

低频宽带 SAR/GMTI 试验系统*

周智敏,周红,雷鹏正,黄晓涛,常玉林,朱国富,范崇祯

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:低频宽带 SAR/GMTI 能对开阔或叶簇覆盖地区的静止和运动目标进行侦察、监视及成像。详细介绍了低频宽带 SAR/GMTI 系统及其信息处理过程,讨论了其中的谱修正、成像及通道均衡等问题;针对系统的低载频特性,采用了 STAP、DPCA 结合 ATI、图像域 STAP 3 种 GMTI 方法。外场试验证明,该系统能够有效地抑制杂波,检测运动目标,并估计运动目标参数。

关键词:低频;合成孔径雷达;地面运动目标指示

中图分类号:TN959.73; TN959.1 **文献标识码:**A

Low Frequency Wide Band SAR/GMTI Experimental System

ZHOU Zhi-min, ZHOU Hong, LEI Peng-zheng, HUANG Xiao-tao, CHANG Yu-lin, ZHU Guo-fu, FAN Chong-yi

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Low frequency wide band SAR/GMTI has the capabilities of reconnaissance, surveillance and imaging for stationary and moving targets in the area open or concealed by foliage. A low frequency wide band SAR/GMTI system, developed by National University of Defense Technology, was introduced in detail as well as the information processing procedures. Important issues in the procedures such as spectrum correction, imaging and channel equalization were discussed. Three GMTI methods-STAP, DPCA combined with ATI and image domain STAP-were chosen in consideration of the low frequency property in the system. It is verified through the outfield experiment that the system can effectively suppress clutter, detect moving target and estimate its motion parameters.

Key words: low frequency; Synthetic Aperture Radar(SAR); Ground Moving Target Indication(GMTI)

低频宽带合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有穿透叶簇、获得静止目标高分辨成像的特点。利用低频多通道 SAR 系统实现地面运动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)功能,可以快速观测大范围场景,对开阔或叶簇覆盖地区的静止或运动目标进行侦察、监视及成像。近年来,低频 SAR/GMTI,尤其是 VHF/UHF 波段的 GMTI 技术研究和应用受到国内外关注。其中典型的试验系统包括美国国防高级研究计划局(DARPA)的 FORESTER 系统^[1],瑞典防务研究局(FOI)的 LORA 系统^[2]。以上系统都已研制出样机并进行了多次飞行试验,公布了相关的 SAR 图像,但有关 GMTI 部分的结果未见公开报道。在国内,国防科学技术大学率先开展了多通道低频宽带 SAR/GMTI 技术的研究,搭建了 SAR/GMTI 信息处理平台,建成了车载低频宽带 SAR/GMTI 试验系统及试验外场。

外场试验结果表明,系统能有效抑制杂波、检测小 RCS 的运动目标,信杂噪比提高最多达到 30 dB 以上,车载试验的顺利进行为后续的无人机载低频 SAR/GMTI 试验奠定了基础。

1 低频宽带 SAR/GMTI 系统构成

低频宽带 SAR/GMTI 系统主要由以下部分组成:收发天线、发射组合(产生线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号)、频率合成器、多通道接收机、数据采集存储板、主控台以及车载试验装置(包括雷达车、运动目标、GPS 测速系统等)。系统各部分构成如图 1 所示。雷达车和运动目标处于加速的启动状态时,主控台通过控制信号开启发射组合,产生 LFM 信号,经过功放后由一个发射天线向外辐射;接着,雷达车和运动目标分别匀速驶入预定路线,主控台通过同步信号和触发信号开启接收组合,由多通道接收机接收

* 收稿日期:2011-02-15

基金项目:国家部委资助项目;教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-07-0223)

作者简介:周智敏(1957—),男,教授,博士生导师。

回波,解调为 I、Q 两路基带信号并存储于数据采集存储板中,其结果可通过数据采集软件实时观察;同时利用两个 GPS 记录雷达和运动目标的实时速度,分别用于成像时的运动补偿和运动目标参数估计的参考。

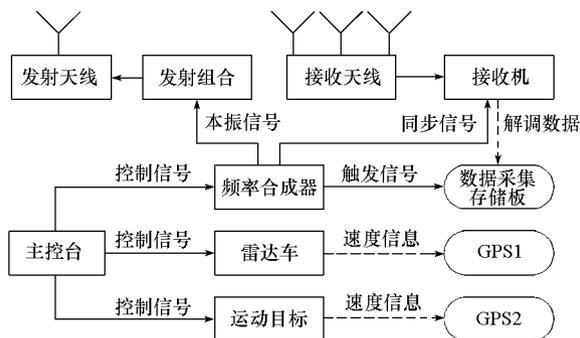


图 1 SAR/GMTI 系统构成

Fig. 1 SAR/GMTI system construction

系统采用正侧视条带工作模式,工作于 UHF 波段,工作频率附近无射频干扰。天线架高 5 m,采用工字型平板折合振子天线,阵元间距为 1 倍波长,波束角为 60° 。测绘带近端和远端的入射角分别为 79.5° 和 87.2° ,由发射到接收天线直接辐射引起的通道耦合已通过设置波门除去。试验场地是一块约 $80\text{m} \times 100\text{m}$ 的平整空地,有少量强散射固定目标作为估计通道误差的特显点。配合试验的运动目标是一辆由专人驾驶的小货车。系统和试验场地如图 2 所示。



图 2 SAR/GMTI 系统和试验场地

Fig. 2 SAR/GMTI system and experimental field

2 低频宽带 SAR/GMTI 信息处理

运动目标检测是 SAR/GMTI 信息处理的核心内容。低频宽带 SAR/GMTI 系统具有大波束角和低载频特点,这使运动目标的信杂噪比很低,系统对目标径向速度的敏感程度不高,给探测隐蔽、隐身、小 RCS 目标的要求带来了新的挑战。此外,系统的低载频特性使运动目标对应的多普勒频偏较小,快速运动目标的频谱一般落在静止

背景频谱内,从而能够成像于 SAR 图像上;而经过成像处理,静止杂波被“局域化”到较小的范围内,从而提高了运动目标的信噪比,降低了相邻像素之间的杂波相关性,有利于运动目标检测。综合以上考虑,本系统采用了 3 种运动目标检测方法:(1) 空时自适应处理 (Space Time Adaptive Processing, STAP)^[3]; (2) 相位中心偏置天线 (Displaced Phase Centre Antenna, DPCA)^[4] 结合顺轨干涉 (Along Track Interferometry, ATI)^[5]; (3) 图像域 STAP^[6-7]。其中后两种都是图像域 GMTI 方法。结合以上方法设计的信息处理过程如图 3 所示。接下来对其中的关键步骤进行说明。

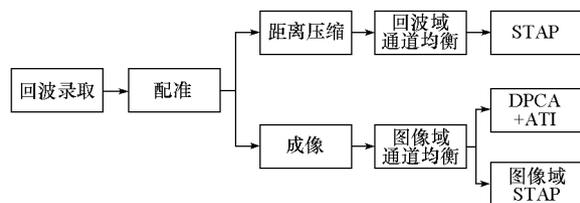


图 3 SAR/GMTI 信息处理过程

Fig. 3 SAR/GMTI information processing procedure

2.1 基于谱修正的距离压缩

为抑制 LFM 信号频谱的边缘跃变,降低脉压后的旁瓣电平,在距离压缩时需要加窗处理。但本系统采用的 LFM 信号的时宽带宽积 (Time Band Product, TB 值) 较小 (低于 25), 信号频谱的非涅尔波纹极为严重,影响了加窗效果^[8]。图 4 是两种理想的 LFM 信号频谱及脉压结果,采用 Hamming 窗。其中小 TB 值信号 (实线) 参数与实际信号完全相同,大 TB 值信号 (虚线) 除时宽以外,其他参数与小 TB 值信号相同。可观察到小 TB 值信号脉压后最高旁瓣为 -17.9 dB ,而大 TB 值信号降低为 -40.1 dB 。

这一问题的直观解决方法就是将 LFM 信号频谱修正为矩形,即在距离压缩时引入谱修正技术,以少量的信噪比损失为代价而获得理想的主副瓣比^[9-10]。设发射信号副本的离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 为 $S(k)$, 窗函数为 $W(k)$, 则设计谱修正传递函数 $H(k)$ 为

$$H(k) = W(k)/S(k) \quad (1)$$

对实际系统发射的信号进行处理,比较谱修正前后的频谱和脉压效果,如图 5 所示。为更清晰地表明非涅尔波纹被抑制,对图 5(a) 中的频谱只加矩形窗;对图 5(b) 如图 4(b) 处理,脉压时加 Hamming 窗。可以观察到谱修正后信号的频谱变得更接近理想的矩形信号,带内波纹得到抑制,

而脉压后的旁瓣改善约 4.8 dB。

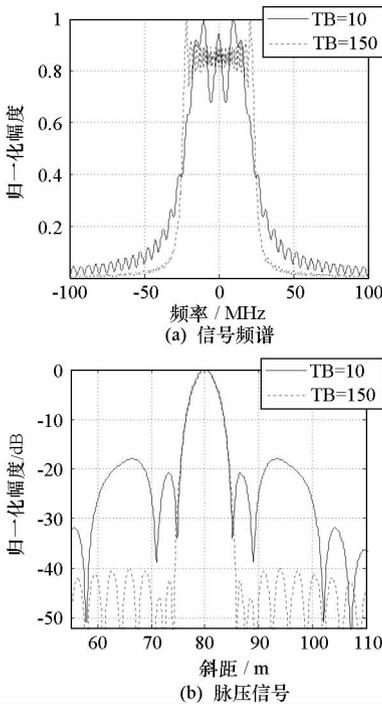


图 4 理想信号及其脉压结果

Fig. 4 Ideal signal and output of range compression

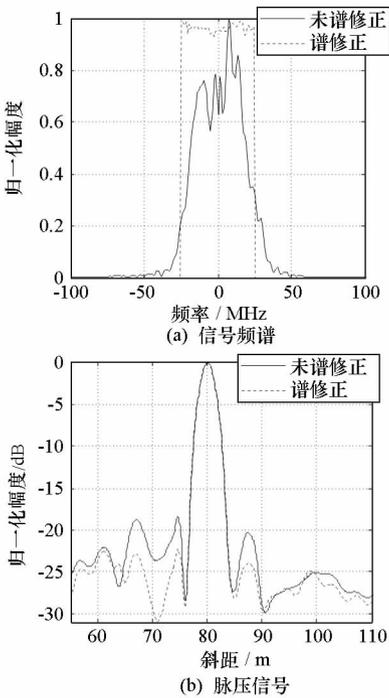


图 5 实测信号及其脉压结果

Fig. 5 Real signal and output of range compression

2.2 低频宽带快速后向投影成像

由于系统工作于低频波段,为了获得方位向的高分辨率,需要大的积累孔径,这使得在一个孔径内距离徙动的空变明显。适合于大积累角的成像算法有线调频变标(Chirp Scaling, CS)、非线性 CS(Nonlinear CS, NCS)、 $\omega - k$ 、后向投影(Back

Projection, BP)算法等。其中 BP 算法是一种时域算法,能很好地结合运动补偿,适用于任何雷达航迹,对场景大小无限制,能获得极佳的聚焦效果,因而成为本系统的首选算法。由于经典的 BP 算法运算效率较低,实际中很少被使用,而代之以局部 BP(Local BP, LBP)^[11]或快速因式分解 BP(Fast Factorized BP, FFBP)^[12]等改进的 BP 算法,在性能上有轻微损失,但是运算效率接近快速变换类的算法如 CS。

对实际场景中的角反射器进行成像(包括距离向谱修正,加 Hamming 窗)的结果如图 6(a)所示。该角反射器的距离向和方位向剖面显示在图 6(b)和(c)中。可以观察到距离向和方位向分辨率分别为 3.1 m 和 2.1 m,峰值旁瓣比低于 20 dB,与系统设计指标相符。

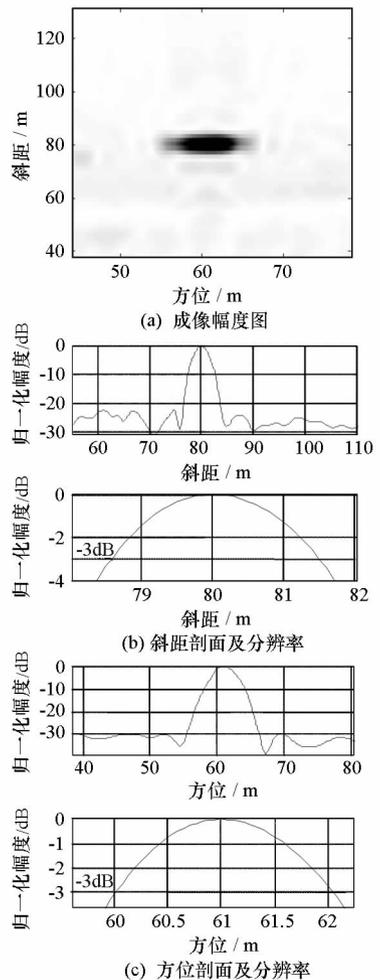


图 6 开阔地面角反射器成像及剖面
Fig. 6 Imaging and cross-section of a trihedral reflector in an open area

2.3 基于子孔径图像的通道均衡

在实际应用中,由于天线方向图和频率响应不一致、接收机噪声以及环境影响等因素,各通道间的幅相失配即通道误差严重影响了运动目标检

测和参数估计性能。因此,作为运动目标检测的预处理步骤,通道误差校正即通道均衡具有极其重要的意义。针对图像域 GMTI 方法,文献[6]中提出一种图像域的通道误差估计和自校正方法,在实际中取得了较好效果。但是对于低频 SAR 系统而言,由于系统的波束角很大,幅相误差随方位角变化,这里取一组实测数据进行说明:将图像划分为5个不同视角的子孔径图像,再以通道1为参考分别估计各通道的幅相误差,所得结果如图7所示,可以观察到这个通道误差随子孔径视角变化归一化,幅度的变化范围约为0.8~1.2,相位变化范围约为-120°~-80°。

因此在低频系统中,直接基于全孔径图像估计和补偿幅相误差无法达到满意的效果。我们提出基于子孔径图像的通道均衡方法^[13],在达到较

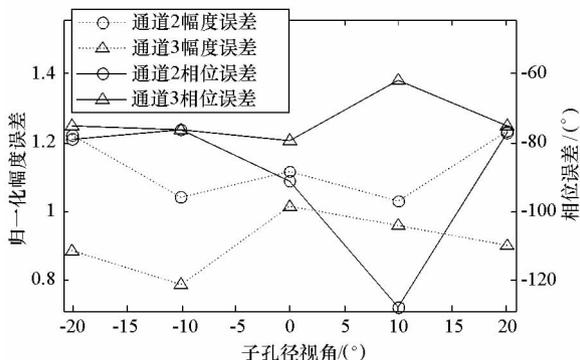


图7 不同视角图像的幅相误差
Fig. 7 Magnitude and phase error in different view of angle image

高幅相误差估计精度的同时,也能适应误差随视角的变化。其处理流程如图8所示。

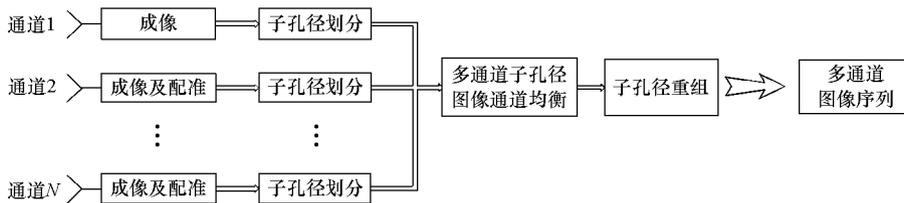


图8 基于子孔径图像的通道均衡方法
Fig. 8 Channel equalization method based on subaperture images

2.4 运动目标检测与估计

2.4.1 STAP 方法

STAP 是一种具有最优杂波抑制能力的 GMTI 方法,它对载机飞行不平稳、通道误差、杂波内部运动等多种不理想情况均有较强的适应能力,能够获得最大的输出信杂噪比。设第 k 个距离单元对应的“一页”空时数据为 x_k ,假设第 k 页数据中存在/不存在角度-速度为 (ϕ, v_r) 的运动目标两种情况下的 x_k 可分别表示为

$$\begin{aligned} H_0: x_k &= c_k + n_k \\ H_1: x_k &= s + c_k + n_k \end{aligned} \quad (2)$$

其中 H_0 假设代表无动目标存在时的情况, H_1 代表有动目标存在时的情况。 c_k 为静止杂波对应的信号, n_k 为噪声信号, s 是运动目标信号。利用最佳二维滤波器 w (其构造与 (ϕ, v_r) 有关) 对 x_k 进行自适应滤波: $y_k = w^H x_k$ 。然后可根据杂波统计特性设定门限对 y_k 进行判决。

下面利用 STAP 对系统录取的一段实测数据进行处理,处理前已通过图像域的通道均衡获得了幅相误差并对该数据进行了校正。经过处理后的输出显示在图9中,估计出目标的锥角为 85° , 径向速度为 2.4 m/s 。

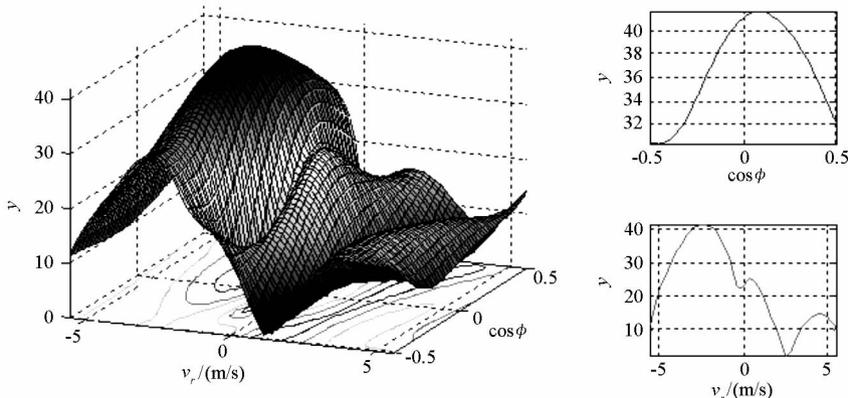


图9 STAP 二维输出及其剖面
Fig. 9 Two-dimensional output of STAP and cross-sections

2.4.2 DPCA 结合 ATI 方法

该方法首先将通道 1 与通道 2 的图像相减、通道 2 与通道 3 的图像相减以实现杂波相消,再将两路杂波相消结果进行顺轨干涉,得到的干涉图相位为

$$\Delta\phi \approx -\frac{4\pi v_y \sin\varphi}{\lambda v_a} d \quad (3)$$

其中 λ 、 φ 、 v_a 、 d 分别表示系统载频、天线入射角、载机速度和基线长度。对干涉图的幅度和相位设置门限以检测运动目标,通过干涉相位估计目标的径向速度分量。图 10 显示的是与 1.4.1 同一批次录取的数据进行 SAR 成像的结果,其中标出了运动目标和强杂波。经过 DPCA + ATI 处理后的结果以 -18.0 dB 为门限去掉噪声后,将幅度和相位图显示在图 11 中,其中图 10 和图 11(a) 的 colorbar 是相同的。可以观察到静止杂波被抑制,运动目标能检测出来,并且不存在虚警目标,通过图 11(b) 估计出运动目标的距离向速度为 $v_y = 2.95$ m/s。处理前信杂噪比为 -8.0 dB,处理后为 18.0 dB,改善了 26.0 dB。

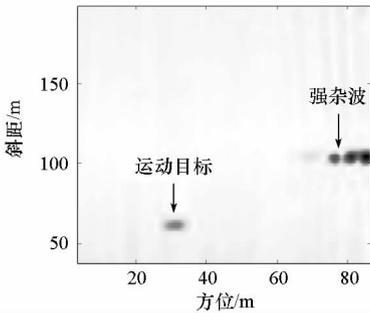


图 10 通道 1 SAR 成像结果

Fig. 10 SAR Imaging result of channel 1

2.4.3 图像域 STAP

由于经典的 STAP 要求载机和目标之间的“距离走动不超过一个距离采样单元”,它能够利用的相干积累脉冲数较少,影响了运动目标检测和参数估计效果。我们针对低频 SAR/GMTI 系统提出图像域长相干积累 STAP 模型^[6],将经典 STAP 的空间-时间二维模型扩展到空间-方位-距离三维,因此可利用更多的相干积累脉冲,并能适应运动目标在 SAR 图像上的散焦。本系统采用的图像域 STAP 降维算法可分为图像域局部 STAP 处理、图像域局部 STAP 输出的相干积累两个独立的步骤:1) 图像域局部 STAP 处理。对于某个方位-斜距位置 (x, r) ,提取其在多通道图像上的像素序列,以给定的方位速度-距离速度 (v_x, v_y) 进行自适应滤波,处理图像上所有位置后得到杂波抑制后的图像;2) 图像域局部 STAP 输出的相干积累。按 (v_x, v_y) 对上一步骤输出的图

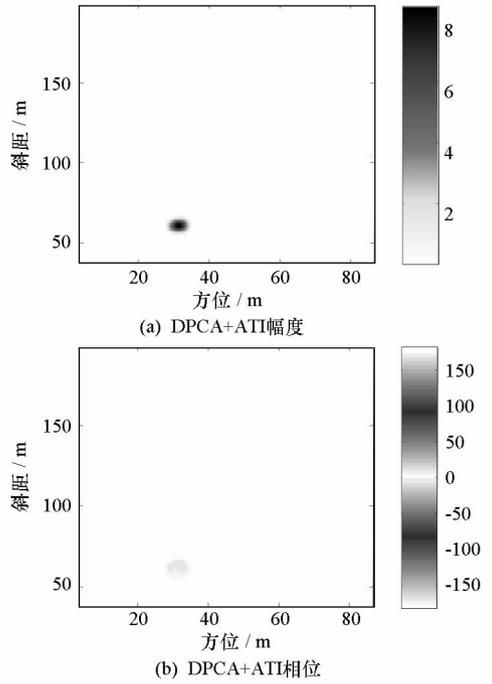


图 11 DPCA + ATI 处理结果(显示时幅 -15 dB)

Fig. 11 Processing result by DPCA + ATI

像的感兴趣区域(Region of Interest, ROI)进行重新聚焦,由输出的图像判断该位置是否存在速度为 (v_x, v_y) 的运动目标。

利用图像域 STAP 方法处理一段实测数据,场景与 1.4.2 中的相同。用 $(0, 3.0)$ m/s 的速度进行图像域 STAP 处理输出的幅度图显示在图 12 中。可以观察到杂波被有效抑制,设定恒虚警门限判决后运动目标被检测了出来,没有虚警。处理前信杂噪比为 -8.0 dB,处理后为 23.2 dB,改善了 31.2 dB。用不同的速度进行图像域 STAP 处理,由于处理速度与真实速度失配造成的信杂噪比(Signal-to-Interference-and-Noise Ratio, SINR)损失(SINRLoss)显示在图 13 中,可以观察到 $(0, 3.0)$ m/s 处 SINRLoss 最大,由此也可估计出运动目标速度为 $(0, 3.0)$ m/s,与前一种方法处理结果差别不大。

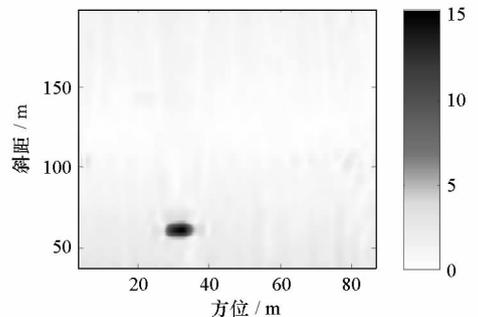


图 12 $(0, 3)$ m/s 假设下图像域 STAP 输出

Fig. 12 Output of image domain STAP for an assumption of $(0, 3)$ m/s

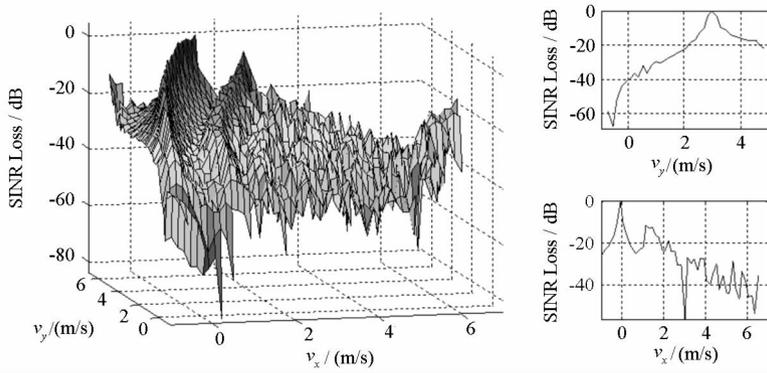


图 13 速度失配造成的运动目标信杂噪比损失及其剖面

Fig. 13 SINR loss and cross-sections caused by velocity mismatch

2.4.4 GMTI 算法小结

本试验采用了 3 种 GMTI 算法处理实测数据。下面结合实测数据处理结果对 3 种算法进行比较,列于表 1 中。可以得到以下结论:

(1) 在目标检测方面,后两种算法在图像中进行运动目标检测,输入信噪比更高,并且相干积累时间更长,由此能获得更好的检测结果。STAP 能处理短时间段的数据,从而能更细致地反映目标短时间内的速度,适用于非匀速目标。在均匀杂波背景下,检测和估计匀速运动目标,图像域 STAP 具有最优的处理效果,但是它需要杂波的统计信息,因此对非均匀杂波的处理效果不如第 2 种方法。在本文试验中对运动目标周围的均匀杂波、图像域 STAP 的信杂比改善比第 2 种方法提高了 5.2 dB。

(2) 在参数估计方面,STAP 估计的是运动目标在相干积累时间内的径向速度,因此目标即使在整个 SAR 数据录取过程中非匀速运动,STAP 的参数估计结果也能反映这种现象;DPCA 结合 ATI 估计的是目标在合成孔径图像上的径向速度(即距离向速度),适合目标匀速运动的情况;仅有图像域 STAP 能估计目标的二维速度。

表 1 3 种 GMTI 算法比较

Tab. 1 Comparison of three GMTI methods

适用范围	杂波	速度类型	速度方向
STAP	均匀	任意	径向
DPCA + ATI	任意	匀速	距离向
图像域 STAP	均匀	匀速	距离向和方位向

3 结束语

低频 SAR 与 GMTI 技术有机结合,可以获得复杂场景(如多林地带)静态和动态全方位的信息,是未来战场信息获取的重要发展趋势与必然要求。目前的研究和试验结果表明,车载低频宽

带 SAR/GMTI 系统能在低信杂噪比环境下有效抑制杂波,检测小 RCS 的运动目标并估计其二维速度,其中运动目标的信杂噪比提高最多达 30dB 以上。车载试验在系统设计和理论研究方面取得的成果,为接下来的无人机载低频 SAR/GMTI 试验打下了基础,但仍有很多工作有待改进,如进一步提高雷达分辨率、更多 GMTI 算法的研究与应用等。相信随着系统的完善和研究的深入,低频 SAR/GMTI 系统将在实际中发挥出应有的作用。

参考文献:

- [1] DARPA FORESTER [EB/OL]. [2011-01-26]. http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_FORESTER.
- [2] Ulander L, Bolm M, Flood B, et al. The VHF/UHF-band LORA SAR and GMTI System [C]// Proc. of SPIE, 2003, 5095: 206-215.
- [3] Melvin W L. A STAP Overview [J]. IEEE A&E Systems Magazine, 2004, 19: 19-34.
- [4] 王永良, 陈建文, 吴志文. 现代 DPCA 技术研究[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 118-201.
- [5] Kapfer R, Davis M E. Along Track Interferometry for Foliage Penetration Moving Target Indication [C]//IEEE Radar Conference, 2008: 321-326.
- [6] 常玉林, 黄晓涛, 周红, 等. 可适应阵列误差和非均匀杂波环境的多通道 SAR 图像域 STAP 方法[J]. 遥感学报, 2009, 13(2): 238-245.
- [7] 李真芳, 保铮, 杨凤凤. 基于成像的分布式卫星 SAR 系统地面运动目标检测(GMTI)及定位技术[J]. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2005, 35(6): 597-609.
- [8] Powell J T H. A Time Sidelobe Reduction Technique for Small Time-Bandwidth Chirp [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1974, 10(5): 390-392.
- [9] 杨斌, 武剑辉, 向敬成. 谱修正数字旁瓣抑制滤波器设计[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(9): 90-94.
- [10] 雷鹏正. 机载 Scan-GMTI 技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009: 56-58.
- [11] Ahmed I. Study of the Local Backprojection Algorithm for Image Formation in Ultra Wideband Synthetic Aperture Radar [D]. Sweden, Bleking Institute of Technology, 2008: 31-41.
- [12] Ulander L, Hellsten H, Stenström G. Synthetic Aperture Radar Processing Using Fast Factorized Back-Projection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 760-775.
- [13] 周红, 娄军, 黄晓涛, 等. 基于子孔径图像的低频 SAR 多通道均衡方法[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(4): 78-83.