, 以进一步提高分辨率。

4 利用 Super-SVA 处理 SFCS

在调频步进信号中, 当调频带宽 B_m 小于频率步进量 Δf , 如图 2 所示, 每个子脉冲之间频谱出现间隙, 在进行 2 次变频之后, 合成频谱依然存在这些间隙, 导致 FFT 之后栅瓣的出现。我们可以利用 Super-SVA 方法估计出这些缺少的频率信息, 合成

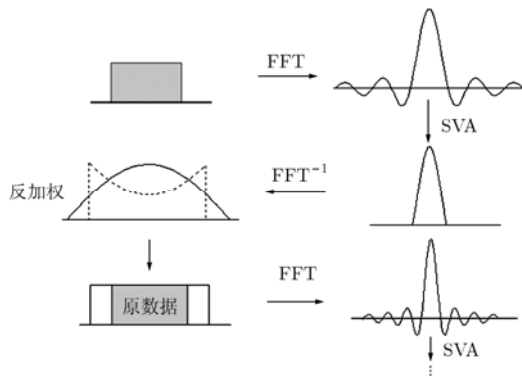


图 1 Super-SVA 流程图

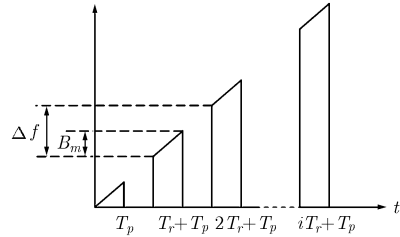


图 2 调频步进信号的频率变化规律

连续的频谱。这一点也可以用自相关函数来说明。Nadav 推导了 SFCS 自相关函数^[1]

$$\begin{aligned} |R(\tau)| &= |R_1(\tau)| \cdot |R_2(\tau)| \\ &= \left| \left(1 - \frac{\tau}{T_p} \right) \text{sinc} \left[B_m \tau \left(1 - \frac{\tau}{T_p} \right) \right] \cdot \frac{\sin(N\pi\tau\Delta f)}{N \sin(\pi\tau\Delta f)} \right|, \\ & \quad 0 \leq \tau \leq T_p \end{aligned} \quad (16)$$

从式(16)中可以看出, SFCS 的自相关函数由 $|R_1(\tau)|$ 和 $|R_2(\tau)|$ 两部分的乘积组成, 前者与单个 chirp 信号有关, 后者与 SFCW 有关。当 $\Delta f \cdot T_p > 1$, 例如 $\Delta f \cdot T_p = 2$ 时, $|R_2(\tau)|$ 将出现两个栅瓣, 意味着此时 SFCW 不能正确成像, 但 SFCS 是可以正确成像的。对于 SFCS 来说, 子孔径匹配滤波之后 T_p 变为 $1/B_m$, 也就是说当 $\Delta f \cdot (1/B_m) > 1$ 即 $B_m < \Delta f$ 的时候会出现栅瓣。利用 Super-SVA, 可以在信号处理的过程中将子脉冲带宽 B_m 外推至大于 Δf , 从而不必使发射信号受到这个限制, 能够以较少的子脉冲数量实现大的综合带宽。

具体的信号处理流程如图 3 所示, 进行完子脉冲匹配滤波后, 对每个子脉冲的低分辨率图像独立进行 Super-SVA 操作, 获得原本没有的频谱信息, 使得子脉冲带宽增加, 此步骤循环至外推后的子脉冲带宽大于 Δf 。接下来进行频谱搬移, 将 N 个子脉冲的频谱相干合成, 此时合成频谱已无间隙, 各子脉冲频谱反而有所重叠。重叠部分可以直接相干叠加, 也可以取某一边的值或者取两者平均。于是获得了连续的宽频谱。FFT 后便可得到高分辨率 1 维距离像。对所得图像继续进行 Super-SVA 操作, 可以在保持分辨率的前提下进一步消除图像副瓣(包括旁瓣和小栅瓣)。

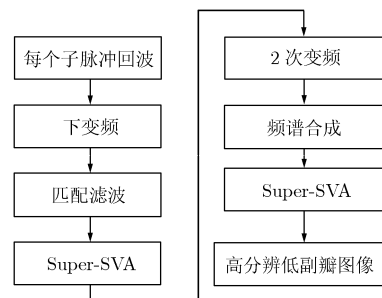


图 3 调频步进信号处理过程

5 仿真结果及分析

本节中给出了一些模拟结果来验证算法的性能。设每个子脉冲带宽 $B_m=32$ MHz, $T_p=2$ μ s, 频率步进量 $\Delta f=32$ MHz, 载频 $f_0=4$ GHz, 先对 1 个点目标成像。取子脉冲数目 $N=11$, 则合成带宽为 352 MHz。图 4 给出了用频域子孔径方法得到的合成频谱和一维距离像。若把子脉冲数目减少到 $N=6$, 为了保持合成带宽不变, 频率步进量 Δf 需要增加至 64 MHz。此时用频域子孔径方法得到的合成频谱和 1 维距离像如图 5 所示, 从图中可以看到, 相邻的子脉冲频谱之间有明显的缺失, 1 维距离像中栅瓣的幅度与主瓣相差无几, 即用文献[5]的方法不能得到正确的 1 维距离像。

本文按照图 3 的算法对每个子脉冲独立进行循环 Super-SVA 操作, 每次循环将频谱外推扩展至原来的 145%, 两次循环后子脉冲频谱宽度就可以大于 Δf , 图 5 中的频谱缺失部分已被填补, 满足成像要求。频谱搬移后, 相邻子脉冲频谱之间略有重叠, 对于重叠部分可以选择直接相干叠加, 也可以取某一边的值或者取两者平均, 不同的处理方法对最后图像有不同的影响, 一般来说, 直接相干叠加所得到的图像旁瓣更低。图 6(a)给出了按照前述信号处理流程而得到的合成频谱, 可以看到, 此时合成频谱是连续无间断的。对其做 FFT, 得到图 6(b)所示的 1 维距离像, 栅瓣已经被明显抑制, 点目标主瓣突出。

将图 4(b)图 5(b)与图 6(b)的指标对比如表 1 所示:

表 1 图 4、图 5、图 6 的指标对比

	分辨率	最大旁瓣	最大栅瓣
图 4(b)	0.37 m	-13.2 dB	-24.6 dB
图 5(b)	0.37 m	-12.6 dB	-3.8 dB
图 6(b)	0.34 m	-12.9 dB	-19.2 dB

因为 superSVA 的频谱外推, 图 6 的合成频谱比图 4 宽, 所以图(6)的分辨率略高, 但它的旁瓣和栅瓣也高于图 4。若要进一步降低旁瓣和栅瓣, 可以对其继续做 Super-SVA, 此时不再继续外推估计频谱, 保持总带宽不变进行 Super-SVA 的循环。图 7 是在图 6(b)的基础上继续 2 次 Super-SVA 循环的结果, 可以看到, 图像分辨率保持不变而副瓣大大降低了。最大栅瓣降低为-28 dB, 而旁瓣已经在-40 dB 以下。也就是说, 可以在不降低成像指标的前提下减少调频步进信号子脉冲数目, 降低其运动补偿的复杂性。

改变点目标的个数和位置多次成像实验, 均证明应用本文的算法可以很好地抑制当频率步进量 Δf 大于调频带宽 B_m 时的栅瓣和旁瓣, 达到减小调频步进信号子脉冲数目而不牺牲分辨率的目的。限于篇幅, 这里仅列出其中一例实验成像结果, 如图 8-图 10 所示。

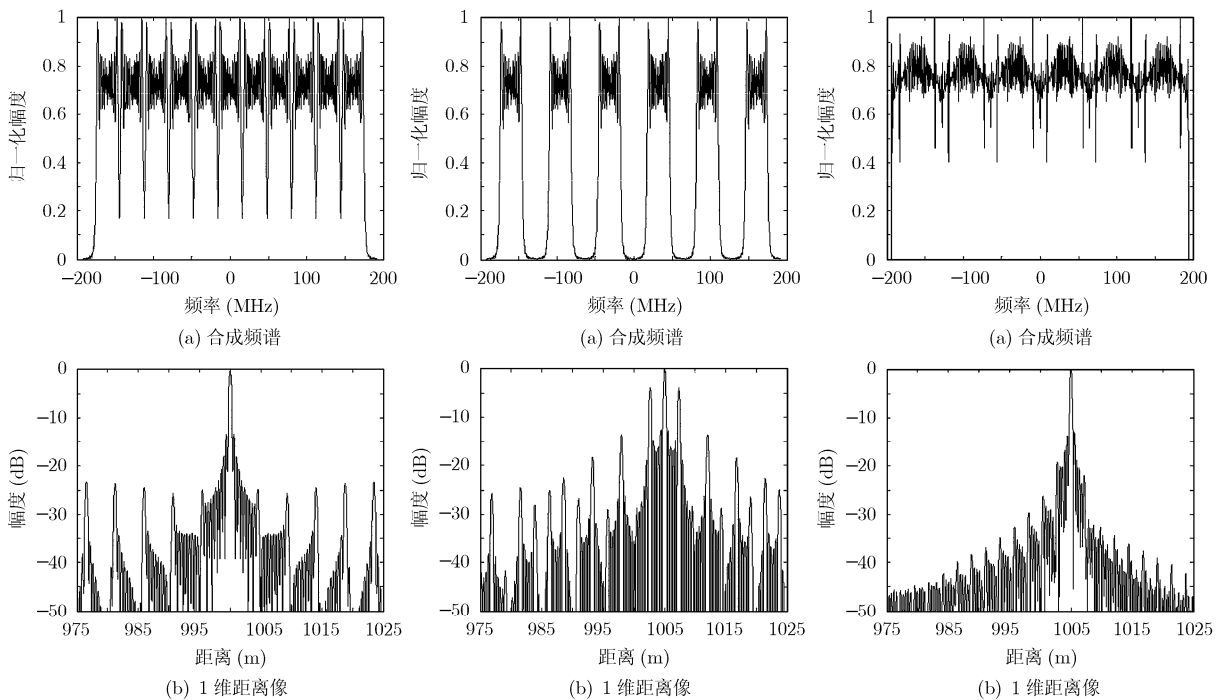


图 4 $N=11, \Delta f=32$ MHz 时, 频域子孔径法成像(1 个点目标)

图 5 $N=6, \Delta f=64$ MHz 时, 频域子孔径法成像(1 个点目标)

图 6 $N=6, \Delta f=64$ MHz 时, 本文算法成像(1 个点目标)

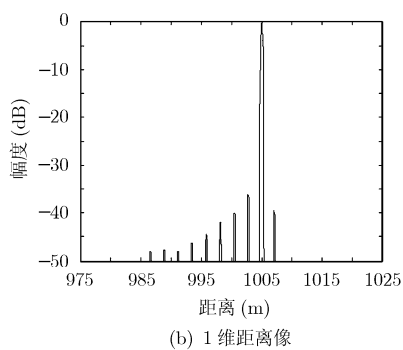


图7 对图6(b)继续进行 Super-SVA 处理后的结果

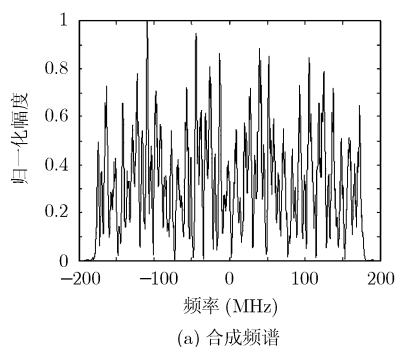
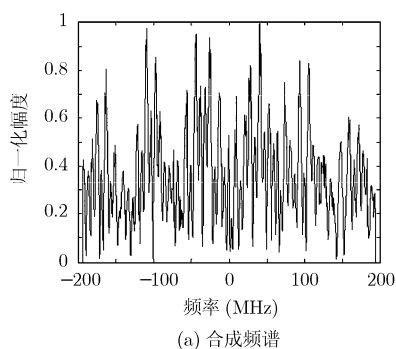
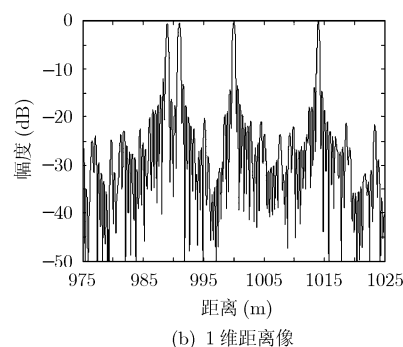
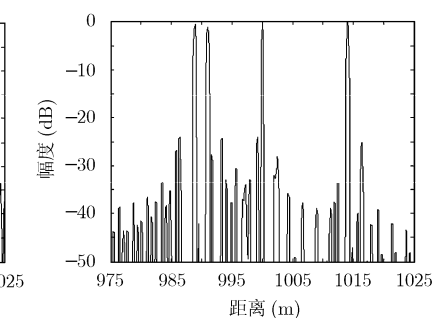
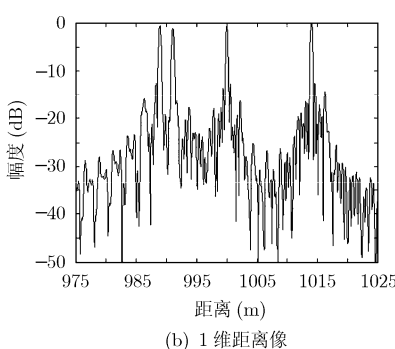
图8 $N=11$, $\Delta f=32$ MHz 时, 频域子孔径法成像(4 个点目标)图9 $N=6$, $\Delta f=64$ MHz 时, 本文算法成像(4 个点目标)

图10 对图9(b)继续进行 Super-SVA 处理后的结果

6 结论

通过上面的分析和仿真可知, Super-SVA 可以应用于调频步进信号的处理过程中, 通过对每个子脉冲的低分辨率 1 维距离像分别进行 Super-SVA 操作, 外推子脉冲频谱, 使得各子脉冲带宽增加并使合成频谱连续, 从而克服当频率步进量大于子脉冲带宽时的栅瓣问题, 使得能够在不牺牲分辨率的前提下减小子脉冲数目, 降低调频步进信号运动补偿的复杂性。采用此方法处理调频步进信号, 不需要知道场景先验知识及其它额外信息且实现过程简单。通过对一个点目标及多个点目标的成像仿真, 验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Zhang Q, Yeo T S, and Du G. ISAR imaging in strong ground clutter by using a new stepped - frequency signal format[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2003, 41(5): 948-952.
- [3] Alberti G and Citarella L, et al. Current status of the development of an Italian airborne SAR system (MINISAR) [C]. Proceedings of SPIE, 2004, Vol. 5236: 53-59.
- [4] 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.

- [5] 张云华, 李海滨, 伍捷. 步进频率线性调频脉冲信号的子孔径处理方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(1): 1-6.
- [6] Doerry W. SAR processing with stepped chirps and phased array antennas [R]. SANDIA Report, SAND2006-5855, 2006.
- [7] Stankwitz H C and Kosek M R. Super-resolution for SAR/ISAR RCS measurement using spatially variant apodization, Proceedings of Antenna Measurement Techniques Association (AMTA) 17th Annual Meeting and Symposium, Williamsburg, VA, 13-17 Nov 1995: 251-256.
- [8] Stankwitz H C and Kosek M R. Sparse aperture fill for SAR using Super-SVA [C]. Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference, Ann Arbor, 13-16 May 1996: 70-75.
- [9] Xu Xiaojian and Narayanan R M. Enhanced resolution in SAR/ISAR imaging using iterative sidelobe apodization[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(4): 537-547.
- [10] Zhuang Long, Liu Xing-zhao, and Zhou Zhi-xin. Enhanced resolution for sparse aperture radar imaging using Super-SVA [C]. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, Bangkok, 2007: 95-98.
- [11] Stankwitz H C, Dallaire R J, and Fienup J R. Nonlinear apodization for sidelobe control in SAR imagery [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 31(1): 267-279.

翟文帅: 女, 1981年生, 研究实习员, 研究方向为SAR信号处理、成像算法。

张云华: 男, 1967年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波遥感理论与技术、电磁场数值计算。