

探测跟踪技术

直达波和杂波干扰下目标阴影逆合成孔径成像*

王磊¹, 罗迎¹, 张群^{1,2}

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077;

2. 复旦大学 波散射与遥感信息国家教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要: 对直达波和杂波条件下的阴影逆合成孔径雷达 (SISAR) 目标成像问题进行了研究。分析了直达波和杂波对侧影像畸变和运动补偿的影响, 提出了一种新的直达波和杂波干扰下目标 SISAR 成像方法, 即将回波信号与参考信号进行模拟对消, 并利用目标回波的频谱特性剔除残留直达波, 再对目标运动参数进行粗估计, 采用粗搜索和精搜索 2 步实施准确的运动补偿, 最终获得失真度较小的目标侧影像。仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 阴影逆合成孔径雷达; 直达波; 杂波抑制; 运动补偿

doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2011.02.029

中图分类号: TN958; TN911.7 文献标志码: A 文章编号: 1009-086X(2011)02-0142-06

Imaging Algorithm for Shadow Inverse Synthetic Aperture Radar with Direct Wave and Clutter Jamming

WANG Lei¹, LUO Ying¹, ZHANG Qun^{1,2}

(1. AFEU, Telecommunication Engineering Institute, Shaanxi Xi'an 710077, China;

2. Fudan University, Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information

(Ministry of Education), Shanghai 200433, China)

Abstract: The imaging technology of shadow inverse synthetic aperture radar (SISAR) with direct wave and clutter jamming is researched. The adverse effects on shadow image precisions and motion compensation induced by direct wave and clutters are discussed to present a novel algorithm for SISAR. Firstly, target's echoes are cancelled with the analog reference signals. Then, the residual direct waves are eliminated according to the spectrum characteristics of the echoes. After the motion parameters of target are estimated roughly, the accurate motion compensation is carried out by using rough searches and fine searches. Finally, the final shadow image of target is obtained. Simulations validate the effectiveness of the algorithm.

Key words: shadow inverse synthetic aperture radar (SISAR); direct wave; clutter suppression; motion compensation

* 收稿日期: 2010-10-27; 修回日期: 2010-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(60971100)

作者简介: 王磊(1984-), 男, 河南光山人。硕士生, 研究方向为雷达成像。

通信地址: 100076 北京市丰台区警备东路 6 号一区 E-mail: wanglei8887686@163.com

0 引言

阴影逆合成孔径雷达(SISAR)是双基地前向散射栅栏雷达的一种。当目标穿越雷达基线时,接收机就会接收到目标的前向散射信号,对目标的前向散射信号进行处理后就可以实现对低空突防目标的检测,获得目标的侧影成像结果,为目标识别提供重要特征信息^[1-4]。但SISAR一直面临着强直达波的困扰,由于要对目标穿越雷达基线时的前向散射波进行处理,此时接收机接收到的目标回波信号通常被强直达波所淹没^[5]。直达波的存在一方面影响回波信号的运动补偿,使得现有基于信号处理方法的运动补偿方法难以实现对目标运动的有效补偿;一方面使得侧影像产生失真,不利于目标识别^[6-7]。直达波和杂波下目标SISAR成像的难点在于如何在剔除直达波和杂波的同时理想地保留目标全息信号分量。由基于最大对比度准则的成像方法^[8]分析中可知,要获取目标准确的侧影像,要求回波信号具有较高的信噪比。对于双基地前向栅栏雷达,在探测低空目标时,为了获取目标穿越基线附近时的前向散射信号,通常双基雷达中用于抑制噪声的角度和多普勒频率删除法在SISAR中并不适用。在目标穿越基线位置时会损失目标回波信号,这将使目标侧影像产生严重畸变,影响进一步的特征提取和目标识别。因此,如何消除直达波和杂波的影响,是SISAR成像研究需要解决的重要问题。

本文在阐述SISAR运动补偿与成像原理的基础上^[9],提出了一种新的直达波和杂波干扰下目标SISAR成像方法,仿真实验验证了该方法的有效性。

1 SISAR 成像原理

SISAR的几何配置如图1所示。雷达发射机位于坐标系 (x, y, z) 的原点 O ,接收机位于 x 轴上的 $(b, 0, 0)$ 处。 (ξ, η) 是运动目标的坐标系,其坐标轴与 (x, y, z) 的对应坐标轴平行,原点位于目标中心点 P 。目标以速度 v 与 x 轴成角度 ψ 运动。雷达发射波长为 λ 的单频连续波。目标穿越基线时 P 的位置坐标为 (x_0, y_0, z_0) , P 点的运动轨迹方程可写为

$$x_p = x_0 + vt \cos \psi, y_p = vt \sin \psi, z_p = z_0,$$

运动目标的全息信号对应于目标散射的菲涅耳区近似值,在图1所示雷达系统中可表示为^[5]

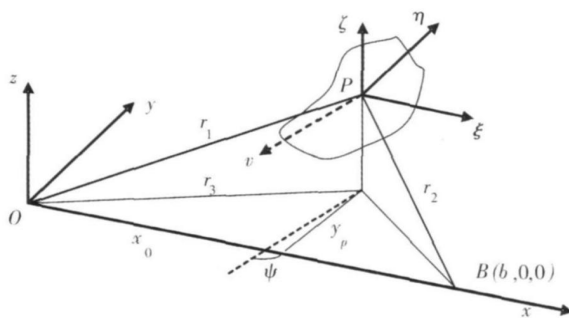


图1 SISAR 雷达系统示意图

Fig.1 Diagram of SISAR radar system

$$\dot{E}_T / \frac{ke^{jkb}}{2\pi r_1 r_2} \iint_{\xi} \left\{ \eta \right\} \cdot \exp\{j\Omega^2[(\eta - \eta_w)^2 + (\zeta - \zeta_w)^2]\} d\zeta d\eta, k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: η_w, ζ_w 为接收点 B 在平面 (η, ζ) 中的坐标;
 $r_1 = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}; r_2 = [(b-x)^2 + z^2 + y^2]^{1/2};$
 $\Omega = \sqrt{\frac{\pi}{\lambda}(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{b-x_p})} = \frac{\sqrt{\pi}}{r_F}, b > x_p > 0;$; $\xi(\eta, \zeta)$ 为侧影孔径 S 的场分布,在侧影轮廓内取值,在侧影轮廓外为0。设 Ω 在观测时间内为常数, $x_p \approx x_0$,并考虑 $\eta_w = -y_p, \zeta_w = -z_0$,变量替换后,得到运动目标的全息信号表示式^[10]:

$$\dot{E}(t) = \dot{Q} \iint_{\xi} \dot{H}(\eta) \exp\left[j\frac{\gamma}{2}\left(\frac{\eta}{v} + t\right)^2\right] d\eta \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \frac{k \sin \psi}{2\pi r_1 r_2} \exp(jkb + j\Omega^2 z_0), \quad (3)$$

$$\dot{H}(\eta) = \iint_{\xi} \xi(\zeta, \eta) \exp(j\Omega^2 \zeta^2 + j2\Omega^2 z_0 \zeta) d\zeta = \int_{c(\eta)}^{c(\eta)+h(\eta)/2} \exp(j\Omega^2 \zeta^2) \exp(jk\alpha_1 \zeta) d\zeta \quad (4)$$

式中: $h(\eta), c(\eta)$ 分别为 η 对应的侧影轮廓上下边沿的高度差及其中线高度坐标; $\gamma = 2\Omega^2 v^2 \sin^2 \psi$; $\alpha_1 = z_0 b / ((b-x_p)x_p)$; $\dot{H}(\eta)$ 为目标复侧影像,其模值实际上反映了侧影轮廓上下边沿的高度差。

可见,对接收到的目标全息信号进行如下处理后:

$$\hat{E}(t) = \dot{E}(t) \exp(-j\frac{\gamma}{2}t^2), \quad (5)$$

目标的侧影像可以通过对 $\hat{E}(t)$ 作傅里叶变换得到

$$|\hat{H}(\eta)| = \frac{\gamma}{2\pi|\dot{Q}|} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{E}(t) \exp\left[-j\frac{\gamma\eta t}{v}\right] dt \right|. \quad (6)$$

式(5)所作处理称为运动补偿。由该式可知,要得到目标准确的侧影像,必须精确估计参数 γ 的值,也即是估计 x_p, v 和 ϕ 的取值。但由双基雷达几何配置特性可知,目标穿越雷达基线附近区域时,正好是速度估计低精度区,很难精确地估计目标的运动参数,这给运动补偿带来了困难。另一方面,SI-SAR 成像中由于目标的前向散射系数处处相同,目标模型不再是通常 ISAR 成像中的散射点模型,而是成为了一个散射面模型。文献[8]提出了将成像与目标运动参数估计作为一个整体来考虑,采用图像最大对比度准则衡量目标像是否已经满足成像质量要求,来调整估计的目标运动补偿参数,再对信号进行补偿的成像方法。

2 直达波和杂波对 SISAR 成像的影响

2.1 直达波对目标侧影像的影响

将回波信号变换到基带后,直达波信号转化为零频直流信号,含直达波干扰的目标基带回波信号可表示为

$$E_r = \dot{E}(t) + E_d, \tag{7}$$

式中: E_d 为常数。

假设目标的运动参数已知,则运动补偿后的信号为

$$\hat{E}(t) = \dot{E}(t) \exp(-j \frac{\gamma}{2} t^2) + E_d \exp(-j \frac{\gamma}{2} t^2), \tag{8}$$

对上式右边的第 1 项作傅里叶变换可获得目标的侧影像 $|\dot{H}(\eta)|$, 即

$$|\dot{H}(\eta)| = \frac{\gamma}{2\pi|Q|} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{E}(t) \exp(-j \frac{\gamma}{2} t^2) \exp\left[-j \frac{\gamma \eta}{v} t\right] dt \right|, \tag{9}$$

显然,式(8)右边的第 2 项在获取目标侧影像处理中将侧影像产生干扰。考察式(8)右边第 2 项的傅里叶变换,由于其相位为二次项,幅度为常数,采用驻留相位点法(POSP)来求取其近似的傅里叶变换解析式。直达波对侧影像的影响体现为以下表达式

$$\dot{H}_d(\eta) = \frac{\gamma}{2\pi Q} \int_{-\infty}^{+\infty} E_d \exp(-j \frac{\gamma}{2} t^2) \exp\left[-j \frac{\gamma \eta}{v} t\right] dt, \tag{10}$$

其驻相点为 $t^* = -\eta/v$, 于是得到:

$$\dot{H}_d(\eta) = \frac{E_d}{4Q} \exp\left[-j \frac{\pi}{4}\right] \exp\left[j \frac{\gamma}{2v^2} \eta^2\right]. \tag{11}$$

式(11)表明直达波经过成像处理后的频域相位基本上为二次函数。在最终的侧影像中,直达波的影响表现为展宽的具有矩形窗形式的频谱,而目标回波经过运动补偿和傅里叶变换,在频域零频附近有着良好的聚集性,其频宽由目标的多普勒带宽决定。因此,回波中直达波的存在将使得目标侧影像的整体幅度有所抬高。

2.2 直达波对运动补偿的影响

由基于最大对比度准则的 SISAR 运动补偿和成像方法可知,侧影像的对比度随运动补偿参数的变化曲线是准确搜索目标运动参数的关键。当目标回波中不含直达波和杂波时,该曲线在正确的运动补偿参数点取得最大值,如图 2a 所示,因此,通过搜索该最大值点的位置即可获得准确的运动补偿参数,从而实现准确的运动补偿和成像。当目标回波中存在直达波时,随着运动补偿参数 γ 的变化,直达波经过补偿后的信号频谱也不断发生变化,使得侧影像的对比度也随之发生变化,对比度随 γ 的变化曲线中出现许多虚假极值点,从而影响运动补偿参数的准确搜索。如图 2b 所示,回波信号中加入 -4 dB 的直达波后,除了正确的补偿参数点外,还出现了很多虚假极值点,有的极值点的幅度甚至要比正确极值点的幅度还要大,从而无法搜索到正确的补偿参数。

2.3 杂波对目标成像的影响

SISAR 成像中,杂波主要包括地杂波产生的多径干扰和接收机热噪声等。与目标回波相比,杂波的功率在整个频谱范围内大致成均匀分布,可以将其视为平稳随机过程,其频谱宽度在相参处理时间内不随时间变化。杂波的存在使得侧影像出现许多随机起伏,边缘呈现锯齿状,从而影响侧影特征提取。

由于杂波在整个带宽内近似为均匀分布,因此,其对运动补偿的影响比直达波要小。在搜索运动补偿参数的过程中,随着补偿因子的变化,补偿后的杂波频谱对侧影像的影响表现为侧影像边缘的锯齿状起伏,由于平均效应,其对成像对比度的影响并不明显。

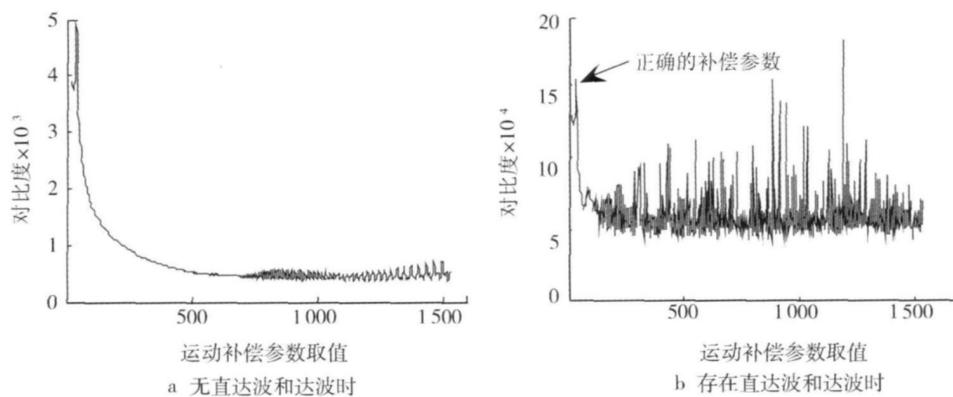


图2 侧影像对比度随运动补偿参数变化曲线

Fig. 2 Change curve of shadow image contrast ratio with the motion compensation parameters

3 直达波和杂波干扰下目标成像算法

3.1 中频模拟对消

为了降低直达波和杂波对基于最大对比度准则成像方法中运动参数搜索精度的影响,避免由于噪声产生导致对比度最大值的搜索陷入的虚假极值点,必须采取有效的噪声抑制措施。在雷达接收机前端,可以采取模拟对消方式剔除大部分直达波。将信号进行数字正交变换后,利用目标回波信号和直达波信号的区别,进一步剔除直达波的影响,并对侧影像进行平滑,以消除残留杂波带来的锯齿状起伏,获取较为准确的目标侧影像。图3是基于中频模拟对消直达波的实现框图。

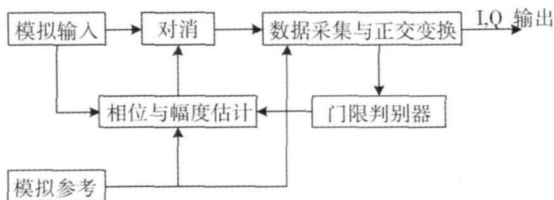


图3 基于模拟中频对消直达波原理框图

Fig.3 Theoretical diagram of direct wave based on analog IF cancellation

3.2 目标运动参数粗估计

由前面的分析可知,当目标回波中存在较强的直达波和杂波时,基于成像对比度最大准则的运动参数搜索方法将会遇上困难。因此,在对目标回波进行成像处理前,应先确定目标运动的大致参数。目标运动参数的估计实际上就是目标的无源定位问题。采用最为常用的时差定位法,通过处理3个或

更多观测站采集到的信号到达时间测量数据对目标进行定位。利用3个或更多的不同位置的接收天线,获得多个定位椭球面,这些椭球面的交点即为目标的位置。通过跟踪目标的位置变化,可以得到目标运动参数的大致估计。

3.3 目标SISAR成像算法流程

经过中频模拟对消,获得的数字正交复信号中直达波成分已经得到一定的抑制,继续利用直达波和目标回波信号的区别,可以进一步剔除直达波的影响。将信号变换到基带,不含噪声干扰的目标回波信号频谱呈现为近似sinc函数,而直达波呈现为零频附近的具有较大幅度的波峰,因此可以采用sinc函数拟合的方法消除直达波的影响。在采用基于最大对比度准则的成像过程中,为了消除杂波引起的侧影像起伏给成像对比度带来的影响,对目标运动参数进行精搜索时,可先对侧影像进行平滑处理,消除锯齿状起伏,再计算成像对比度,从而确定运动补偿参数。获取准确的运动参数后,对目标回波进行补偿,再作傅里叶变换得到目标侧影像,同样也作平滑处理,消除残留杂波的干扰。获得目标回波的正交复信号后,本文所提成像处理方法可以阐述如下:

Step 1: 对回波的零频附近幅度频谱作sinc函数拟合,消除残留直达波对零频附近目标回波的影响;

Step 2: 利用三天线时差定位技术大致估计 v 的取值范围 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 。估计 v 的取值,也即是估计 x_p, v 和 ϕ 的取值。通过限定参数的取值范围,可以防止搜索算法陷入虚假极值点,并可以减少搜索时

间;

Step 3: 初始化搜索参数: 令 $\gamma = \gamma_{\min}$;

Step 4: 对接收到的雷达信号 $\dot{E}(t)$ 进行运动补偿, 得到 $\hat{E}(t)$;

Step 5: 对 $\hat{E}(t)$ 作离散傅里叶变换, 得到离散的谱 $|S(i)|, i = 1, 2, \dots, N$, 并且为了比较成像对比度的大小, 对其作归一化处理, 即

$$|S_1(i)| = |S(i)|^2 / \sum_{i=1}^N |S(i)|^2; \quad (12)$$

Step 6: 按照下式计算 $|S_1(i)|$ 的对比度:

$$C = \frac{\sqrt{E\left[|S_1(i)| - E\left[|S_1(i)|\right]\right]^2}}{E\left[|S_1(i)|\right]}; \quad (13)$$

Step 7: 粗搜索: 令 $\gamma = \gamma + \Delta\gamma_1, \Delta\gamma_1$ 为粗搜索步长。重复 Step 4 ~ Step 7 直到 $\gamma = \gamma_{\max}$;

Step 8: $\gamma_1 = \arg \max_{\gamma} C$, 得到对比度最大时的运动补偿参数 γ_1 ;

Step 9: 令 $\gamma = \gamma_1 - \Delta\gamma_1$;

Step 10: 用 γ 对接收到的雷达信号 $\dot{E}(t)$ 进行运动补偿, 得到 $\hat{E}(t)$, 并对 $\hat{E}(t)$ 作离散傅里叶变换, 得

到离散的谱 $|S(i)|, i = 1, 2, \dots, N$;

Step 11: 对 $|S(i)|$ 进行平滑处理和归一化处理, 以消除噪声对成像对比度的干扰;

Step 12: 计算 $|S_1(i)|$ 的对比度;

Step 13: 精搜索: 令 $\gamma = \gamma + \Delta\gamma_2, \Delta\gamma_2$ 为精搜索步长。重复 Step 10 ~ Step 13 直到 $\gamma = \gamma_1 + \Delta\gamma_1$;

Step 14: $\gamma_2 = \arg \max_{\gamma} C$, 得到对比度最大时的运动补偿参数 γ_2 ;

Step 15: 利用得到的运动补偿参数 γ_2 对目标回波信号进行运动补偿, 得到目标侧影像, 并对侧影像作平滑处理, 获取最终的侧影像。

4 仿真实验

仿真条件如下: 雷达工作频率 935 MHz, 基线长度 20 km, 采样频率 1 kHz; 成像时间 16 s; 目标穿越基线时目标中心坐标为(10 km, 0 m, 60 m); 目标运动速度 100 m/s; 目标速度方向与基线夹角为 80°。目标侧影模型如图 4a 所示。在无噪声条件下, 目标全息信号的频域波形如图 4b 所示。

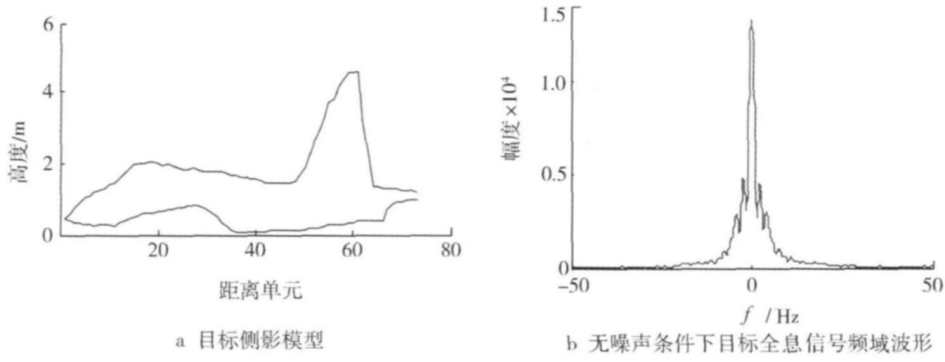


图 4 目标侧影模型及无噪声条件下目标全息信号频域波形
 Fig.4 Model of the target's shadow image and holographic signal frequency domain Waveform in non-noise condition

无噪声条件下, 采用最大对比度准则能够很准确地搜索到运动补偿参数, 成像对比度随运动补偿参数的变化曲线如图 5 所示, 最终成像结果如图 6 所示。仿真中回波信号中加入直达波和杂波, 直达波和杂波功率比为 2:1, 信噪比为 -10 dB。对回波信号进行直接成像处理时得到的侧影像如图 7a 所示, 可见即使采用了精确的运动补偿, 侧影像仍然失

真严重。采用本章所提的直达波和杂波剔除方法后, 对回波信号进行成像处理, 得到的对比度随运动补偿参数变化曲线如图 7b 所示。用获取的最大对比度值对应的运动补偿参数对回波进行运动补偿, 得到的成像结果如图 7c 所示, 可见取得了很好的成像效果。

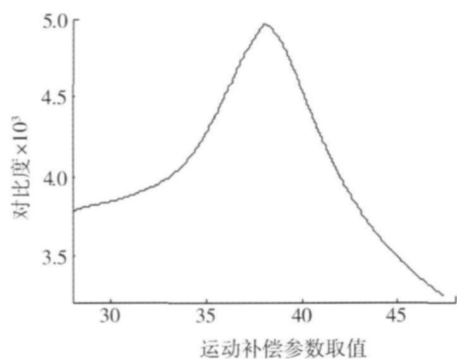


图5 成像对比度变化曲线

Fig. 5 Variation curve of the image's contrast

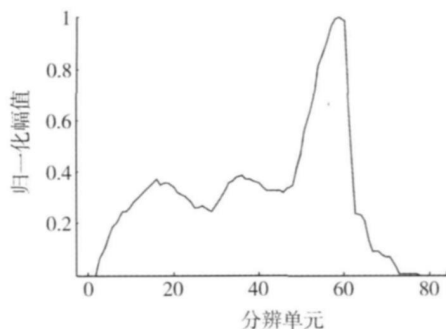


图6 无噪声条件下成像

Fig. 6 The image in non-noise condition

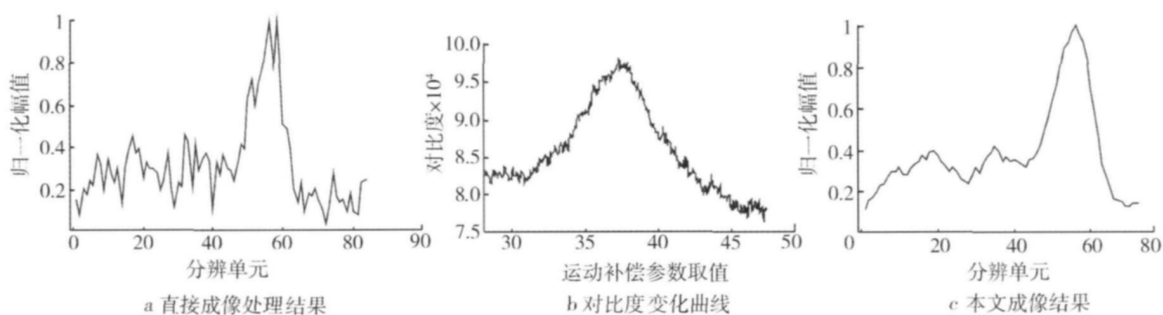


图7 直达波和杂波条件下成像

Fig. 7 The image in the direct wave and clutters condition

5 结束语

直达波和杂波的存在会对目标 SISAR 成像带来较大的困难, 能否解决直达波和杂波背景下的目标成像问题, 是 SISAR 技术能否实用的关键。本文从分析直达波和杂波对目标成像的影响出发, 提出了直达波和杂波背景下的目标成像算法, 并进行了仿真验证。仿真实验表明, 算法能取得较好的效果。

参考文献:

- [1] Cherniakov. M, Abdullah. R S A R, Jan čovi č. P, et al. Automatic Ground Target Classification Using Forward Scattering Radar [J]. IEE Proc. Radar Sonar Navig., 2006, 153(5): 427-437.
- [2] 张涛, 张群, 罗斌凤, 等. 基于时频分析的双基地前向散射雷达侧影成像[J]. 电子学报, 2001, 29(6): 726-729.
- [3] 罗斌凤, 张冠杰, 张守宏. SISAR 侧影轮廓中线相位重构及其识别特征提取[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 368-372.
- [4] 马长征. 雷达目标三维成像技术研究[D]. 西安: 西安

电子科技大学, 1999.

- [5] 张涛. 基于双基地前向散射栅栏雷达的侧影成像及识别技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
- [6] 陈觉之, 袁领峰, 罗斌凤, 等. 采用包络检波去除 SISAR 直达波干扰的新方法[J]. 海军工程大学学报, 2005, 17(2): 23-26.
- [7] 吕孝雷, 张守宏, 李锴. 双基地前向散射栅栏雷达的目标运动参数估计[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2007, 34(1): 54-58.
- [8] LUO Ying, HU Dong-liang, LUO Bin-feng, et al. Motion Compensation for SISAR Based on Contrast Maximization [C] // 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings. Huangshan, China, 2007: 431-434.
- [9] 罗斌凤. 双(多)基阴影逆合成孔径雷达侧影成像理论与实验研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005
- [10] 罗斌凤, 张冠杰, 张守宏. SISAR 中运动目标全息信号的表示及仿真研究[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1316-1320.