

基于自聚焦的变门限 SAR/GMTI 动目标检测方法

陈格格 朱岱寅 吴迪 毛新华

(南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京, 210016)

摘要: 高分辨率合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)合成孔径时间长导致动目标散焦严重、信杂噪比(Signal clutter noise ratio, SCNR)降低, 增加了对动目标的检测难度。针对这种情况, 本文提出了一种基于自聚焦的变门限 SAR/(Ground moving target indication, GMTI)动目标检测算法。该算法利用距离相位误差和方位相位误差之间存在的固定关系实现对动目标的两维相位误差的估计与补偿, 达到提高 SCNR 的目的。通过两级不同门限的恒虚警率(Constant false alarm rate, CFAR)检测分别实现动目标检测和排除虚警。实测数据结果表明, 本文算法能有效地检测动目标, 降低虚警概率。

关键词: 合成孔径雷达; 地面动目标指示; 自聚焦; 恒虚警检测

中图分类号: TN958.2 **文献标志码:** A

SAR/GMTI Moving Target Detection Algorithm Based on Autofocus and Variable Threshold CFAR Detection

Chen Gege, Zhu Daiyin, Wu Di, Mao Xinhua

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The defocusing of moving target and the reduction of signal clutter noise ratio (SCNR) caused by long coherent time in high-resolution SAR lead to increasing difficulty of moving target detection. In view of this situation, we propose an SAR/GMTI moving target detection algorithm based on autofocus and variable threshold constant false alarm rate(CFAR) detection. To increase SCNR of moving targets, this algorithm makes use of the fixed relationship between range phase error and azimuth phase error to estimate and compensate two-dimensional phase error of moving target. CFAR detection with different thresholds is also realized to detect moving target and exclude the false alarm, respectively. Experimental results verify the feasibility of this algorithm that it can detect moving target and reduce false alarm ratio sufficiently.

Key words: synthetic aperture radar(SAR); ground moving target indication; autofocus; constant false alarm detection

引 言

多通道合成孔径雷达地面动目标指示(Synthetic aperture radar/Ground moving target indication,

SAR/GMTI系统^[1]能够在对目标区域进行成像的同时实现对地面动目标的检测、测速和定位,具有很高的军事及民用价值。目前,多通道 SAR 系统常用的动目标检测方法主要包括:偏置相位中心天线(Displaced phase center antenna, DPCA)技术、沿航迹干涉(Along-track interferometry, ATI)技术以及空时自适应处理(Space time adaptive processing, STAP)技术等。DPCA 技术在载机飞行航迹上放置两个或两个以上的接收相位中心,通过相位中心的移位抑制杂波谱展宽,扩大动目标多普勒检测区域,实现对慢速目标的检测^[2]。ATI 技术将两通道的 SAR 复图像共轭相乘得到干涉 SAR 复图像,利用干涉相位与动目标径向速度近似成正比的关系实现对动目标的检测^[3]。STAP 技术同时结合了接收波束成形和目标多普勒滤波,通过空、时两维滤波抑制主瓣杂波及旁瓣杂波获得对慢速、微弱目标的检测效果^[4]。随着 SAR/GMTI 技术的发展,在经典检测方法的基础上,相继衍生出新的检测方法。如近年来提出的 EDPCA(Extended DPCA)技术^[2]和 ISTAP(Imaging STAP)技术^[5],解决了距离徙动导致动目标只有部分脉冲参与相干积累的问题及动目标沿航迹速度分量导致的散焦问题。对于任何一种动目标检测方法,信杂噪比(Signal clutter noise ratio, SCNR)都是决定检测及估计性能的关键因素之一。

随着当代各种军事、民用设施的不断升级,人们对 SAR 系统功能的需求日益提高, SAR/GMTI 应不局限于发现、跟踪目标,应同时具备对目标的识别能力,这就对 SAR/GMTI 系统分辨率的进一步提升提出了要求。经过几十年的发展, SAR 系统的分辨率从最初的几十米逐渐提升至 1 m 以下,德国 FGAN 开发的 PAMIR 系统已经可以实现 0.1 m 的分辨率。现有的方法一般通过增大方位积累角和加长合成孔径时间来提高系统方位向分辨率,通过提升发射信号的带宽来提高系统距离向分辨率^[6,7]。众所周知, SAR 成像过程中,运动补偿、匹配滤波器设计等步骤均对地面静止目标进行,能够使地面静止场景完全聚焦。而 GMTI 过程面对的地面动目标均为非配合目标,在成像过程中其运动状态未知,因此,与静止目标相比,动目标在 SAR 图像中往往存在不同程度的散焦现象。在分辨率进一步提高的情况下,动目标散焦现象更为严重,直接导致其在图像中的 SCNR 下降。

针对这种情况,本文提出了一种基于动目标自聚焦的变门限恒虚警率(Constant false alarm rate, CFAR)检测方法,有效地改善了动目标散焦引起的 SCNR 下降、检测性能降低问题。该方法从杂波对消后的 SAR 图像入手,通过 CFAR 检测-动目标分块自聚焦-CFAR 检测实现对动目标的报警。在第 1 次 CFAR 检测中,检测门限设置较低,以增加虚警概率的代价换取多数的动目标通过该次检测。随后,对每一个通过检测门限目标所在的子图像进行自聚焦处理。聚焦处理后,再次对每一个目标进行 CFAR 检测,此次检测的门限设置较高,一般依据最终系统所需虚警概率设定。由于动目标经自聚焦后距离徙动和方位散焦均得到明显改善, SCNR 显著提升,而虚警目标(多数为强杂波点)经自聚焦后图像未有明显变化,故此步骤将因第一次检测门限较低引入的多数虚警点剔除。该方法相比于传统的单次检测方案,能够明显改善由于动目标散焦引起的检测性能下降问题,特别适用于高分辨率 SAR/GMTI 系统。本文通过仿真实验和三通道 SAR 实测数据处理结果对上述方法进行了验证。

1 动目标散焦对检测的影响

从信号处理角度上看, SAR 成像本质上是二维匹配滤波的过程,其中匹配滤波器参数的设置由雷达系统参数及平台运动参数决定。由于现有 SAR 成像算法最终目的为获取地面静止场景二维高分辨图像,故成像处理中运动补偿、方位匹配滤波等步骤均对地面静止点进行。由于自身运动,地面动目标信号的相位历史与同一位置静止目标存在差异,这直接导致了动目标在成像图中的方位位置偏移及散焦^[8]。其中,当分辨率较高时目标散焦现象尤为显著,表现为由残余距离徙动及方位相位误差引起的距离、方位二维散焦。图 1(a)给出了某型三通道 X 波段机载雷达实测数据 SAR 图像中杂波对消后的动目标二维图像,从图 1 中可以看出,方位向散焦严重且距离向存在横跨多个单元的弯曲。对同一个目标而言,其在合成孔径时间内由雷达接收到的能量一定,故当其在 SAR 图像中发生散焦时,能量会分散于

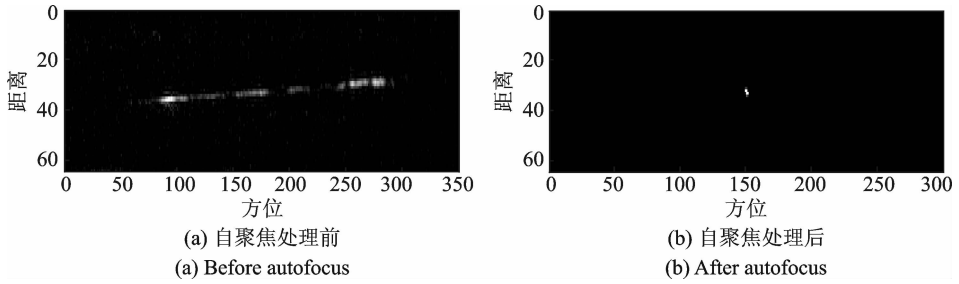


图1 杂波对消后的动目标图像

Fig.1 Images of ground moving target after clutter suppression

多个像素单元内,对于每个像素单元,动目标的 SCNR 较低。而 SCNR 几乎是所有多通道 SAR 动目标检测算法的关键性能指数之一,因此目标散焦的出现将会直接影响后续的检测性能。

除了会导致动目标的 SCNR 降低之外,当采用一些自适应门限检测算法时,目标散焦现象会进一步影响检测性能。如在很多情况下,经过目标对消或抑制处理后,常利用单元平均 CFAR (Cell averaging constant false alarm rate, CA-CFAR) 检测的方法实现对动目标的检测。该方法通过比较图像每个待检测单元的幅度是否超过检测门限来判断动目标是否存在,在给定虚警率的条件下,每个待检测单元的门限由周围单元训练样本估计所得^[9]。在估计的过程中,为了防止目标自身的相消,与待检测单元紧邻的像素单元并不作为训练样本,此即为保护单元。图 2 给出了 CA-CFAR 检测过程中,训练样本单元、保护单元以及待检测单元的示意图。由图 2 可知,当动目标在图像中发生散焦时,由于不同目标在图像中扩散的范围不同,故保护单元范围的设置即成为 CA-CFAR 检测方法中难以抉择的一个问题。动目标由于散焦导致能量分散, SCNR 降低,往往在方位及距离向占多个单元。在对待检测目标单元进行判决时,训练样本中存在的其他目标单元会抬高判决门限,使检测概率降低。为了改善这一问题,可以对待检测图像做自聚焦处理,图 1(a) 中的动目标经自聚焦后如图 1(b) 所示,模糊单元大幅减少。对自聚焦前后的动目标作方位向剖面图,见图 3(其中虚线表示 CA-CFAR 检测门限,实线表示动目标能量)。从图 1 可以看出,在相同的虚警概率条件下,自聚焦后动目标的 SCNR 增大且其与检测门限的幅度差明显高于自聚焦前。由此可见,改善动目标的散焦情况将有助于提升动目标检测算法的性能。

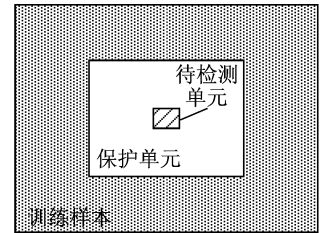


图2 单元平均 CFAR (CA-CFAR) 检测示意图

Fig.2 Sketch of CA-CFAR detection

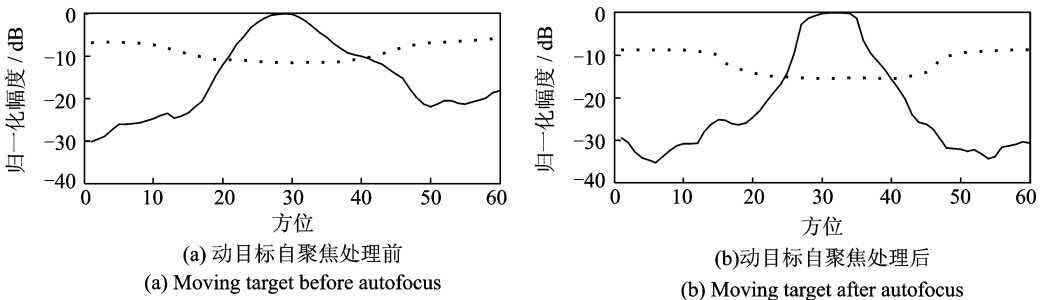


图3 CA-CFAR 检测门限与动目标能量方位向剖面图

Fig.3 CA-CFAR detection threshold and profile along azimuth of power of moving target

2 动目标检测方法

针对上文提到的高分辨率 SAR 图像中动目标散焦严重导致检测性能降低的情况,本文提出了一种基于动目标自聚焦的变门限 SAR/GMTI 动目标检测算法,该算法流程如图 4 所示。首先对等间隔排列的天线接收到的回波数据进行通道误差校正^[10],消除各通道之间存在的固定增益误差和相位失配误差。随后对各通道回波数据进行 SAR 成像,并做杂波抑制处理。本文在实测数据处理中采用了自适应杂波抑制干涉(Adaptive clutter suppression interferometry, ACSID)技术^[11],利用相邻像素单元信号估计该像素单元的空域对消系数。对于处于同一像素单元的动目标和杂波信号,两通道的杂波分量的相位误差一定,可以实现完全对消,而动目标由于径向速度引入了附加的多普勒频率,不能完全对消,能量得以保留。经该步骤处理,提高了输出图像的 SCNR,有利于后续的 CFAR 检测。杂波对消后,对图像做 CA-CFAR 检测。此次检测设置的门限较低,以确保绝大多数动目标通过检测。但与此同时,一些对消不完全的强杂波由于能量强于周围环境,被误判为动目标,造成虚警。下面将通过后续处理排除由低检测门限引入的虚警。

由第 1 节分析可知,减少动目标模糊单元可以有效提升 CA-CFAR 检测的性能。本文算法对每个通过第 1 次检测门限的目标单独进行自聚焦处理,从而实现动目标 SCNR 的提升。即首先根据 CA-CFAR 检测结果,在对消图中提取通过检测门限目标所在的区域的子图像,将子图像返回数据域,随后采用相位梯度自聚焦(Phase gradient autofocus, PGA)算法对动目标的方位相位误差进行估计。由于动目标的两维相位误差与方位相位误差之间存在一定的关系,根据此关系可以推算出两维相位误差,对散焦目标图像进行相位补偿,实现二维自聚焦。而由强杂波剩余导致的虚警目标由于已经得到良好聚焦,故经此步骤处理后无明显变化。在此条件下,提高检测门限对聚焦后的图像进行第 2 次 CA-CFAR 检测,能有效地排除大部分虚警目标,得到较为准确的检测结果。

3 动目标自聚焦

3.1 SAR 回波信号模型

在 SAR 图像中,动目标散焦不仅表现为方位向散焦还表现为距离向模糊,该现象由两维相位误差导致。为了通过自聚焦减少动目标模糊单元,提升 SCNR,本文通过分析 SAR 回波信号模型提出了一种一维估计两维补偿的动目标自聚焦算法。设载机匀速直线飞行,雷达发射一系列脉冲信号,假设地面存在一个运动点目标,目标回波信号经雷达接收解调后可以表示为

$$s(t_r, t_a) = Ap \left[t_r - \frac{2R(t_a)}{c} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} f_c R(t_a) \right] \quad (1)$$

式中: A 为回波信号幅度, t_r 为距离时间(快时间), t_a 为方位时间(慢时间), $R(t_a)$ 为目标到载机的瞬时距离, f_c 为载频, c 为光速。

对式(1)做距离向快速傅里叶变换(Fast Fourier transformation, FFT)可得

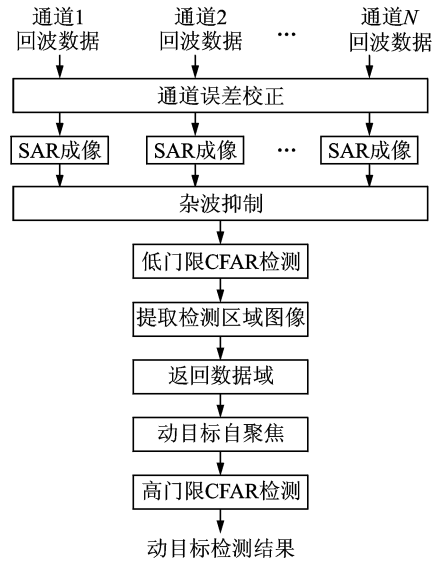


图 4 动目标检测算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the moving target detection algorithm

$$s(f_r, t_a) = Ap(f_r) \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) R(t_a) \right] \quad (2)$$

式中: f_r 为距离频率。此时提取相位信息可得

$$\theta(f_r, t_a) = -\frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) R(t_a) = \theta_1(f_r, t_a) + \theta_2(f_r, t_a) \quad (3)$$

式中

$$\theta_1(f_r, t_a) = -\frac{4\pi}{c} f_c R(t_a) \quad (4)$$

$$\theta_2(f_r, t_a) = -\frac{4\pi}{c} f_r R(t_a) \quad (5)$$

在 SAR 信号处理过程中,常规自聚焦方法可以对方位相位误差 $\theta_1(f_r, t_a)$ 进行估计和补偿,而对于距离相位误差 $\theta_2(f_r, t_a)$,瞬时距离 $R(t_a)$ 随方位向时间改变,由于动目标自身运动速度及运动轨迹未知,难以对其进行准确估计。如何估计两维相位误差 $\theta(f_r, t_a)$ 并补偿是本文的研究重点。

3.2 动目标自聚焦算法

本节将首先对 $\theta_2(f_r, t_a)$ 与 $\theta_1(f_r, t_a)$ 之间的关系进行研究,在此基础上提出动目标自聚焦算法,最终实现对两维相位误差的精确补偿。常规自聚焦方法(如子孔径相关算法^[12]、相位梯度自聚焦算法^[13])均只能估计二次及以上的相位误差,而动目标的一次相位误差导致的距离线性走动不可忽略,本文通过经典的 Keystone 变换法^[14] 去除其线性分量以获得更好的聚焦效果。Keystone 变换的核心步骤可表示为

$$t_a = \frac{f_c}{f_c + f_r} \tau \quad (6)$$

式(6)经 Keystone 变换后可得

$$\theta(f_r, \tau) = -4\pi \frac{f_c + f_r}{c} R \left(\frac{f_c}{f_c + f_r} \tau \right) \quad (7)$$

将式(7)对 $f_r = 0$ 进行泰勒展开有

$$\theta(f_r, \tau) = \frac{\theta(f_r, \tau)}{0!} + \frac{\partial \theta(f_r, \tau)}{\partial f_r} f_r + \frac{\partial^2 \theta(f_r, \tau)}{2!} f_r^2 + \dots \quad (8)$$

式中

$$\theta(f_r, \tau) \Big|_{f_r=0} = -\frac{4\pi}{c} f_c R(\tau) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta(f_r, \tau)}{\partial f_r} \Big|_{f_r=0} = -\frac{4\pi}{c} [R(\tau) - \tau R'(\tau)] \quad (10)$$

忽略较小的二阶及以上高次项分量,得

$$\theta(f_r, \tau) = -\frac{4\pi}{c} f_c R(\tau) - \frac{4\pi}{c} [R(\tau) - \tau R'(\tau)] f_r = \theta_1(f_r, \tau) + \theta_2(f_r, \tau) \quad (11)$$

式中

$$\theta_1(f_r, \tau) = -\frac{4\pi}{c} f_c R(\tau) \quad (12)$$

$$\theta_2(f_r, \tau) = -\frac{4\pi}{c} [R(\tau) - \tau R'(\tau)] f_r \quad (13)$$

式中: $\theta_1(f_r, \tau)$ 为方位相位误差, $\theta_2(f_r, \tau)$ 为距离相位误差。由式(12,13)可得出

$$\theta_2(f_r, \tau) = \frac{f_r}{f_c} [\theta_1(\tau) - \varpi'_1(\tau)] \quad (14)$$

距离相位误差并不是完全未知的,它和方位相位误差之间存在较为简单的数学关系。当方位相位误差已知时,可以准确地对距离相位误差进行估计,进而得到两维相位误差。基于这一思想,本文提出了动目标自聚焦算法,该算法流程如图5所示。

动目标自聚焦算法主要有以下步骤:

步骤1 距离向傅里叶变换及脉冲压缩。对雷达信号作距离向傅里叶变换,在距离多普勒域完成距离向匹配滤波。

步骤2 运动补偿。选定成像中心点,以天线接收中心瞬时位置到成像中心点的距离为参考距离,完成相对于成像参考点的相位补偿,修正由参考斜距瞬时变化引入的相位变化。

步骤3 Keystone变换。通过对 t_a 的线性插值去除雷达信号中PGA算法无法估计的线性分量。

步骤4 方位向傅里叶变换。将雷达信号变换到二维频域。

步骤5 降低图像距离分辨率。通过此步骤将距离徙动跨多个距离单元的动目标压缩至一个距离单元内来忽略距离单元徙动,以达到PGA算法的使用前提,提高估计结果的准确度。

步骤6 相位梯度自聚焦。这是动目标自聚焦算法的核心步骤。以降低距离分辨率的图像为样本对方位相位误差进行估计,由于距离相位误差和方位相位误差之间存在固定的关系,根据式(11)可以得到两维相位误差。

步骤7 二维频域相位误差补偿。根据步骤6估计所得的相位误差,在二维频域对原图像进行两维相位补偿。

步骤8 方位向傅里叶逆变换。将图像变换到方位时域,实现方位向聚焦,最终得到两维自聚焦成功的动目标图像。

3.3 仿真实验结果

本节将通过仿真实验对3.2节提出的动目标自聚焦算法进行验证。仿真实验主要参数如表1所示。仿真动目标切向速度 $v_a = 10$ m/s,径向速度 $v_r = 10$ m/s。

仿真动目标回波信号经距离向脉冲压缩的结果如图6(a)所示,受距离向速度的影响,动目标在距离向产生了横跨多个单元的弯曲。选定成像中心点,对动目标进行相位补偿,消除天线接收中心随随机运动带来的相位变化,其结果如图6(b)所示。对图像做Keystone变换后的结果如图6(c)所示,距离向线性走动被校正,仅存2次及以上相位导致的弯曲。降低图像距离分辨率并利用PGA算法估计方位向误差,两维相位误差补偿后距离徙动被完全校正,动目标在方位向表现为一条直线,如图6(d)所示。由于仿真设定的环境无杂波影响,方位压缩后,动目标被完全聚焦成一个点,如图6(f)所示。通过自聚焦处理前后的图像(图6(e),(f))对比可知,该算法能有效地实现动目标自聚焦。

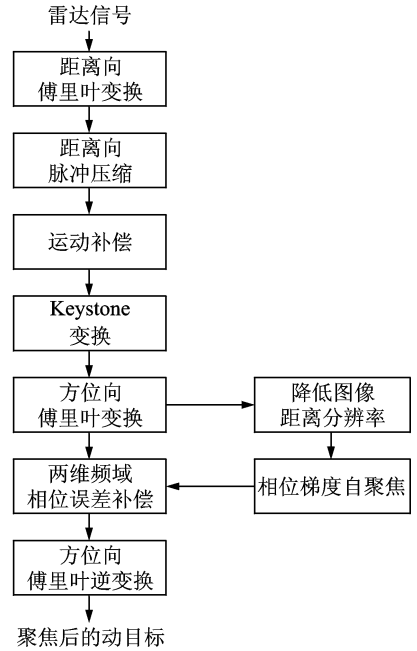


图5 动目标自聚焦算法流程图
Fig. 5 Flow chart of the moving target autofocus algorithm

表1 仿真实验参数

参数	参数值
载频/MHz	562.5
发射信号带宽/MHz	42
脉冲重复频率/Hz	1 000
相干处理脉冲数	16 384
载机飞行速度/(m · s ⁻¹)	131.5
载机高度/m	6 282
成像区域中心点距离/km	16

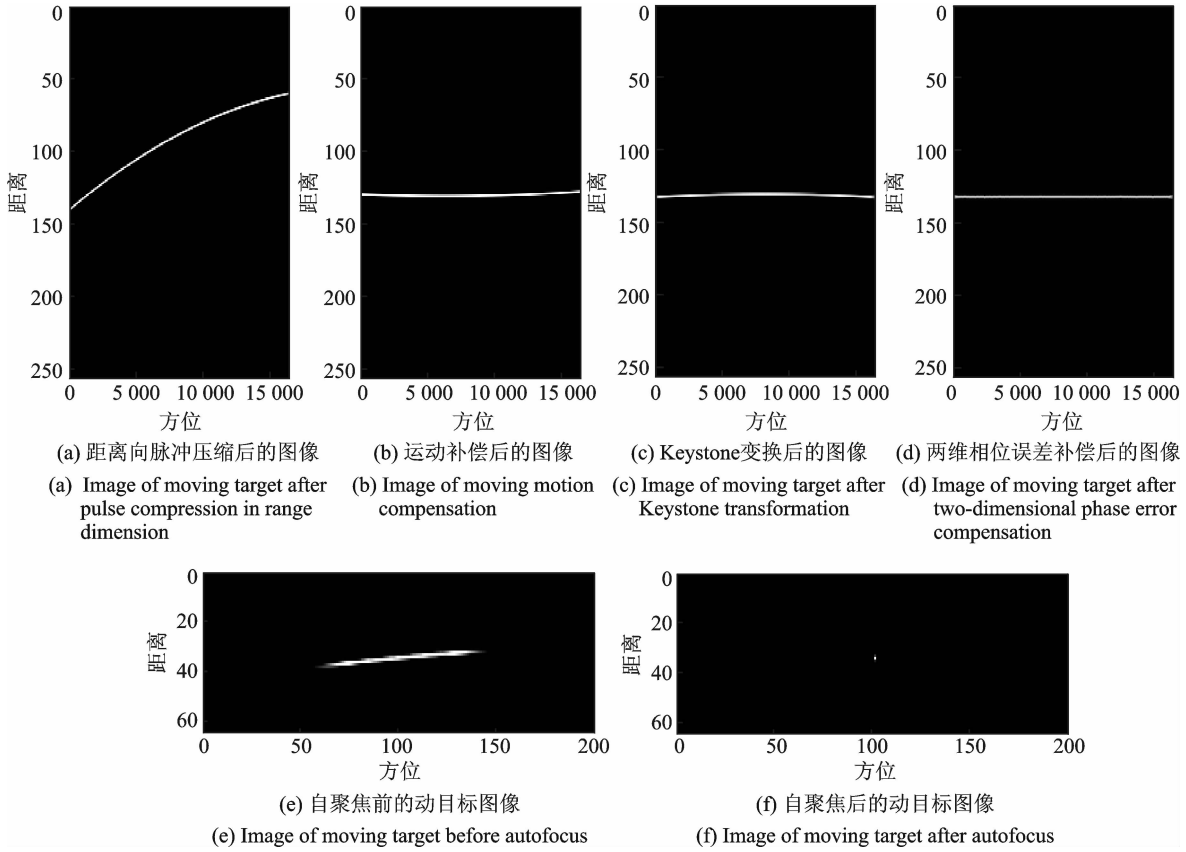


图 6 仿真动目标处理结果

Fig. 6 Processing results of simulated moving target

4 实测数据处理结果

为验证动目标检测算法的实际应用效果,本节将采用其对 1 组机载三通道 SAR 系统实测数据进行处理。表 2 给出了部分系统参数。图 7 为地面目标区域的 SAR 成像结果图,由于 3 个通道得到的 SAR 图像基本相似,本节只给出中心通道的图像。经杂波抑制处理后的图像如图 8 所示,淹没在杂波环境中的目标经杂波抑制后可以明显地被观察到。对杂波抑制后的图像做 CA-CFAR 检测,理论虚警概率设为 10^{-3} 。为了方便观察,从通过检测门限的目标中选取两个动目标 T_1 (见图 9(a))和 T_2 (见图 9(c)),以作后续分析。从图上可以看到,动目标方位向严重散焦,距离徙动横跨多个距离单元。采用第 3 节中介绍的动目标自聚焦算法对 T_1, T_2 做自聚焦处理,结果如图 9(b,d)所示。对比 T_1 和 T_2 自聚焦前后,动目标方位向和距离向散焦均得到明显改善,能量集聚,成为图像中最亮的点。提高检测门限,设定恒虚警概率为 10^{-5} ,对 T_1, T_2 自聚焦后的图像做第 2 次 CA-CFAR 检测。实测数据 CA-CFAR 检测最终结果如图 10(b),对比图 10(a),报警区域缩小且数量减少,有效地排

表 2 3 通道 SAR 系统参数

Tab. 2 Parameters of the three-channel SAR system

参数	参数值
载频/MHz	972.4
发射信号带宽/MHz	64
脉冲重复频率/Hz	4 000
相干处理脉冲数	16 384
载机飞行速度/($m \cdot s^{-1}$)	135
载机高度/m	5 300
成像区域中心点距离/km	24

除了虚警目标。

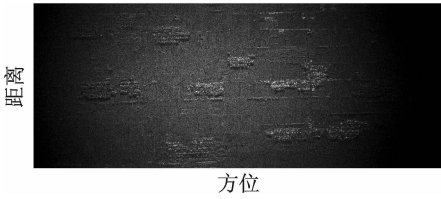


图7 目标区域 SAR 图像

Fig. 7 SAR image of target area

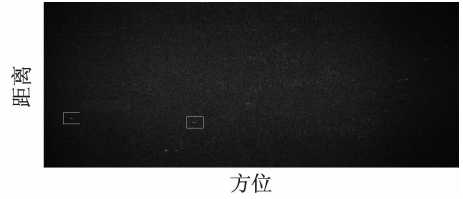
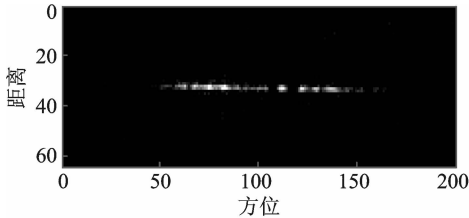


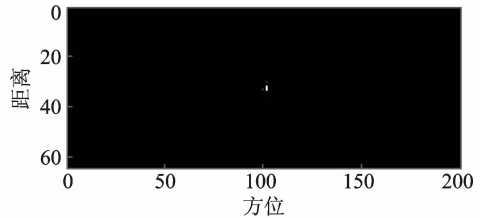
图8 杂波抑制后的 SAR 图像

Fig. 8 SAR image after clutter suppression



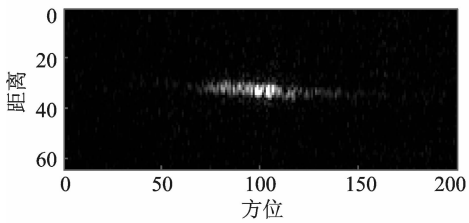
(a) T1自聚焦前的图像

(a) Image of T1 before autofocus



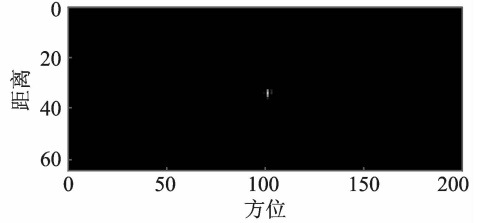
(b) T1自聚焦后的图像

(b) Image of T1 after autofocus



(c) T2自聚焦前的图像

(c) Image of T2 before autofocus

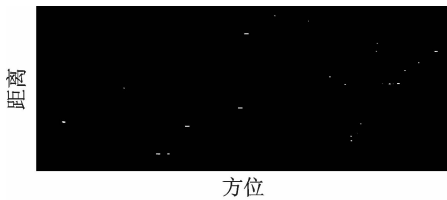


(d) T2自聚焦后的图像

(d) Image of T2 after autofocus

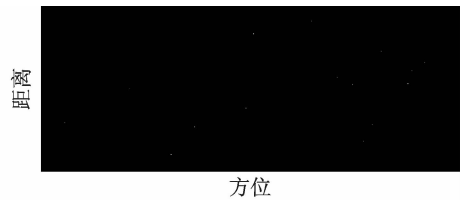
图9 动目标自聚焦处理结果

Fig. 9 Results of moving target autofocus processing



(a) 第1次CA-CFAR检测结果

(a) Result of the first CA-CFAR detection



(b) 第2次CA-CFAR检测结果

(b) Result of the second CA-CFAR detection

图10 CA-CFAR 检测处理结果

Fig. 10 Results of CA-CFAR detection processing

5 结束语

本文提出了一种变门限 SAR/GMTI 动目标检测方法,通过估计方位相位误差推算出距离相位误差,实现二维补偿,使动目标完全聚焦,有效改善了高分辨率 SAR 图像动目标散焦严重的问题,并利用低门限 CA-CFAR 检测—动目标自聚焦—高门限 CA-CFAR 检测降低了检测算法的虚警概率。经实测数据处理验证,本文提出的方法是一种有效的多通道 SAR/GMTI 动目标检测方法。

参考文献:

- [1] Sjogren T K, Vu V T, Pettersson M I, et al. Suppression of clutter in multichannel SAR GMTI[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52(7): 4005-4013.
- [2] Cerutti-Maori D, Sikaneta I. A generalization of DPCA processing for multichannel SAR/GMTI radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(1): 560-572.
- [3] Chapin E, Chen C W. Along-track interferometry for ground moving target indication[J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, 2008, 23(6): 19-24.
- [4] Ward J. Space-time adaptive processing for airborne radar[C]// IEE Colloquium on Space-Time Adaptive Processing. London: IET, 1998: 2-2.
- [5] Cerutti-Maori D, Sikaneta I, Gierull C H. Optimum SAR/GMTI processing and its application to the radar satellite RADA-RSAT-2 for traffic monitoring[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(10): 3868-3881.
- [6] Nehru D N, Vu V T, Sjogren T K, et al. SAR resolution enhancement with circular aperture in theory and empirical scenario[C]// Radar Conference, 2014 IEEE. Cincinnati, OH: IEEE, 2014: 0001-0006.
- [7] 赵亮, 毛新华, 吴迪. 基于回波信号的环视 SAR 成像运动参数估计[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4): 590-596.
Zhao Liang, Mao Xinhua, Wu Di. Motion parameter estimate of circular-scanning SAR imaging based on echo signal[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(4): 590-596.
- [8] Noviello C, Fornaro G, Martorella M. Focused SAR image formation of moving targets based on Doppler parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(6): 3460-3470.
- [9] Raghavan R S. Analysis of CA-CFAR processors for linear-law detection[J]. Aerospace & Electronic Systems IEEE Transactions on, 1992, 28(3): 661-665.
- [10] Chen Z Y, Wang T. Two-stage channel calibration technique for multichannel synthetic aperture radar-ground moving target indication systems[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2014, 8(9): 1116-1126.
- [11] 吴迪. 非均匀环境中机载雷达 STAP 及 SAR/GMTI 技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
Wu Di. Research on airborne radar STAP and SAR/GMTI technologies in heterogeneous environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [12] Bezvesilniy O O, Gorovyi I M, Vavriv D M. Estimation of phase errors in SAR data by local-quadratic map-drift autofocus [C]// Radar Symposium (IRS), 2012 13th International. Warsaw: IEEE, 2012: 376-381.
- [13] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, et al. Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 1994, 30(3): 827-835.
- [14] Perry R P, Dipietro R C, Fante R. SAR imaging of moving targets[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 1999, 35(1): 188-200.

作者简介:



陈格格(1990-),女,硕士研究生,研究方向:合成孔径雷达地面动目标指示技术, E-mail:chengege1210@foxmail.com。



朱岱寅(1974-),男,博士,教授,研究方向:合成孔径雷达信号处理。



吴迪(1982-),男,博士,副教授,研究方向:合成孔径雷达信号处理。



毛新华(1979-),男,博士,副教授,研究方向:合成孔径雷达信号处理。

