

多载频星载 MIMO-SAR 系统动目标检测技术研究

齐维孔^{①②} 禹卫东^①

^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)

摘要: 该文研究多载频星载 MIMO-SAR 系统动目标检测技术。针对多载频星载 MIMO-SAR 的特点, 使用子空间投影的空频自适应处理抑制杂波, 并提出一种双门限恒虚警检测器。双门限恒虚警检测器主要思想是各载频对应的回波信号通过 SFAP 杂波抑制后, 使用剔除平均恒虚警检测动目标, 得到各载频对应的检测结果, 最后将检测结果使用二进制多次脉冲积累进行二次检测, 进一步提高检测概率。仿真结果表明, 空频自适应处理能有效抑制杂波; 同时双门限恒虚警检测器将有助于进一步提高多载频星载 MIMO-SAR 系统动目标检测性能。

关键词: 星载合成孔径雷达; 多发多收; 地面动目标检测; 空频自适应处理; 恒虚警率

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)10-2365-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01343

Research on Ground Moving Target Indication for Spaceborne MIMO-SAR of Multiple Carrier-frequencies

Qi Wei-kong^{①②} Yu Wei-dong^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Ground moving target indication for multiple carrier-frequencies spaceborne MIMO-SAR system is explored in this paper. According to the characteristics of multiple carrier-frequencies spaceborne MIMO-SAR, Space Frequency Adaptive Processing (SFAP) algorithm based on eigenspace projection is employed for suppressing clutter, and then the Double-Threshold Constant False Alarm Rate (DT-CFAR) is proposed for detecting moving targets. DT-CFAR, firstly, uses TM-CFAR to detect moving targets after the clutter corresponding to different carrier-frequencies is suppressed by SFAP, and then the detected result is through accumulating multiple pulses detector to improve detection probability and decrease false probability. Simulation results prove, farther, the validity and great performance of multiple carrier-frequencies spaceborne MIMO-SAR system for ground moving target indication.

Key words: Spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR); MIMO; Ground Moving Target Indication (GMTI); Space Frequency Adaptive Processing (SFAP); Constant False Alarm Rate (CFAR)

1 引言

星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)由于飞行高度高, 观测范围广, 其地面动目标检测(Ground Moving Target Indication, GMTI)模式无论在军事上还是在民用中都有着及其重要的应用价值。星载多发多收(Multiple Input Multiple Output, MIMO)SAR 系统使用多个孔径同时发射波形、多个孔径接收回波, 显著增大了地面信息获取能^[1,2]。但是由于发射正交编码波形的星载 MIMO-SAR 系统经过回波分离和距离压缩后, 距离模糊较大, 对成像质量影响严重, 甚至难以成像^[3-8]。鉴

于此, 本文主要研究了多载频星载 MIMO-SAR 系统动目标检测技术。使用多载频星载 MIMO-SAR 动目标检测的主要优点有: (1)利用多载频可以有效地解速度模糊, 提高动目标速度检测范围; (2)对每个载频的回波信号分别进行剔除平均 TM-CFAR 检测后, 充分利用各载频的检测结果, 再使用多次积累 CFAR 检测器进行动目标检测, 提高动目标检测概率; (3)多载频星载 MIMO-SAR 系统还可以利用子带合成处理实现距离向高分辨率, 方位向多通道实现方位向高分辨率, 从而在低分辨率实现动目标检测的同时, 得到高分辨率的场景图像, 并最终将动目标标注在高分辨率的 SAR 图像上, 同时实现动目标检测和高分辨率成像。

在多载频星载 MIMO-SAR 动目标检测系统中,

最核心的两个关键技术是空时自适应处理杂波抑制和恒虚警检测。因此本文针对多载频星载 MIMO-SAR 系统工作模式的特点,在研究多载频星载 MIMO-SAR 动目标检测系统的基础上,研究了适用于多载频星载 MIMO-SAR 动目标检测的空频自适应处理算法和双门限 CFAR 检测器。

2 多载频星载 MIMO-SAR 系统模型分析

以地面坐标系(X - Y - Z)为参考坐标系,不考虑地球自转,多载频星载 MIMO-SAR 几何关系示意图如图 1 所示(为了叙述方便,以 3 发 3 收为例进行分析)。

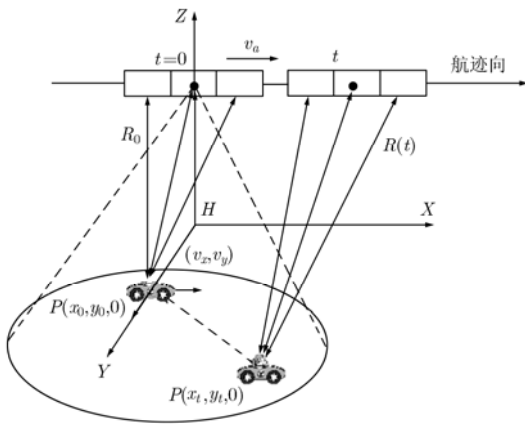


图 1 多载频星载 MIMO-SAR 几何关系示意图

假设星载 MIMO-SAR 为正侧视工作模式,高度为 H ,沿 X 轴方向飞行,飞行速度为 v_a ,距离向为 Y 轴方向,高度向为 Z 轴方向。在时间 $t=0$ 时天线中心经过坐标 $(0,0,H)$ 处,天线沿飞行方向分割为间距为 d 的 3 个子孔径,分别发射波长为 λ_1, λ_2 和 λ_3 的线性调频信号,第 k 个孔径发射信号为

$$s_k(t, \tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_{ck}t + \frac{1}{2}K_r\tau^2\right)\right), \quad k = 1, 2, 3 \quad (1)$$

其中 τ 为快时间, T_p 为发射脉冲宽度, f_{ck} 为第 k 个孔径发射信号频率, K_r 为调频斜率。

地面有一运动点目标,在时间 $t=0$ 时位于 $(x_0, y_0, 0)$ 。该动目标径向速度为 v_y ,切向速度为 v_x (忽略加速度的影响),经过时间 t 后,该动目标位于 $P(x_t, y_t, 0)$ 处,忽略二阶以上高次项,第 k 个发射孔径到目标的距离近似为 $R_{sk}(t)$ 。

$$R_{sk}(t) \approx R_0 + \left(\frac{x_0 - (k-2)d}{R_0}(v_x - v_a) + \frac{y_0 v_y}{R_0}\right)t + \frac{1}{2R_0}\left(v_a^2 + v_x^2 - 2v_a v_x + v_y^2\left(1 - \frac{y_0^2}{R_0^2}\right)\right)t^2 \quad (2)$$

经过地面反射后,目标到第 n 个接收孔径的距离近似为 $R_{rn}(t)$ 。

$$R_{rn}(t) \approx R_0 + \left(\frac{x_0 - (n-2)d}{R_0}(v_x - v_a) + \frac{y_0 v_y}{R_0}\right)t + \frac{1}{2R_0}\left(v_a^2 + v_x^2 - 2v_a v_x + v_y^2\left(1 - \frac{y_0^2}{R_0^2}\right)\right)t^2 \quad (3)$$

根据式(2)和式(3),运动目标回波经带通滤波后,第 k 个载频对应的基带信号为

$$s_{kn}(t, \tau) = \sigma_0 \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_p}\right) \exp\left(j\pi K_r(\tau - (R_{sk} + R_{rn})/c)^2\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda_k}R_0\right) \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi d}{\lambda_k}\frac{(k-2) + (n-2)}{R_0}(v_x - v_a)t\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda_k}\left(\frac{x_0}{R_0}(v_x - v_a) + \frac{y_0 v_y}{R_0}\right)t\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda_k}\left(v_a^2 + v_x^2 - 2v_a v_x + v_y^2\left(1 - \frac{y_0^2}{R_0^2}\right)\right)\right] \cdot \frac{1}{2R_0}t^2 \quad (4)$$

其中 $k = 1, 2, 3; n = 1, 2, 3$ 。

由式(4)和等效相位中心原理^[6],当多载频星载 MIMO-SAR 系统天线由 M 个发射孔径和 N 个接收孔径组成时,回波经过带通滤波器分离后,每个载频对应的回波信号都有 N 个等效相位中心,如图 2 所示。

图 2 中, M 发 N 收的多载频星载 MIMO-SAR 系统,可以等效为 M 个 1 发 N 收的星载 SIMO-SAR 系统,只是每个系统发射信号频率有所不同,因此对多载频星载 MIMO-SAR 系统的处理可以借用传统星载 SIMO-SAR 系统处理方式,同时结合其自身优势,获取更多信息。本文所研究的多载频星载 MIMO-SAR 动目标检测处理框图如图 3 所示。

图 3 中,处理框图主要由以下几部分组成:接收机前端处理、分离相位中心信号、各等效相位中心预处理、SFAP 算法杂波抑制和双门限 CFAR 检测器。

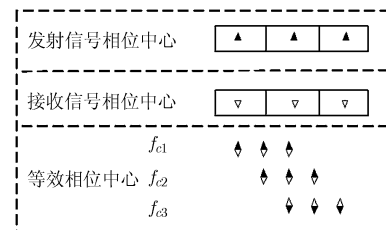


图 2 多载频星载 MIMO-SAR 系统等效相位中心

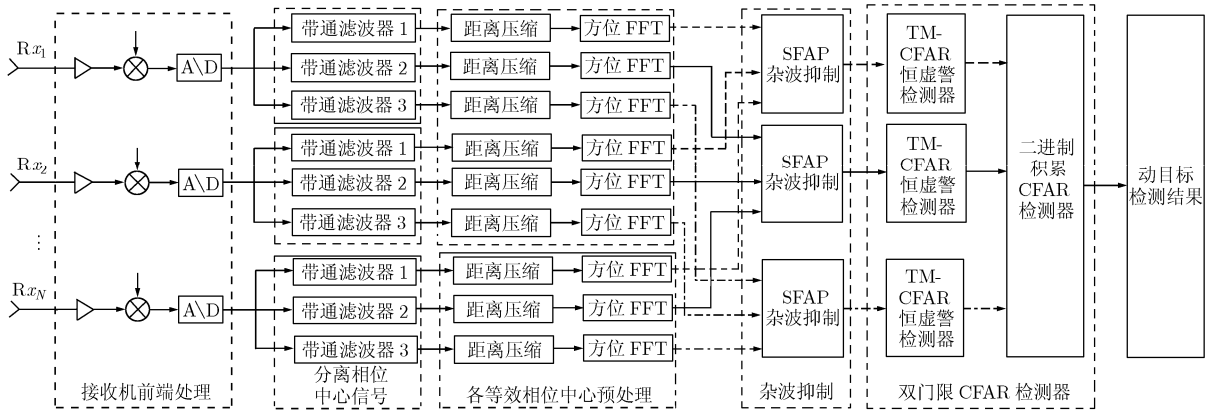


图 3 多载频星载 MIMO-SAR 动目标检测处理框图

3 空频自适应处理抑制杂波

随着 STAP 理论和 SAR 技术的发展, STAP 技术不断被应用到 SAR 动目标检测中,从公开发表的文献[9-14]来看, STAP 技术已成功应用于机载 SAR,并取得了较好的动目标检测性能。比如德国 FGAN 多通道 SAR 试验系统“ AER-II”以及 PAMIR-SAR 雷达系统,均采用 STAP 技术抑制杂波,表明 STAP 技术与 SAR 的结合能够实用化^[9-14]。空频自适应处理(SFAP)技术是 STAP 技术的频域形式,对多通道的星载 SAR 系统是一种比较理想抑制杂波技术。多通道星载 SAR 利用 SFAP 技术抑制杂波,完成动目标检测处理的流程图如图 4 所示。

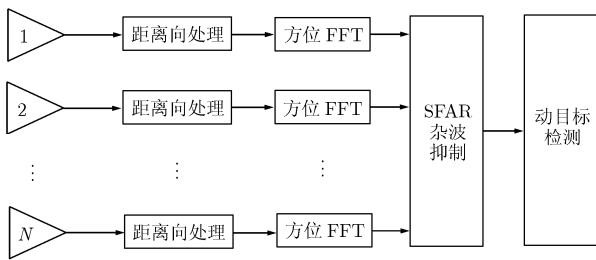


图 4 多通道星载 SAR 系统动目标检测处理流程图

图 4 中,首先将 N 个通道的回波信号进行距离向处理,包括距离压缩和距离徙动校正等,再方位 FFT 变换到距离多普勒域,最后使用 SFAP 算法抑制杂波。

STAP 算法具有将杂波电平抑制到噪声电平的优点。对谱密度矩阵进行特征值分解,有一个比较大的特征值,该特征值与其他特征值和的差别决定了杂波抑制的性能,差别越大,杂波抑制效果越明显;反之,杂波抑制效果差。根据第 5 节的仿真参数,使用基于子空间投影的 SFAP 算法时,谱密度

矩阵特征值随多普勒频率的分布如图 5 所示。

由图 5 中特征值随多普勒频率的变化曲线,可知在地面杂波所占据的多普勒频率范围内,谱密度协方差矩阵的最大特征值对应杂波信号,其他两个较小的特征值对应噪声加动目标信号。杂波抑制性能可以通过比较最大特征值与其余特征值之和的比值来估计。在多普勒带宽内,杂波抑制性能基本保持在 16 dB 左右,而在多普勒带宽外,杂波抑制性能有所下降,因为在该部分,杂波能量很小。

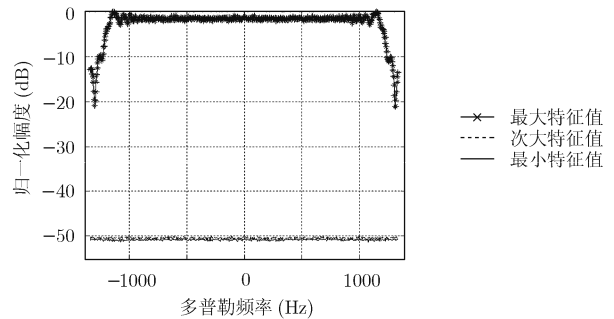


图 5 估计的谱密度矩阵特征值随多普勒频率的分布

4 双门限 CFAR 检测器

此处的双门限检测实质是单门限 CFAR 检测器的级联,其主要思想是各载频对应的回波信号通过 SFAP 杂波抑制后,使用剔除平均(TM)CFAR 检测动目标,得到各载频对应的检测结果,将检测结果使用二进制多次脉冲积累进行二次 CFAR 检测,进一步提高检测概率,降低虚警概率。基于 TM-CFAR 检测的双门限 CFAR 检测器处理框图如图 6 所示。

图 6 中,以 3 发 3 收的多载频星载 MIMO-SAR 系统为例,3 个发射通道发射不同载频的信号,接收信号经过回波分离,得到不同载频对应的回波信号。将各回波信号进行杂波抑制,对杂波抑制后的

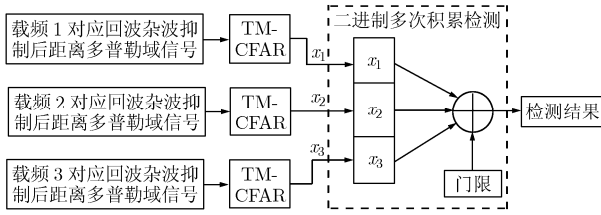


图 6 基于 TM-CFAR 检测的双门限 CFAR 检测器处理框图

数据首先使用 TM-CFAR 检测器检测动目标，检测结果分别为

$$x_i(n) \in \{0,1\}, i = 1,2,3 \quad (5)$$

$x_i(n) = 1$ 表示在第 n 个距离门处有动目标存在， $x_i(n) = 0$ 表示在第 n 个距离门处无动目标存在。对前级 TM-CFAR 检测器的检测结果使用二进制多次积累检测器进行多次脉冲积累检测。有关 TM-CFAR 检测器的实现框图可参考文献[15]。

对于滑窗式二进制多次积累 CFAR 检测器，其处理框图如下图 7 所示。

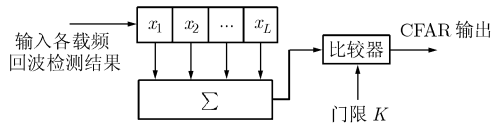


图 7 滑窗式二进制多次积累 CFAR 检测器处理框图

前级 TM-CFAR 的检测结果，输入到长度为 L 的延迟线，作滑窗式二进制多次积累，得到最终检测结果。当滑窗的长度为 L ，检测门限为 K 时，只有 L 次脉冲积累中目标出现次数大于或等于 K 时，才能判决目标存在。假设前级 TM-CFAR 虚警概率为 P_{fa} ，检测概率为 P_d ，那么多次积累 CFAR 检测器的检测概率 P_D 和虚警概率 P_{FA} 分别为

$$P_D = \sum_{i=K}^L C_L^i P_d^i (1 - P_d)^{L-i} \quad (6)$$

$$P_{FA} = \sum_{i=K}^L C_L^i P_{fa}^i (1 - P_{fa})^{L-i} \quad (7)$$

式(6)和式(7)表明，多次积累检测器的检测性能只与 P_{fa} ， P_d ， K 和 L 有关，在 P_{fa} ， P_d 和滑窗长度 L 一定的情况下，从给定的虚警概率 P_{FA} ，就可以由式(7)确定检测门限 K 。根据检测门限 K ，由式(6)即可计算出最终的检测概率 P_D 。图 8 为 3 发 3 收多载频星载 MIMO-SAR 系统使用双门限 CFAR 检测器性能与星载 SIMO-SAR 系统使用单门限 TM-CFAR 检测器性能的比较，其中 TM-CFAR 检测器的参考单元均为 32，剔除最大值个数为 2，剔除最小值个数为 2，多次积累检测器的滑窗长度为 3，检测门限为 2，虚警概率均要求 10^{-6} 。

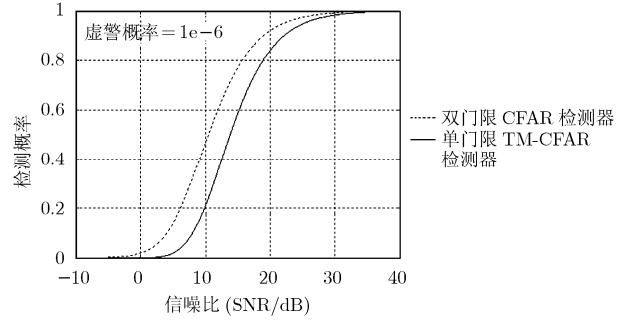


图 8 单门限 TM-CFAR 检测器和双门限 CFAR 检测器检测概率随信噪比变化曲线

图 8 中可见，在信噪比 SNR 较低(小于 0 dB 左右)和较高(大于 35 dB 左右)时，双门限 CFAR 检测器和 TM-CFAR 检测器性能接近，主要是因为 SNR 较低时，检测概率均接近于 0；而 SNR 较高时，检测概率均接近于 1。但是当信噪比在 $[0,35]$ dB 之间时，双门限 CFAR 的检测概率要高于 TM-CFAR。SNR = 15 dB 时，双门限检测概率为 0.78，单门限检测概率为 0.58，可见在相同的 SNR 下，双门限检测器的检测概率明显提高。当达到相同的检测概率 $P_D = 0.8$ 时，双门限检测器需要的最小信噪比为 15.68 dB，单门限检测器需要的最小信噪比为 18.92 dB，可见相比单门限检测器，双门限检测器更有利于对弱目标的检测。

5 杂波抑制仿真结果与分析

5.1 仿真参数

假设系统为 3 发 3 收 MIMO-SAR，发射线性调频信号，仿真参数如表 1 所示。假设信杂比 SCR=5 dB，杂噪比 CNR=10 dB，地面上不同位置处有 3 个动目标，动目标位置参数和速度参数如表 2 所示。地面杂波分布如图 9，由于 SCR 比较低，目标被掩盖在杂波中。

表 1 仿真参数

卫星高度	240 km	卫星速度	7755.5 m/s
波束中心视角	36.08°	载频 1	9.5 GHz
载频 2	9.55 GHz	载频 3	9.45 GHz
斜距分辨率	3.5 m	方位分辨率	3.5 m
信号带宽	42.86 MHz	脉冲重复频率	2750 Hz
方位向发射子孔径数目	3	方位向接收子孔径数目	3
方位向子孔径长度	5 m	方位向天线总长度	15 m

表 2 动目标位置参数

目标标号	坐标(m)	径向速度(m/s)	切向速度(m/s)
P_1	(0, 0, 0)	5	5
P_2	(50, 50, 0)	6	6
P_3	(-50, -50, 0)	7	7

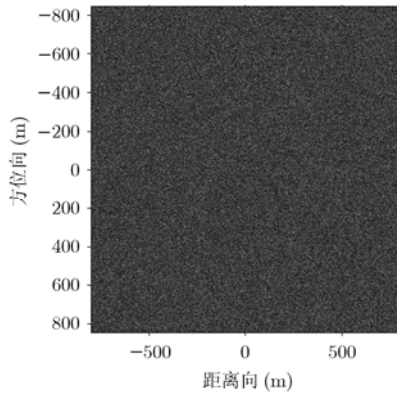


图 9 地面杂波分布

5.2 杂波抑制结果

取出载频 9.5 GHz 所对应的 3 通道信号, 对包含地面杂波和动目标的回波信号, 进行距离压缩和距离徙动校正, 变换到距离多普勒域, 然后使用基于子空间投影 SFAP 算法抑制杂波。杂波抑制前和杂波抑制后的距离-多普勒域信号如图 10 所示。

图 10(a)中, 杂波抑制前距离-多普勒域信号分布在整个平面, 难以判断出动目标信号所在位置。

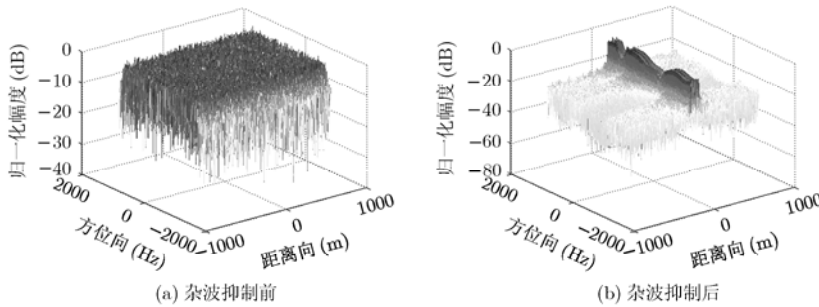


图 10 杂波抑制前和杂波抑制后距离-多普勒域信号比较图

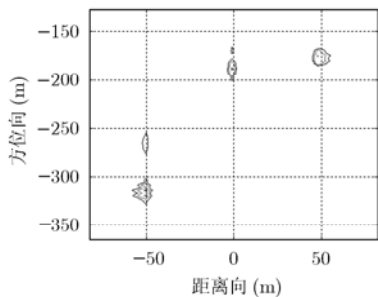


图 12 使用静止目标参考函数压缩结果

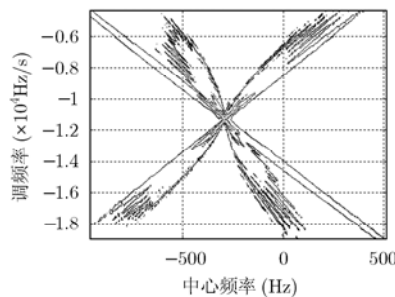


图 13 杂波抑制后距离向位置为 0 m 处 MDCFT 时频分析

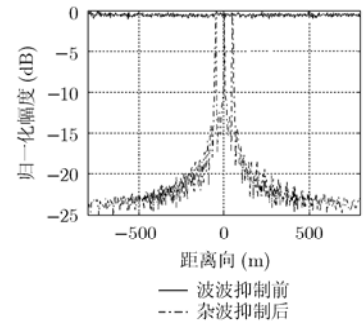


图 11 沿多普勒频谱求和比较图

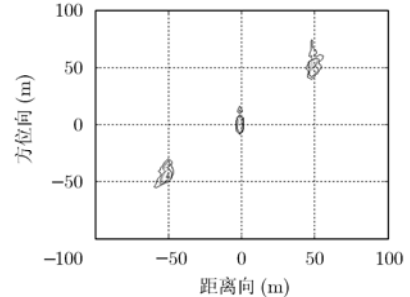


图 14 动目标信号聚焦结果

但是杂波抑制后, 图 10(b)中信号在某些距离门处有明显较大值。为了更加有效检测动目标, 对每个距离门沿多普勒频谱求和, 得到的 1 维图如图 11 所示。

图 11 中可以清楚地看出杂波抑制前, 动目标信号频谱被掩盖在杂波中, 难以检测出动目标所在距离向位置; 杂波抑制后, 动目标所在距离位置出现峰值, 此时就能有效地检测出动目标所在距离位置。杂波抑制后, 如果使用静止目标参考函数对其进行方位压缩, 得到成像结果如图 12 所示。图 12 中, 动目标所在距离向位置基本正确, 但是由于目标存在径向速度, 导致方位向位置偏移; 由于存在切向速度, 导致目标没有完全聚焦, 出现散焦。

为了对动目标参数估计和定位, 对动目标所在距离门信号做频谱分析, 取出杂波抑制后动目标所在距离门信号, 这里以距离向位置为 0m 处的信号为例。由仿真参数可知, 在该距离门处有 1 个动目标信号, 对杂波使用修正的离散 Chirp-Fourier 变换 (Modified Discrete Chirp-Fourier Transform, MDCFT) 做时频分析^[16], 得到图 13 的时频信号。

由图 13 可见, 有一个明显的峰值点, 根据峰值点位置估计出运动目标多普勒中心频率和多普勒调频斜率分别为 -292.52 Hz 和 -11331 Hz/s, 进而估计出动目标参数。对杂波抑制后的信号, 每个距离单元均使用 MDCFT 做时频分析, 估计出每条距离线上的多普勒中心频率和多普勒调频斜率, 然后使用相对应的方位向匹配函数进行方位压缩, 得到动目标聚焦后的信号如图 14。3 个动目标信号均较好地聚

焦在真实位置,但是由于 MDCFT 对多普勒调频斜率的估计误差,以及剩余杂波和噪声的影响,动目标信号存在一定程度的散焦。

6 结束语

本文针对多载频星载 MIMO-SAR 系统所具有的特点,研究了多载频星载 MIMO-SAR 动目标检测技术,对其中的关键技术 STAP 杂波抑制和 CFAR 检测器进行了研究。主要使用子空间投影的空频自适应处理抑制杂波,并提出一种双门限恒虚警检测器,即由 TM-CFAR 检测器和多次积累 CFAR 检测器级联组成,对杂波抑制后的信号进行动目标检测。同时本文进行了分布目标场景仿真试验,场景中的动目标能较好地检测出并聚焦在真实位置。本文的研究对星载 MIMO-SAR 的总体设计和动目标检测模式设计提供了一定的参考价值。

参考文献

- [1] Wang W Q. Application of MIMO technique for aerospace remote sensing [C]. Aerospace Conference, Big Sky, Montana, 2007, 3(10): 1-10.
 - [2] Wang W Q, Peng Q C, and Cai J Y. Novel MIMO SAR for urban remote sensing applications [C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, 2008, Vol. XXXVII: 139-144.
 - [3] 戴喜增. MIMO 雷达分集检测和宽带合成的理论与方法研究 [D]. [博士论文], 清华大学, 2008.
 - [4] 井伟, 武其松, 邢孟道, 保铮. 多子带并发的 MIMO-SAR 高分辨大测绘带成像 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4373-4378.
Jing W, Wu Q S, Xing M D, and Bao Z. Image formation of ide-swath high resolution MIMO-SAR. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(16): 4373-4378.
 - [5] 武其松, 井伟, 邢孟道, 保铮. MIMO-SAR 大测绘带成像 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 772-775.
Wu Q S, Jing W, Xing M D, and Bao Z. Wide swath imaging with MIMO-SAR. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 772-775.
 - [6] 宋岳鹏. 多收发孔径合成孔径雷达系统技术研究 [D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2008.
 - [7] Gong M, Wang X M, and Huang S J. Performance improvements in MIMO-SAR [C]. Radar Conference 2008, Rome, 2008: 1-3.
 - [8] Krieger G, Gebert N, and Moreira N. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46 (1): 31-46.
 - [9] Ender J H G and Brenner A R. PAMIR: A wideband phased array SAR MTI system [J]. *IEE Proceeding-F Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 162-172.
 - [10] Ender J H G, Berens P, and Brenner A R, et al. Multi channel SAR/MTI system development at FGAN: from AER to Pamir [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, Canada, 2002, 3: 1697-1701.
 - [11] Klemm R. Introduction to space-time adaptive processing [J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(1): 5-12.
 - [12] Ender J H G. Space-time adaptive processing for synthetic aperture radar [C]. IEE Colloquium, London, 1998: 611-618.
 - [13] Reed I S, Mallet J D, and Brennan L E. Rapid Convergence Rates in Adaptive Arrays [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1974, 10(6): 853-863.
 - [14] Klemm R. Interrelated problems in space-time adaptive processing for SAR and ISAR [J]. *IEE Proceeding-F Radar, Sonar and Navigation*, 1998, 145(5): 297-302.
 - [15] Gandhi P P and Kassam S A. Analysis of CFAR processors in non-homogeneous backgrounds [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1998, 24(4): 427-445.
 - [16] 黄瑶. 机载 SAR 地面运动目标检测成像技术研究. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2007.
- 齐维孔: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为新体制星载合成孔径雷达系统设计和信号处理。
禹卫东: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载和机载合成孔径雷达信号处理。