

文章编号: 2095-4980(2018)03-0406-06

基于距离走动效应的 SAR 运动目标检测算法

杨 健, 杨文付, 谢晓阳, 鲍文卓

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘 要: 针对单通道合成孔径雷达无法检测慢速地面运动目标(GMTI)的问题, 提出了一种基于距离走动效应对运动目标检测的新算法。首先对运动目标的回波频谱进行详细分解, 提取了运动目标在距离压缩后距离走动曲线与地面静止目标的区别。基于此区别, 通过对距离压缩后图像附加一对符号相反的距离走动相位, 并在图像域对附加相位后的图像进行对消, 可实现图像域地杂波的对消, 以及运动目标的检测。通过设计仿真试验, 验证了该算法可在图像域对静止回波进行有效抑制, 从而检测出混叠在地杂波中的慢速运动目标。

关键词: 地面运动目标检测; 距离走动效应; 单通道; 合成孔径雷达

中图分类号: TN955⁺.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0406

Moving target indication algorithm in SAR based on range walk migration

YANG Jian, YANG Wenfu, XIE Xiaoyang, BAO Wenzhuo

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: A novel Ground Moving Target Indication(GMTI) algorithm is presented to detect slow moving targets by using the range walk migration in single-antenna synthetic aperture radar. Two filters, which differ only in signs of phase responses, are utilized to change the range walk migration rates of the echo after the range compression, and two images are generated therewith. In the two images, stationary targets have the same range walk migration rates after the filtering; nevertheless, the range walk migration rates of the moving targets are different. Therefore, moving targets can be indicated by the complex subtraction of the two images. Simulations are conducted to prove that slow moving targets which are submerged by the clutter can be detected by the proposed algorithm.

Keywords: Ground Moving Target Indication; range walk migration; single-antenna; Synthetic Aperture Radar(SAR)

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨力二维成像雷达, 搭载机载、星载或弹载平台, 能够提供地面或海面的高精度雷达图像。随着 SAR 技术在军民领域的广泛应用, 地面运动目标检测(GMTI)技术也得到了迅猛发展^[1]。然而, 由于目标自身运动的存在, 运动目标在未经运动目标检测与成像算法处理的 SAR 图像上将出现错位、散焦等现象^[2], 严重影响了运动目标成像质量及后续目标识别等算法的效果。

传统的 GMTI 算法主要分为单通道与多通道 2 类。典型的多通道算法, 如相位偏置天线(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)^[3]、顺轨干涉(Along Track Interferometry, ATI)、空时自适应(Space-Time Adaptive Processing, STAP)^[4]等, 具备较好的慢速目标检测能力。然而, 多通道算法流程复杂, 运算量巨大, 且需运行于多通道 SAR 系统中, 综合成本较高。传统单通道 SAR 的 GMTI 算法是通过提取运动目标的多普勒中心偏移, 完成运动目标与地杂波的分离^[5]。然而, 当运动目标径向速度较低或出现多普勒混叠, 导致其频谱被地杂波淹没时, 传统算法无法完成对这类目标的检测。

近年来, 除多普勒中心偏移外的其他运动目标特性也逐渐得到关注, 并用来完成目标检测。文献[6]提出通过多普勒调频率实现运动目标检测, 然而, 该算法仅可检测具备较高方位速度的运动目标, 无法实现对径向运动目标的检测。文献[7]提出了一种通过图像锐化比的 GMTI 算法, 然而该算法性能依赖图像的信杂噪比。文献[8]提出了一种通过对称散焦在图像域完成运动目标检测的算法, 该算法同样仅具备检测方位运动目标能力。文献[9]

提出了通过区分距离走动率对运动目标检测的算法,然而这种算法的效果依赖于 Hough 变换的精确度,且需消耗较高的运算量。

本文针对单通道 SAR 的慢速运动目标检测问题,提出了一种基于距离走动效应实现慢速运动目标检测的算法。在正侧视 SAR 系统中,静止目标的距离走动曲线平行于方位向,而运动目标的距离走动曲线存在一定斜率。本算法设置使用 2 个相位符号相反的滤波器,可使距离压缩后的回波信号附加距离走动量相同,而走动方向相反的相位误差。在方位压缩后的图像中,静止目标由于附加相位误差,在 2 幅图像中出现相同的散焦,而运动目标在 2 幅图像中的散焦不同。通过 2 幅复图像对消,即可实现地杂波抑制和运动目标的检测。仿真试验表明,被地杂波覆盖的慢速运动目标能够被该算法成功检测,因此该算法性能优于传统单通道 SAR GMTI 算法。

1 运动目标建模与分析

单通道 SAR 系统在正侧视工作模式下地面运动目标的成像几何关系如图 1 所示。在合成孔径时间 T_a 内, SAR 系统平台以恒定速度 V_a 从 O 点飞至 O_1 点,地面运动目标以径向速度 V_x 、方位速度 V_y 从点 P 移动至点 P_1 。系统平台与运动目标间的最近斜距为 R_0 , 瞬时斜距为 $R(t_a)$, 其中 t_a 表示方位时间。

根据图 1, $R(t_a)$ 可以表示为:

$$R(t_a) = \sqrt{(R_0 - V_x t_a)^2 + (V_a t_a - V_y t_a)^2} \quad (1)$$

对式(1)进行泰勒展开,忽略三次及以上项,可以得到:

$$R(t_a) \approx R_0 - V_x t_a + \frac{(V_a - V_y)^2}{2R_0} t_a^2 \quad (2)$$

距离压缩后,运动目标的回波可以表示为:

$$s_0(t_a, t_r) = A_0 \omega_a(t_a) \text{sinc}[\pi B_r (t_r - \frac{2R(t_a)}{c})] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_a)) \quad (3)$$

式中: A_0 为运动目标的复后向散射系数; ω_a 为回波方位窗函数; t_r 为距离时间; B_r 和 λ 分别表示发射信号的瞬时带宽和波长; c 为光速。

将式(2)代入式(3),可得到运动目标的回波信号展开式:

$$s_0(t_a, t_r) = A_0 \omega_a(t_a) \text{sinc}[\pi B_r (t_r - \frac{2R_0}{c})] \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0) \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} V_x t_a) \cdot \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{(V_a - V_y)^2}{2R_0} t_a^2) \exp(j \frac{4\pi K_r}{c} V_x t_r t_a) \exp(-j \frac{4\pi K_r}{c} \frac{(V_a - V_y)^2}{2R_0} t_r t_a^2) \quad (4)$$

式中 K_r 为发射信号的调频率。从式(4)可以看出,运动目标的多普勒中心频率表达式为:

$$f_{dc} = \frac{2V_x}{\lambda} \quad (5)$$

对于静止目标,由于不存在径向速度,因此在正侧视模式下静止目标的多普勒中心为 0。而运动目标的多普勒中心随径向速度的增大而增大。当满足条件:

$$\frac{B_a + B_m}{2} + k \cdot PRF < \left| \frac{2V_x}{\lambda} \right| < \frac{PRF}{2} + k \cdot PRF \quad (6)$$

时,运动目标的频谱落入高频区域,能够在方位频谱上与在零频附近的地杂波进行区分。式中: B_a 为地杂波方位带宽; B_m 为运动目标方位带宽; PRF 为脉冲重复频率; k 为整数。

式(4)中的第 4、第 5 个指数项为运动目标的距离徙动相位,其中,第 4 项为距离走动项,第 5 项为距离弯曲项,如式(7)所示:

$$RCM = \exp(j \frac{4\pi K_r}{c} V_x t_r t_a) \exp(-j \frac{4\pi K_r}{c} \frac{(V_a - V_y)^2}{2R_0} t_r t_a^2) \quad (7)$$

由式(7)可知,运动目标的径向速度会使得运动目标的回波中附加一项距离走动相位,距离走动量随径向速度的增大而增大;方位速度会改变运动目标的距离弯曲量,距离弯曲量随方位速度的增大而减小。

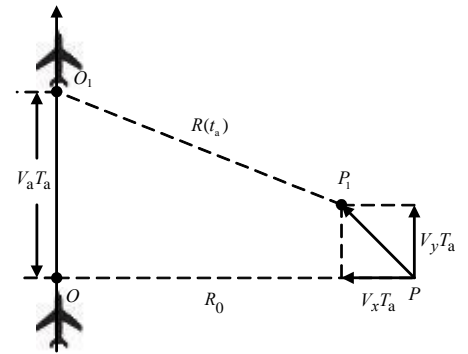


Fig.1 Geometry of ground moving target imaging in single-antenna SAR
图1 单通道 SAR 正侧视模式下地面运动目标成像几何关系图

2 运动目标检测算法原理

2.1 算法原理

传统的频域滤波法仅能检测到频谱位于方位高频的快速运动目标,而对于频谱被地杂波淹没的慢速运动目标无法检测。本算法主要针对单通道 SAR 系统对慢速运动目标的检测问题,提出基于运动目标的距离走动效应与静止目标的不同,通过对称滤波器附加相反距离走动项的方式,在图像域实现地杂波能量的对消和运动目标的检测。从式(7)可以看出,运动目标由于径向速度的存在,在距离压缩后的距离压缩曲线将附加一项斜率,且斜率的大小与径向速度成正比。在正侧视 SAR 系统中,距离弯曲校正后的静止目标距离压缩曲线为平行于方位向的一条直线。对静止目标和运动目标分别进行方位压缩后,静止目标的能量在距离向不会存在弥散,将会压缩至一个分辨单元内,而运动目标由于附加距离走动效应的影响,其能量将会在距离向弥散,且弥散的程度与距离走动量相关。

本算法建立了 2 个滤波器,滤波器的相位绝对值相同,符号相反,作用在距离压缩后的回波信号中,可使得回波信号附加一项距离走动相位。2 个滤波器附加的距离走动量相同,方向相反。因此对于静止目标,其距离走动曲线为斜率相反的 2 条曲线,而运动目标由于本身存在斜率,附加相反的距离走动相位后,2 条距离走动曲线斜率不同。对 2 个滤波器作用后的 2 组信号分别进行方位压缩,静止目标将在压缩后的图像域出现相同的散焦,而运动目标散焦情况不同。通过这一区别,即可在图像域通过复图像相减的方式实现地杂波能量对消,从而实现运动目标的检测。

2.2 算法流程

根据上述算法原理,本算法的具体实施步骤如下:

步骤 1: 对原始回波信号进行距离向傅里叶变换,并在距离频域完成距离压缩;

步骤 2: 在距离频域完成距离弯曲校正。由于本算法使用目标的距离走动曲线作为检测运动目标的特征,因此距离弯曲校正必须在检测之前完成,以使得目标的距离徙动曲线为直线。式(7)的第 2 项相位表示运动目标的距离弯曲。在文献[10]中,证明了由于 V_a 远大于 V_y ,由 V_y 造成的运动目标距离弯曲量变化可以忽略不计。因此,通过使用静止目标的距离弯曲校正滤波器对整幅图像的距离弯曲效应进行校正,可以使得图像内的静止目标和运动目标的距离徙动曲线被校正为一条直线。距离频域下距离弯曲校正滤波器的形式为:

$$H_{\text{RCMC}_C} = \exp(j \frac{2\pi V_a^2}{cR_0} f_r t_a^2) \quad (8)$$

步骤 3: 在距离频域内,将回波信号复制为 2 路。2 路回波信号分别与下述对称滤波器相乘:

$$H_+ = \exp(j \frac{2\pi}{f_c} f_\Delta f_r t_a) \quad (9)$$

$$H_- = \exp(-j \frac{2\pi}{f_c} f_\Delta f_r t_a) \quad (10)$$

式中: f_Δ 为附加的多普勒中心频率偏移; f_c 表示发射信号载频; f_r 表示距离频率。

从式(9)和式(10)可以看出,两式仅相位符号相反。作用于回波信号后,静止目标和运动目标在 2 路信号中的距离走动曲线如图 2 所示。其中,静止目标附加距离走动曲线用虚线表示,运动目标附加距离走动曲线用点划线表示。

对称滤波后,对回波信号进行逆傅里叶变换,将信号变换至二维时域。

步骤 4: 对 2 路信号进行方位压缩,并变换至二维频域,可以得到 2 幅散焦的图像。由于 2 路信号中静止目标的距离走动量相同,因此对于静止目标而言,在 2 幅散焦图像中的散焦程度相同,而运动目标则不同。

步骤 5: 对 2 幅图像进行复数相减,可以实现地杂波能量的对消,同时保留运动目标的能量。通过恒虚警率检测(Constant False Alarm Rate, CFAR)可以完成运动目标的检测^[11]。本算法的流程图如图 3 所示。

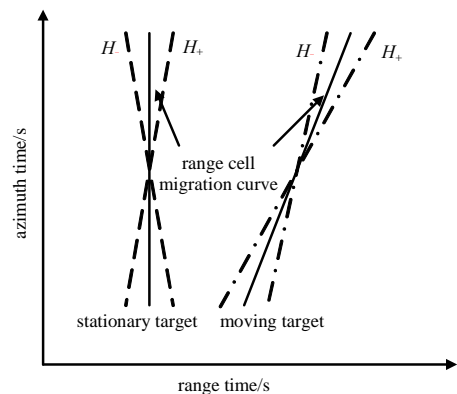


Fig.2 Range cell migration curves of stationary and moving targets after symmetric filtering
图 2 附加对称滤波后的静止目标和运动目标距离走动曲线

3 算法关键问题分析

3.1 附加多普勒中心偏移量选取

附加多普勒中心偏移量 f_{Δ} 的选取原则是使得 2 幅图像中运动目标的距离走动量差距最大化。如果 f_{Δ} 选取过小, 则 2 幅图像中运动目标的散焦差距太小, 不足以检测目标; 如果 f_{Δ} 选取过大, 则 2 幅图像散焦过大, 使得目标峰值能量不够集中, 影响对消效果。 f_{Δ} 的最优取值为:

$$f_{\Delta} = \frac{2V_x}{\lambda} \tag{11}$$

在最优取值的情况下, 运动目标在一路图像中将得到完全聚焦, 而在另一路图像中将严重散焦。2 幅图像中明显的聚焦程度变化将使对消后检测到明显的信号尖峰。此结论将在后续的仿真试验中得到证明。在实际数据处理中, 由于运动目标径向速度 V_x 的精确值未知, 因此无法选取到最优值。然而, 在最优值附近取值均可实现目标的有效检测。

3.2 地杂波多普勒中心校正

在实际信号处理中, SAR 系统及平台的非理想误差, 会使得回波信号的多普勒中心与理想的多普勒中心间存在偏移。这一偏移误差将使静止目标的距离走动曲线不与方位向平行。因此, 在实际算法实施前, 应对地杂波的多普勒中心进行估计与补偿。

3.3 盲速下运动目标检测

当运动目标的径向速度满足条件:

$$V_x = k \frac{PRF \cdot \lambda}{2} \tag{12}$$

时, 运动目标被定义为运动于盲速下。

在这种情况下, 运动目标的方位频谱混叠至地杂波中, 完全被地杂波所覆盖, 因此采用传统的 GMTI 算法无法实现目标检测。然而, 由于运动目标的距离走动量不会随着径向速度的增大而出现混叠, 因此本算法可以检测盲速运动目标, 这也是本算法相对传统算法的优势之一。

4 仿真试验与结果分析

本节通过仿真试验对算法的有效性进行验证。在仿真试验中, 设置 5 个目标, 其中包含 3 个静止目标, 用 ST 表示, 分别为 ST_1, ST_2 和 ST_3 , 2 个运动目标, 分别用 MT_1 和 MT_2 表示。3 个静止目标为模拟地杂波频谱, 在设置静止目标的基础上, 在回波信号中加入幅度为 0.5 的高斯白噪声。具体的仿真试验参数见表 1。根据表 1 可知, 3 个静止目标的空间位置较近, 用于模拟实际场景中的面目标; MT_1 和 MT_2 的径向速度很小, 不满足式(6)的条件, 两目标属于慢速运动目标, 其方位频谱将被地杂波频谱淹没。

仿真结果如图 4 所示。其中, 图 4(a)为仿真回波的方位频谱, 可以看出, 运动目标与静止目标的频谱出现混叠, 无法在方位频域实现运动目标的检测, 这也证实了本次仿真试验中的两目标为慢速目标。图 4(b)和图 4(c)分别为经过本算法处理后的两路图像。比较图 4(b)和图 4(c), 可以看出静止目标的散焦程度相同, 但是运动目标的散焦程度不同, 这与理论分析一致。将图 4(b)和图 4(c)进行复图像相减后, 通过 CFAR 检测, 检测结果如图 4(d)所示。可以看出, 2 个运动目标均得到了成功检测, 静止目标回波得到了消除。

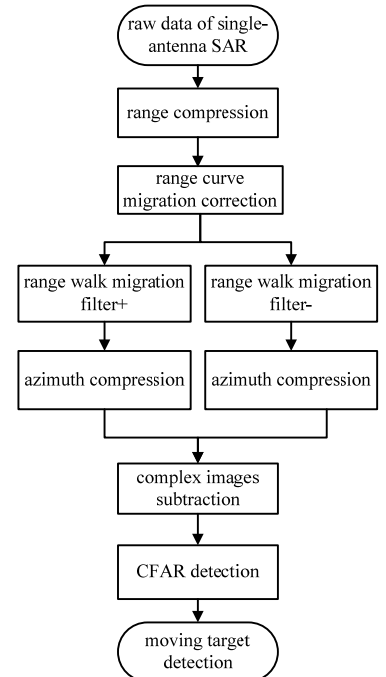


Fig.3 Flowchart of the proposed algorithm
图 3 算法流程图

表 1 仿真试验参数

Table1 Simulation parameters

parameter	value	target	parameter	value
carrier frequency	9.4 GHz	ST_1	range location	30 000 m
PRF	1 200 Hz	ST_2	range location	30 010 m
bandwidth	100 MHz	ST_3	range location	29 990 m
pulse duration	10 μ s	MT_1	range location	800 m
platform velocity	250 m/s		radial velocity	5 m/s
sampling frequency	120 MHz	MT_2	range location	1 200 m
antenna length	1 m		radial velocity	4 m/s

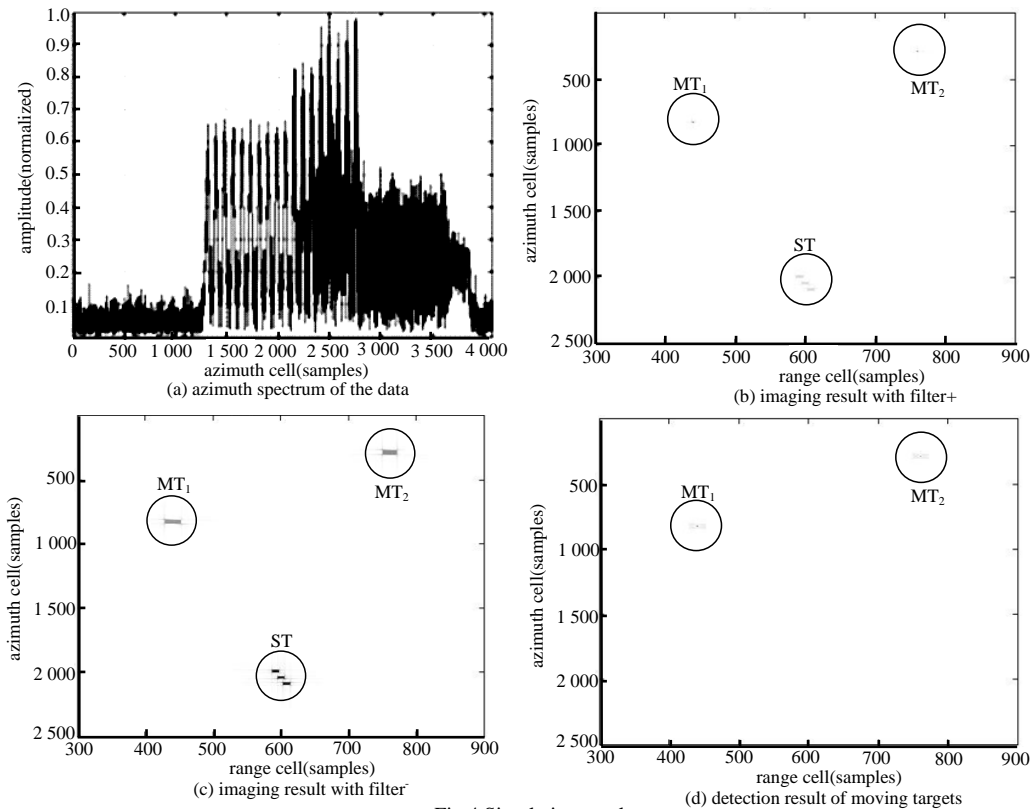


Fig.4 Simulation results

图 4 仿真实验结果

对图 4 中经过两对称滤波器处理后的图像对消结果进行定量分析^[12-13], 通过对消后剩余能量与 2 幅图像中原始目标能量(图像域像素和)作比的形式, 分析本算法对回波能量的抑制能力。由仿真可以计算出: 对于运动目标 MT_1 , 对消后剩余能量占原目标能量的 93.18%; 对于运动目标 MT_2 , 对消后剩余能量占原目标能量的 94.44%; 对于静止目标区域 ST , 对消后剩余能量占原目标能量的 18.59%。由此可知, 经过本文算法, 静止目标能量得到了明显抑制, 而大部分运动目标能量得到了保留, 验证了算法的有效性。

5 结论

本文提出了一种基于距离走动效应的单通道 SAR 地面运动目标检测算法, 能够实现对慢速运动目标的有效检测。算法通过在原始回波信号中附加相反的距离走动相位, 实现在图像域的地杂波对消和运动目标检测。本文推导分析了运动目标的回波频谱, 详细介绍了算法的原理和步骤, 并对算法中的关键问题进行了分析。最后, 通过仿真试验结果验证了算法的有效性。

参考文献:

- [1] PERRY R P, DIPIETRO R C, FANTE R L. SAR imaging of moving targets[J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1999, 35(1): 188-200.
- [2] XU J, ZUO Y, XIA B, et al. Ground moving target signal analysis in complex image domain for multichannel SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(2): 538-552.
- [3] 谭岳峰, 刘军鹰, 朱学勇, 等. 基于多通道重构的 DPCA SAR 方位向信号处理[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012, 10(2): 201-205. (TAN Yuefeng, LIU Junying, ZHU Xueyong, et al. Nonuniform azimuth signal processing of airborne DPCA SAR based on multichannel reconstruction[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012, 10(2): 201-205.)
- [4] BARBAROSSA S, FARINA A. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(2): 341-358.
- [5] FREEMAN A, CURRIE A. Synthetic Aperture Radar(SAR) images of moving targets[J]. GEC Journal Research, 1987, 5(2): 106-115.
- [6] MOREIRA J R, Keydel W. A new MTI-SAR approach using the reflectivity displacement method[J]. IEEE Transactions on

- Geoscience and Remote Sensing, 1995,33(5):1238-1244.
- [7] FIENUP J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001,37(3):794-809.
- [8] LYU G,WANG J,LIU X. Ground moving target indication in SAR images by symmetric defocusing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013,10(2):241-245.
- [9] LI Y,WANG Y,LIU C. Detect and autofocus the moving target by its range walk in time domain[C]// International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. [S.l.]:IEEE, 2011:1-5.
- [10] YANG J,JIN X H T,THOMPSON J,et al. New approach for SAR imaging of ground moving targets based on a keystone transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011,8(4):829-833.
- [11] NITZBERG R. Constant-false-alarm-rate signal processors for several types of interferences[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1972,8(1):27-34.
- [12] XU J,LI G,PENG Y N,et al. Parametric velocity synthetic aperture radar:signal modeling and optimal methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008,46(9):2463-2480.
- [13] XU J,LI G,PENG Y N,et al. Parametric velocity synthetic aperture radar: multilook processing and its applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008,46(11):3488-3502.

作者简介:



杨 健(1986-), 男, 沈阳市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为合成孔径雷达地面运动目标检测与成像技术.email:summermax@163.com.

杨文付(1986-), 男, 河北省唐山市人, 博士, 工程师, 研究方向为合成孔径雷达回波仿真与信号处理技术.

谢晓阳(1985-), 男, 河南省洛阳市人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为雷达目标特性研究、雷达末制导系统设计.

鲍文卓(1983-), 男, 内蒙古自治区兴安盟人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为光学成像系统建模与仿真技术.