

基于单通道 SAR 图像序列特征值分解的动目标检测方法

刘书君^① 袁运能^② 毛士艺^②

^①(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

^②(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 该文提出了一种基于单通道图像序列间协方差矩阵分解的动目标检测方法。首先给出基于方位频谱划分获取子图像的处理过程,分析了子孔径划分在图像序列间所产生的误差来源,结合二维自适应方法对幅度和相位上存在的误差同时校正,实现了子图像间的配准,构造出类似于多通道的子图像。在此基础上,结合多通道杂波抑制的思想,详细分析了两子孔径间协方差矩阵特征值分解实现目标与杂波分离的原理,并针对在图像域估计采样协方差引起的精度与目标能量损失之间的矛盾,提出了在距离多普勒域的改进处理。最后,经过仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 运动目标检测; 协方差矩阵特征值分解

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1876-05

The Method of Moving Target Detection Based on the Eigen-Decomposition of the Single-Channel SAR Image Sequence

Liu Shu-jun^① Yuan Yun-neng^② Mao Shi-yi^②

^①(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

^②(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The method of moving target detection based on eigen-decomposition of the covariance matrix is proposed for single-antenna airborne SAR. First the paper points out that the sub-image is obtained through frequency processing. The imaging difference of sub-images as the result of the sub-aperture division is rectified using the adaptive 2D-calibration. The magnitude and phase difference can be corrected at the same time and the sub-images like the multi-channel can be obtained. Then the developed method combines the concept of multi-channel samples covariance matrix. The fundament of the separation between clutter and moving target based on the decomposition of the sub-image sample covariance matrix is analyzed. The estimation of the sample covariance matrix in image brings the inconsistency between the accuracy and the decrease of the target's energy. The improved method of estimation is calculated in range-doppler domain is proposed and the moving target is indicated based on the second eigenvalues. Simulation results demonstrate that the method is effective.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); Moving Target Detection(MTD); Eigen-decomposition of the covariance matrix

1 引言

合成孔径雷达作为一种在军事及民用领域广泛采用的雷达体制,不仅能实现固定场景高分辨率成像,还可以通过特定的工作模式对成像区域内的运动目标进行检测。目前已有的动目标检测技术侧重于多天线系统,主要有空时自适应处理技术(STAP),沿轨迹干涉(ATI)^[1]和偏置相位中心天线(DPCA)杂波对消等技术。比如,加拿大星载系统 Radarsat-2^[2]采用两个接收天线,机载联合监视目标攻击雷达(JSTARS)^[3]采用了 3 个通道。STAP 检测

性能高^[4],但硬件系统复杂;DPCA 和 ATI 要求雷达的脉冲重复频率与载体的运动速度满足特定的关系。这些都增加了雷达系统设计的复杂度,如何在原有单通道 SAR 的基础上实现运动目标的检测已成为了一个现实而有意义的问题。已有的单通道检测方法主要有频率检测法^[5]、反射特性位移法以及基于时频特性的 WVD、小波变换法以及基于 SAR 空间的目标检测^[6]等。这些方法主要基于目标的频率特性实现目标与杂波分离,难以直接消除杂波,在杂波抑制的性能上有所欠缺。

本文从单通道 SAR 图像出发,充分利用 SAR 在一定合成孔径时间内获取的数据,从单通道 SAR

图像中提取出图像序列,从而突破了单通道的局限性,利用图像序列间杂波和运动目标在相位上的差异,采用协方差矩阵特征值分解的方法实现杂波抑制。本文首先分析了单通道图像序列的划分方法以及划分所带来的杂波与目标在不同图像序列间的成像特性以及误差来源,然后结合二维自适应方法校正图像序列间的失配,将处理后的不同图像序列等效为不同通道获得的成像结果构造协方差矩阵并进行特征值分解,详细分析了特征值分解实现杂波与目标分离的原理,以及选取两个子孔径的理论背景。并针对图像域样本协方差估计在估计精度与目标能量损失之间的矛盾,提出了距离多普勒域的改进处理,根据特征值对动目标信号能量的敏感性实现目标的检测并确定出所在距离门位置。最后,通过仿真实验验证了该方法的有效性。实现了在单通道SAR图像基础上结合多通道杂波抑制的运动目标检测,扩展了现有单通道SAR系统功能。

2 单通道 SAR 图像序列原理

2.1 单通道中图像序列的生成

在 SAR 图像中提取子图像时,通常在全合成孔径的时域或者频域分成两个或多个视数。在时域处理时,是对时域回波数据进行分段,这相当于把全合成孔径划分成一些子孔径,再对各子孔径进行处理。在实际处理中多采用频域划分。为便于讨论,在此省略成像部分的介绍,直接从 SAR 图像入手形成子图像序列。首先将 SAR 图像变换到方位向频域,在多普勒频域中将频带分成相互重叠大小相同的子频带,再将频域子块变换回时域以获得相应的子图像。如图 1(a)所示为频率划分示意图,图 1(b)为相应子孔径示意图。可见,频域划分后等效于将单天线方位波束宽度分为几个子孔径,每个子孔径近似于多通道中单个天线数据并分别进行成像处理。

子频带的大小要兼顾方位向分辨率和运动目标散焦所带来的影响。若所选频带太小会引起分辨率的严重降低,太大则会加剧动目标的散焦现象。同时子频带位置的选取也会引起目标能量的变化。一方面,目标的运动使其被照射时间与静止目标不同,

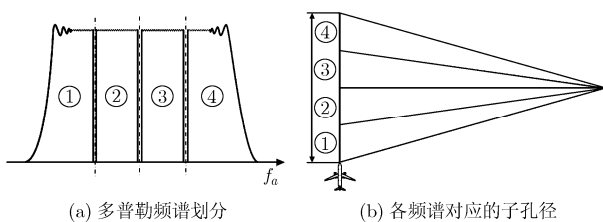


图 1

静止目标与运动目标在成像结果中存在能量上的差异。另一方面,假设所选频带的位置上与运动目标所在频带存在较大的偏移,所选频带仅与静止目标相匹配,频谱宽度及位置都与静止目标相同,而运动目标的频谱则只有部分重叠区域,从而减小了运动目标的能量。子频带之间通常重叠 40%~50%,既保证了静止目标在图像序列间的相关性,又给出了运动目标在图像序列间的位移差。

2.2 图像序列间的误差分析

为构造类似多通道的配置,以上通过单通道在方位频域的划分获得了不同的子图像,初步实现了多个子孔径的提取。但基于频域划分的处理过程,不仅引起上节所述相位上的差异,由于方向天线图的影响在幅度上也存在差别。

假设所选取的天线方向性图是以视角 θ 为自变量的 sinc 函数, SAR 天线模型为均匀口面照射,天线方向图分为方位面和距离面,由于子孔径在距离面的影响很小,在此忽略,重点讨论方位面的影响。其函数如式(1)所示:

$$F(D, \theta) = \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} D \sin \theta\right) / \left(\frac{\pi}{\lambda} \sin \theta\right) \quad (1)$$

假设 $\lambda = 0.3 \text{ m}$, 实际天线孔径的方位向长度 $D = 2 \text{ m}$ 。图 2(a)为主波束图。假设以主波束中心为准分为对称的两个子孔径,各子孔径方向性图近似为图 2(b)中实线和虚线所示:

由图 2(a)可知,由方位频域子频带的选取所形成的子孔径在方位向的天线方向性图各异,引起图像序列间的幅度差异。另外,载机平台在飞行过程中的不稳定性带来天线指向误差也会引起波程的变化,进而对回波多普勒频率产生影响。考虑到复杂系统以及噪声、大气扰动等环境因素的影响,在实际情况中子孔径间的幅相误差将更加复杂,因此,对子孔径间的校正是十分必要的。针对这些失配,基于最小二乘准则的二维自适应校准方法^[7],无需天线参数、载机平台运动参数等先验信息,只需对已有的 SAR 图像进行 1-3 次迭代即可同时校准幅度和

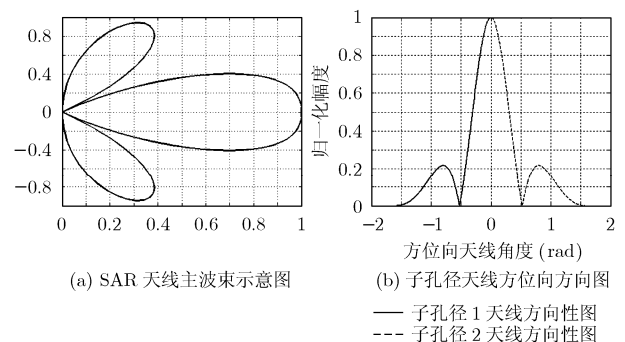


图 2

相位误差, 适合于本文在图像域的处理背景, 使子图像的幅度特性和相位特性在最小二乘准则下匹配。

3 基于子孔径协方差矩阵特征值分解的运动目标检测

3.1 协方差矩阵特征值分解的动目标检测原理

经过校正处理后的子孔径可类似于多通道的配置, 在此基础上可计算出 n 个子孔径间大小为 $n \times n$ 的协方差矩阵。本文选取两个子孔径的情况分析, 若以 S_1 和 S_2 表示两个子孔径中的信号, 协方差矩阵如式(2)所示。

$$\mathbf{R} = \mathbf{E} \left\{ \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} (S_1 \ S_2)^* \right\} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho e^{j\Phi} \\ \sigma_1 \sigma_2 \rho e^{-j\Phi} & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

σ_1^2 , σ_2^2 分别表示两子孔径对应信号的方差; $\rho e^{j\Phi}$ 为复相关系数, 其模值 $|\rho|$ 即为两子孔径间的相关系数; Φ 为子孔径间的相位差, 即共轭干涉角。由上式可知 \mathbf{R} 为 Hermit 矩阵, 对角化为

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12}^H & R_{22} \end{bmatrix} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2]^H \\ &= \lambda_1 \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_1^H + \lambda_2 \mathbf{v}_2 \mathbf{v}_2^H \end{aligned} \quad (3)$$

其中 λ_1, λ_2 为特征值, \mathbf{v}_1 和 \mathbf{v}_2 分别为 λ_1 和 λ_2 对应的特征向量, $[\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2]^H [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2] = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2]^{-1} [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2] = \mathbf{I}$ 。如图3所示, 信号能量沿两个特征向量分解。假设两个子孔径在距离时域, 方位频域的信号为

$$\begin{cases} S_1 = A \cdot e^{j\theta} + m \cdot e^{j\varphi_1} \\ S_2 = A \cdot e^{j\theta} + m \cdot e^{j\varphi_2} \end{cases} \quad (4)$$

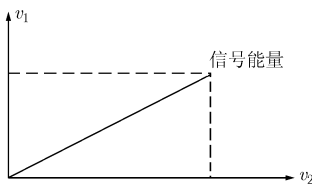


图3 协方差矩阵分解示意图

其中 $A \cdot e^{j\theta}$ 为两个子孔径中的杂波信号, A 为幅度, θ 为相位。经过校正处理后近似认为在两个子孔径中的杂波信号完全一样。 $m \cdot e^{j\varphi_1}$ 和 $m \cdot e^{j\varphi_2}$ 为运动目标在两个子孔径中的信号, 其中 m 为动目标信号幅度, 近似认为在两通道中的幅值相同。 φ_1, φ_2 分别为动目标在两个通道中的相位。假设目标与杂波之间不相关, σ_c^2, σ_m^2 分别为杂波和动目标的方差, 均衡处理后两子孔径间的相关系数 $\rho \approx 1$, 由式(2)可知两子孔径中信号的协方差矩阵如下:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12}^H & R_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_c^2 + \sigma_m^2 & \sigma_c^2 + \sigma_m^2 e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \\ \sigma_c^2 + \sigma_m^2 e^{-j(\varphi_1 - \varphi_2)} & \sigma_c^2 + \sigma_m^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

以 $\mathbf{R}_c, \mathbf{R}_m$ 分别表示杂波和目标的协方差, 上式可分解如下:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_c + \mathbf{R}_m = \sigma_c^2 \begin{pmatrix} 1 & \\ & 1 \end{pmatrix} + \sigma_m^2 \begin{pmatrix} e^{j\varphi} & \\ & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-j\varphi} & \\ & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 。可见, 当场景中仅为平稳杂波, 不含运动目标时, 协方差矩阵秩为 1, 第二特征值为零。存在运动目标时, 协方差矩阵分解后为满秩, $\lambda_2 \neq 0$ 。由此可见, 基于样本协方差矩阵第二特征值对运动目标信号能量的敏感性, 可利用第二特征值 λ_2 的大小来检测运动目标。当 $\varphi = (2k+1)\pi$ 时 (k 为整数), 式(6)变为如下形式:

$$\mathbf{R} = \sigma_c^2 \begin{pmatrix} 1 & \\ & 1 \end{pmatrix} + \sigma_m^2 \begin{pmatrix} -1 & \\ & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

此时, $\lambda_1 = \sigma_c^2, \lambda_2 = \sigma_m^2$, 杂波与运动目标的能量完全分离, 达到最佳检测效果。当 $\varphi = 2k\pi$ 时 (k 为整数), 两个特征向量相等 $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_2 = (1 \ 1)^T$, 矩阵秩为一, $\lambda_1 = \sigma_c^2 + \sigma_m^2, \lambda_2 = 0$, 出现盲速现象, 难以检测运动目标。为获得其他情况下的特征值, 结合式(2)、式(3)可求得^[7]

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{1}{2} \left(R_{11} + R_{22} + \sqrt{4|R_{12}|^2 + (R_{11} - R_{22})^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sqrt{4|\sigma_1 \sigma_2|^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2} \right) \\ \lambda_2 &= \frac{1}{2} \left(R_{11} + R_{22} - \sqrt{4|R_{12}|^2 + (R_{11} - R_{22})^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sqrt{4|\sigma_1 \sigma_2|^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

为深入理解存在运动目标时, 第二特征值与运动目标参数之间的关系, 将式(5)中各分量代入到式(8)求得在含有运动目标时第二特征值的结果为

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= (\sigma_c^2 + \sigma_m^2) - (\sigma_c^2 + \sigma_m^2) \\ &\quad \cdot \sqrt{1 + \frac{2\sigma_c^2 \sigma_m^2}{(\sigma_c^2 + \sigma_m^2)^2} (\cos(\varphi_1 - \varphi_2) - 1)} \\ &\approx \frac{\sigma_c^2 \sigma_m^2}{(\sigma_c^2 + \sigma_m^2)} (1 - \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 基于子孔径协方差矩阵特征值分解的动目标检测方法

为获得样本协方差矩阵并达到一定的精度, 需将待处理单元周围的多个像素点作平均来估计协方差矩阵。若直接在图像域中处理, 每一像素点分别代表不同的目标信息, 相邻区域平均的过程会引入

杂波干扰,降低运动目标的能量影响后续处理特性。为了克服样本空间量的需求与相邻区域的杂波干扰,本文提出了距离多普勒域处理方法。在同一距离门里,如图4所示, n 个方位多普勒单元中均包含有运动目标的能量,由此求得的样本协方差矩阵中包含了完整的目标能量。设 $z_1(k)$, $z_2(k)$ 分别为子孔径1和子孔径2在同一距离单元,方位多普勒域的信号,向量 $z = [z_1(k), z_2(k)]^T$ 。则样本协方差矩阵可表示为

$$\hat{R} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n z(k)z(k)^H \quad (10)$$

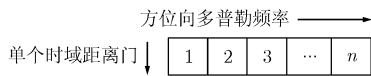


图4 单个距离门方位频域示意图

该处理的本质在于将图4中分散于方位频域的杂波与动目标能量通过协方差矩阵分解的方法分别体现于不同特征值上,遍历所有距离门,基于每一协方差矩阵特征值的大小即可实现运动目标的检测,且能确定目标所在距离门的位置,优于图像域的直接处理。另外,在子孔径个数的选取方面,协方差矩阵特征值分解的运动目标检测方法,由其内在的本质所决定了采用两个子孔径的处理是比较适

合的。首先,协方差矩阵需要各子孔径提供足够的信息量,在单通道频域划分的基础上获得多子孔径的过程会存在孔径数目与各孔径所含能量之间成反比的关系,得到多个子孔径的同时减少了每一孔径所含信息量。其次,随着协方差矩阵维数的增加,分解后会有更多维彼此正交的子空间,信号在投影到多维子空间的过程中,分离出杂波的同时自身能量也趋于分散,并且目标投影于不同子空间的能量比例未知,难以从多个特征值中选取表征其存在的特征值。为避免这一矛盾,空时自适应(STAP)处理中,在计算样本协方差时假定各通道数据为杂波信号,仅构造杂波协方差矩阵^[8]。接收信号在该空间的投影即为信号所含杂波分量,从而保留了有用信息,实现了目标与杂波的分离。

该方法对于强杂波点的影响也有较好的鲁棒性,无论杂波强度如何,其能量全部聚集在第一特征值上,对第二特征值没有影响,实现了杂波与目标的完全分离,从而有利于对微弱目标的检测。

4 仿真分析

4.1 基于误差校正与协方差分解的仿真实验

读取真实环境数据作为杂波背景,建立运动目标的回波模型,将其加入实际杂波数据中进行仿真验证,其系统参数如下表1所示。

表1 SAR系统与仿真场景的参数定义

载机		SAR		运动目标与杂波带	
飞行速度 v_a	200 m/s	信号波长 λ	0.1 m	目标 1,2 位置 (x,y)	$(-3 \text{ m}, 1 \text{ m}), (-19 \text{ m}, 45 \text{ m})$
初始距离 R_0	10 km	脉冲频率 prf	500 Hz	目标 1,2 速度 (x,y)	$(2,-3), (3,-4) \text{ m/s}$
斜视角	90°	等效孔径距离 d	2 m	杂波谱带宽	200 MHz

仿真中以实际杂波作为背景并将运动目标的回波叠加在其中,仍以成像中心为原点(0, 0), x 轴表示方位向, y 轴表示距离向,均以米作单位。初始距离为载机与测绘带中心的距离,动目标的位置均指目标距离测绘带中心的位置。

将成像结果沿方位向频域选取两个子频带,所对应的前后两个子孔径图像间重叠度为45%。如前文所述子孔径间存在一定的失配,将每一方位向对应的距离门求平均后,两个子孔径的仿真结果如图5(a),5(b)所示。采用二维自适应方法迭代1-3次后,可校正子孔径间的差异,如图5(b)所示。

在实现了子孔径间误差校正后,由式(8)分别计算两子孔径在同一距离门内方位频域信号的协方差矩阵,再基于协方差分解后第二特征值的强度来检测运动目标所在距离单元。图6(a)为仿真获得的

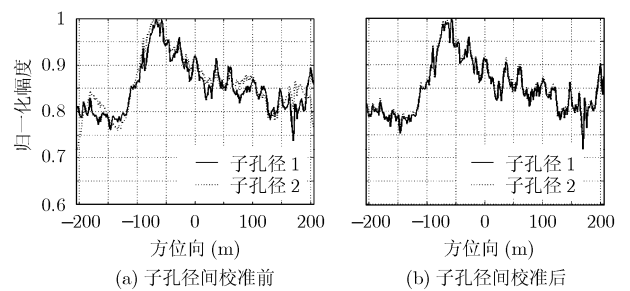


图5

SAR图像,图6(b)为每一距离单元内协方差矩阵分解后第2特征值的归一化幅度。

对比图6(a),6(b)可知,在距离多普勒域进行样本协方差矩阵估计,提取第二特征值沿距离门的幅度可有效的检测出运动目标,并确定其所在距离

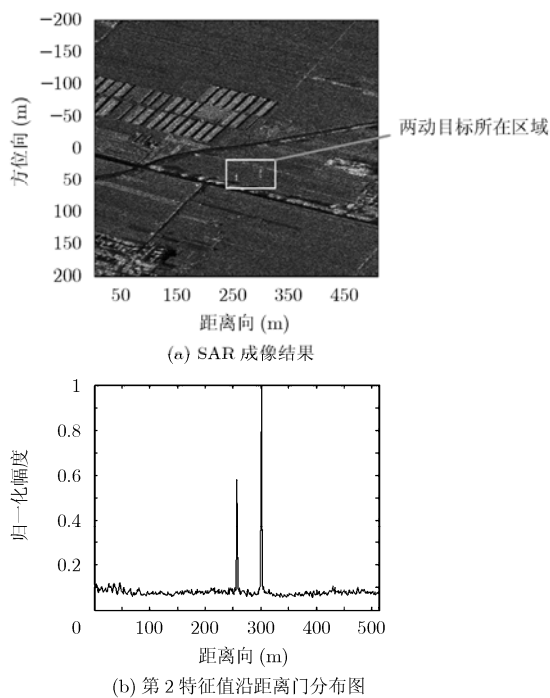


图6

单元的位置。

5 结束语

本文从单通道 SAR 图像入手, 通过频域分块的子孔径划分方法获得了子图像序列。分析了该划分方法带来的子图像间的误差并结合二维自适应算法实现配准, 以保证静止杂波在子图像中的一致性, 以等效为多通道的图像序列。通过两个子孔径间协方差矩阵分解后的子空间彼此正交的特性, 详细分析了目标信号的存在与否对特征值的影响。只含有杂波和噪声时, 第2特征值为零; 而存在动目标时, 协方差矩阵分解后为满秩, 第2特征值不为零, 从而基于样本协方差矩阵第2特征值对运动目标信号能量的敏感性, 可利用第2特征值 λ_2 的大小来检测运动目标。

参考文献

- [1] Zhou Zheng-shu, Bates B D, and Dong Yun-han. Development of a baseband signal ATI-SAR simulator for ground moving target indication. IGASS IEEE international. England. July 23-28, 2007: 4505-4508.
- [2] Beaulne P D. Preliminary design of a SAR-GMTI processing system for RADARSAT-2 MODEX data [J]. *IEE Proceeding-F*, 1992, 139(1): 89-97.
- [3] Stockburger E F and Held D N. Interferometric moving ground target imaging. Radar Conference, 1995, Record of the IEEE 1995 International. Germany. May 8-11, 1995: 438-443.
- [4] Corbell P M, Perez J J, and Rangaswamy M. Enhancing GMTI performance in non-stationary clutter using 3D STAP. 2007 Radar Conference, IEEE. America, April 17-20, 2007: 647-652.
- [5] Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(3): 499-505.
- [6] Paulo A C, Jose M, and Dias B. Moving targets processing in SAR spatial domain. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 864-874.
- [7] Ender J H G. The Airborne Experimental Multi-channel SAR System AER-II, EUSAR 96, Koniswinter, Germany, 1996: 49-52.
- [8] Ender J H G. Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(1): 29-38.

刘书君: 女, 1981年生, 讲师, 研究领域为合成孔径雷达成像与运动目标检测。

袁运能: 男, 1962年生, 副教授, 硕士生导师, 研究领域为小波分析及其应用、高分辨率雷达成像。

毛士艺: 男, 1935年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为高分辨率雷达成像、弱信号检测、非高斯信号建模、信号分类、多传感器融合、数据互联和多目标跟踪等。