

基于 MIMO-SAR 体制的空频域自适应动目标检测技术研究

张晓光^{①②} 刘祥峰^③ 付琨^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 100049)

^③(中国国际工程咨询公司 北京 100048)

摘要: 多发多收星载 SAR 使用多天线从不同的相位中心发射正交编码信号, 多个接收相位中心接收回波后形成多通道信号, 显著增大了空间自由度, 有利于地面动目标检测。该文研究了多发多收星载 SAR 空时自适应信号处理进行地面动目标检测的技术, 针对星载 SAR 回波信号的特点, 在研究空频自适应处理算法的基础上, 使用基于特征值分解的空频自适应处理算法对多发多收星载 SAR 的杂波进行抑制, 最后完成对动目标的检测。仿真数据处理结果验证了该文方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 多发多收; 动目标检测; 空时自适应处理

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-1997-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00937

Study on Ground Moving Target Indication of Multiple Input Multiple Output Space-borne SAR

Zhang Xiao-guang^{①②} Liu Xiang-feng^③ Fu Kun^①

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

^②(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^③(China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: Multi-input multi-output spaceborne SAR transmits orthogonal coding signals with multiple antennas from different transmitting phase centers, and receives returns from different receiving phase centers to form multi-channel signals. It can increase the spatial freedom considerably, which gives advantages to detecting ground moving targets. This paper researches the ground moving targets detection technologies for multi-input multi-output spaceborne SAR with space-time adaptive signal processing. Considering the characteristics of the returns of the spaceborne SAR, in the basis of research on the space-frequency adaptive processing algorithm, the text adapts eigen-structure based space-frequency adaptive processing algorithm to suppress the clutter and completes finally the detection of the moving targets. Simulation results proves the validity of proposed algorithm.

Key words: SAR; MIMO; Ground Moving Target Indication (GMTI); Space-time Adaptive Processing (STAP)

1 引言

地面运动目标检测(GMTI)是多发多收(MIMO)星载 SAR 的一个重要应用^[1,2]。使用 MIMO-SAR 系统进行动目标检测主要具有如下两大优点^[1-6]: 一是多个相隔一定间距的发射天线发射不同的正交波形, 以不同的视角观测目标, 目标经过不同的路径, 目标散射系数为独立的随机变量, 不同的正交波形携带不同的目标信息, 接收机使用匹配滤波器组提取正交波形, 对接收到的多路信号可以有效地检测动目标; 二是不同发射天线产生的相位差和不同接

收天线产生的相位差能形成一个虚阵列导向矢量, 通过合理设计天线位置, 就能得到一个很长的阵列导向矢量, 从而极大地提高杂波了杂波分辨率; 同时, 相对于单发多收而言, 多发多收系统提高了系统自由度, 更加有利于 STAP 杂波抑制。

目前, 国外已有一些 SAR 雷达使用 STAP 算法对动目标进行检测^[7], 比较典型的是德国的 PAMIR (Phased Array Multi-functional Image Radar) 雷达^[8]。PAMIR 雷达使用多通道相控阵天线, 具有很高的操作灵活性, 能实现多种工作模式, 包括条带、扫描、聚束、INSAR、ISAR 成像以及 MTI 等。PAMIR 雷达的一个重要工作模式是动目标检测、测速和定位, 使用空时自适应(STAP)信号处理算法,

在频域完成杂波抑制后进行动目标检测。而对星载 SAR, 由于当前天线的限制, 难以做到 3 个或 3 个以上通道。比较先进的星载 SAR 系统, 比如 TerraSAR-X^[9]和 RadarSATA-2^[10]在沿航迹向仅仅只有两个通道, 使用 ATI 技术或者 DPCA 技术完成动目标检测。但是随着天线技术向轻量化、小体积方向的发展, 在不久的将来, 多通道星载 SAR 将成为可能。

本文基于空时自适应信号处理算法对多发多收星载 SAR 动目标检测进行了研究, 首先建立了星载 MIMO-SAR 空时导向矢量模型, 在比较多种空时自适应处理算法的基础上, 结合星载 SAR 工作模式的特点, 使用比较适合于星载 SAR 的空频自适应处理算法, 在频域完成杂波抑制, 实现动目标检测。仿真分析表明, 空频自适应处理算法适用于多发多收星载 SAR 动目标检测。

2 星载 MIMO-SAR 空时导向矢量模型

假设 MIMO-SAR 使用 M 个阵元发射 M 个正交信号, N 个阵元接收回波, 雷达每个相参脉冲间隔 CPI 内包含 L 个脉冲, 以脉冲重复频率 PRF 发射脉冲信号, 天线在每个脉冲重复周期内接收照射范围内的 K 个距离单元采样, 从而 MIMO-SAR 在每个 CPI 内得到 $M \times N \times K \times L$ 个复基带采样复数据。天线发射和接收示意图分别如图 1 和图 2 所示。

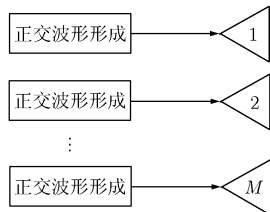


图 1 发射机示意图

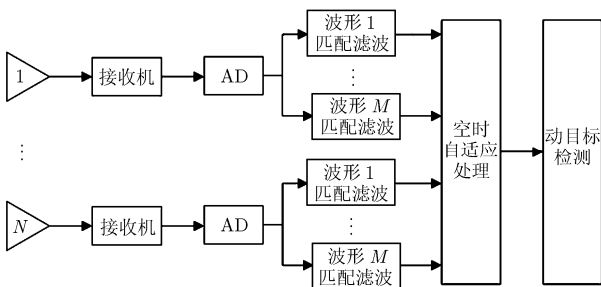


图 2 接收机示意图

对第 i 个距离门, 接收到的空时 2 维采样信号表示成 $MNL \times 1$ 维空时列矢量为

$$\mathbf{s} = [\mathbf{s}_0^T, \mathbf{s}_1^T, \dots, \mathbf{s}_{M-1}^T]^T \quad (1)$$

其中 \mathbf{s}_k 为第 k 个发射波形对应的空时导向矢量。

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{b}_k \otimes \mathbf{a}_k \quad (2)$$

其中 \mathbf{b}_k 为对应的时间导向矢量, 表示雷达与目标之间多普勒频移的信息; \mathbf{a}_k 为对应的空间导向矢量, 表示目标信号波达方向的信息。

当有干扰存在时, 接收信号矢量 \mathbf{x} 可以表示为

$$\mathbf{x} = \mathbf{s} + \mathbf{c} + \mathbf{j} + \mathbf{n} \quad (3)$$

其中 \mathbf{s} 为信号矢量, \mathbf{c} 为杂波矢量, \mathbf{j} 为干扰信号矢量, \mathbf{n} 为噪声矢量, 上述矢量均可以表示为 $MNL \times 1$ 维空时列矢量。

MIMO-SAR 与常规的 SISO-SAR 或者 SIMO-SAR 主要不同在于导向矢量的不同, 空时导向矢量多了发射导向矢量一项, 从而可以利用更多的空间自由度提高空间分辨率。

3 空时自适应信号处理算法

STAP 抑制杂波的基本思想是在高斯杂波背景加确知信号的模型下, 根据某一最佳准则, 通过对空时 2 维信号进行自适应处理, 达到最佳输出信噪比^[11-13]。对于常规的机载预警雷达, 由于相干处理时间短, 可以假设相干积累时间内雷达阵列和散射体之间的几何关系不变, 对于运动目标, 方位-多普勒轨迹是一个点; 但是对于星载 SAR, 由于合成孔径时间长, 相干处理时间也较长, 需要考虑多普勒平方相位项和慢时间的 DOA 矢量, 在一个合成孔径时间内, 星载多通道 SAR 的地杂波和运动目标回波模型都包含二次相位项, 运动目标的方向-多普勒轨迹为直线。如果直接使用预警雷达的 STAP 技术对多通道星载 SAR 杂波进行抑制, 效果很不佳。

3.1 STAP 常用算法

STAP 常用算法可以分为时域 STAP 和频域 STAP^[11-14]。时域 STAP 算法有 MVDR 波束形成算法和特征相消算法(Eigen Canceler, EC)等。MVDR 算法能使信噪比 SNR 达到最优, 同时在虚警概率一定的情况下检测概率达到最大。EC 算法的最佳权值为杂波和噪声组成的空时 2 维协方差矩阵的最小特征值所对应的特征矢量。时域 STAP 处理, 需要对杂波协方差矩阵求逆, 或对协方差矩阵进行特征值分解, 运算量很大。另外, 由于多通道星载 SAR 回波数据方位向相干脉冲数目比较大, 为满足时域 STAP 处理的条件, 需要将方位向回波数据分成很多段, 即使使用空域降维处理, 滤波器权值的计算也还需要通过对降维后的杂波协方差矩阵求逆或特征值分解, 计算量也很大。因此总的来说, 在理想情况下, 时域 STAP 均可以获得近似最优的杂波抑制性能, 但是不适用于实时应用, 对于大阵列和长

的回波序列, 需要通过 1 维子空间的变换减小计算量, 从而促进实时处理^[15]。

针对星载 SAR 回波数据具有方位向相干脉冲数据比较大, 通道数目相对较小的特点, 采用空间-频率域部分自适应处理算法, 能有效并快速地完成多通道星载 SAR 的杂波抑制^[14], 即空频自适应处理算法(SFAP)。

3.2 空频自适应处理算法(SFAP)

空频自适应处理杂波抑制技术(SFAP)是 STAP 的频域形式, 利用了多通道 SAR 回波数据具有方位向相干脉冲数据较大, 通道数目相对较少的特点, 信号相干处理时间足够大, 回波信号在不同频率上的傅里叶变换是渐进独立的, 可以忽略不同多普勒通道上的交叉项, 在每一多普勒单元进行杂波抑制, 将数据变换到阵元-多普勒域进行自适应滤波^[14]。

多通道星载 SAR 采用 SFAP 抑制杂波时, 流程图如图 3 所示。

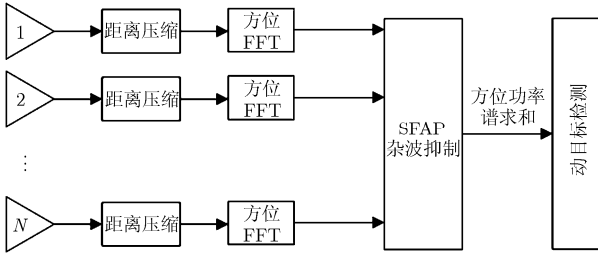


图 3 多通道星载 SAR 采用 SFAP 抑制杂波

首先将 N 个通道的回波信号进行距离压缩, 再方位 FFT 到距离多普勒域, 假设每个通道的数据大小为 $N_r \times N_a$, 有 N_r 条方位线, 用 $\mathbf{x}_i(t)$ 表示第 i 条方位线的数据, $i = 1, 2, \dots, N_r$ 。

每一条方位线对应着 N_a 个 $N \times N$ 维的谱密度矩阵 $\mathbf{C}_i(\mathbf{f}_m)$, 其中 f_m 为方位向对应的离散频率, 假设脉冲重复频率为 PRF, 那么

$$f_m = \frac{m}{N_a} \text{PRF}, \quad m = 1, 2, \dots, N_a \quad (4)$$

因此谱密度矩阵的个数为 $N_a \times N_r$ 。

每个 $\mathbf{C}_i(\mathbf{f}_m)$ 矩阵的估计以时域的协方差矩阵估计类似, 也由被检测单元附近的杂波空频矢量 $\mathbf{y}_i(\mathbf{f}_m)$, $i = 1, 2, \dots, N_r$ 及其共轭的乘积平均而得, 估计公式为

$$\tilde{\mathbf{C}}_i(\mathbf{f}_m) = \frac{1}{L_r} \sum_{j=0}^{j=L_r-1} \mathbf{y}_{i+j-L}(\mathbf{f}_m) \mathbf{y}_{i+j-L}^H(\mathbf{f}_m) \quad (5)$$

根据估计得到的谱密度矩阵, 在被检测的距离门上进行自适应滤波, 滤波函数为 $\tilde{\mathbf{C}}_i(\mathbf{f}_m)$, 频域的最优加权为

$$\mathbf{W}_F = \tilde{\mathbf{C}}_i^{-1}(\mathbf{f}_m) \mathbf{S}_F(\mathbf{f}, \theta) \quad (6)$$

其中 \mathbf{S}_F 为频域信号导向矢量。

运动阵列对参数为 θ 的运动目标的敏感性可表示为

$$\text{SCNR}(\theta) = \mathbf{S}^H(\mathbf{f}_m, \theta) \mathbf{C}_Q^{-1}(\mathbf{f}_m) \mathbf{S}(\mathbf{f}_m, \theta) \quad (7)$$

由于信号矢量近似正比于 N 个接收单元的波达方向矢量, 只有那些频率为 f_m 和相应于 f_m 方向的 $\mathbf{a}(u)$ 对应的杂波信号被抑制, 因此滤波函数为

$$\text{SCNR}(\theta) = \mathbf{a}^H(u) \mathbf{C}_Q^{-1}(\mathbf{f}_m) \mathbf{a}(u) \quad (8)$$

假设检验参数为 θ 的运动目标, 设置的检测变量为 T , 最优检测为

$$T(\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_M) = \left| \sum_{m=1}^M \mathbf{S}^H(\mathbf{f}_m, \theta) \mathbf{C}_Q^{-1}(\mathbf{f}_m) \mathbf{X}(\mathbf{f}_m, \theta) \right|^2 \quad (9)$$

式(9)的过程为先通过 $\mathbf{C}_Q^{-1}(\mathbf{f}_m) \mathbf{X}(\mathbf{f}_m, \theta)$ 处理完成杂波抑制, 然后与 $\mathbf{S}^H(\mathbf{f}_m, \theta)$ 相乘完成目标匹配, 其中由于 $\mathbf{S}^H(\mathbf{f}_m, \theta)$ 与运动目标的参数 θ 有关。

4 基于特征值分解的空频自适应处理算法

在文献[16]中, 介绍了基于特征值分解的空频自适应 SFAP 处理算法, 该算法已成功应用于德国的 PAMIR 雷达。基于特征值分解的 SFAP 算法与 SFAP 相似, 也是利用多通道 SAR 回波数据方位向相干脉冲数据较大, 通道数目相对较少的特点, 信号相干处理时间较大, 回波信号在不同频率上傅里叶变换渐进独立的性质, 在频域完成杂波抑制, 但是杂波抑制滤波器通过基于多普勒域特征空间投影得到。

首先估计出每个多普勒频率的谱密度矩阵

$$\tilde{\mathbf{C}}_i(\mathbf{f}_m) = \frac{1}{L_r} \sum_{j=0}^{j=L_r-1} \mathbf{y}_{i+j-L}(r, \mathbf{f}_m) \mathbf{y}_{i+j-L}^H(r, \mathbf{f}_m) \quad (10)$$

其中 $\mathbf{y}_{i+j-L}(r, \mathbf{f}_m)$ 为接收信号距离向预处理(包括通道定标和距离压缩)后, 距离为 r 、多普勒频率为 f_m 的信号组成的矢量。

由于距离门个数一般比较大, 上述的谱密度矩阵随距离变化很小。杂波的一个基本性质是在最优条件下, 杂波被定义在一维子空间中, 因此杂波加噪声的谱密度矩阵可以用式(11)表示:

$$\tilde{\mathbf{C}}_i(\mathbf{f}_m) = \gamma(\mathbf{f}_m) \mathbf{d}(u(\mathbf{f}_m)) \mathbf{d}^*(u(\mathbf{f}_m)) + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{d}(u(\mathbf{f}_m))$ 为多普勒频率 f_m 所对应的方向 $u(\mathbf{f}_m)$ 的 DOA 矢量, σ^2 为噪声协方差矩阵, $\gamma(\mathbf{f}_m)$ 为以多普勒频率 f_m 有关的复常数。

通过将杂波投影到与杂波子空间正交的空间上来抑制杂波, 因此基于特征矢量子空间投影的杂波滤波器矩阵 $\mathbf{P}(\mathbf{f}_m)$ 为

$$\mathbf{P}(f_m) = \mathbf{I} - \mathbf{v}(f_m)\mathbf{v}^*(f_m) \quad (12)$$

其中 $\mathbf{v}(f_m)$ 为谱密度矩阵最大特征值所对应的特征矢量。

滤波器的输出为

$$Z^{(f)}(r, f_m) = \mathbf{S}^H(r, f_m)\mathbf{P}(f_m)\mathbf{X}(r, f_m) \quad (13)$$

该 SFAP 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, 可以看出有一个比较大的特征值, 该特征值与其他特征值之和的差别决定了使用该投影子空间算法杂波抑制的性能; 差别越大, 杂波抑制效果越明显; 反之, 杂波抑制效果差。

使用基于特征值分解的 SFAP 算法时, 谱密度矩阵特征值随多普勒频率的分布如图 4 所示。

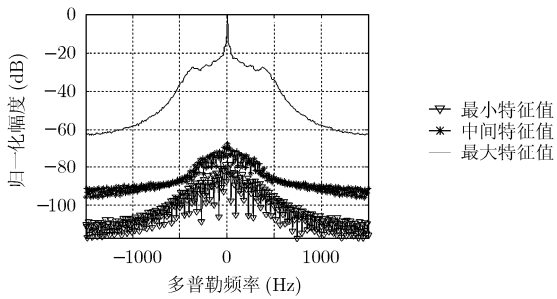


图 4 估计的谱密度矩阵特征值随多普勒频率分布

图 4 中, 实线为最大特征值曲线, 其他两个曲线分别为中间特征值曲线和最小特征值曲线。由图 4 中特征值随多普勒频率变化的曲线, 可知最大特征值曲线存在一个最大值, 对应杂波信号, 杂波谱在零频附近, 杂波抑制性能通过比较最大特征值与其余特征值之和的比值来估计, 并且随着多普勒频率的变化而变化。

5 仿真分析

假设系统为 3 发 3 收 MIMO-SAR, 使用相控阵

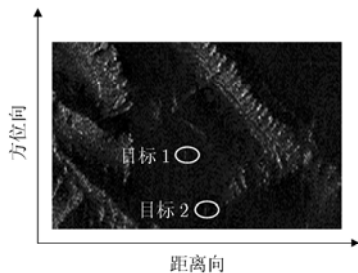


图 5 仿真使用的场景和动目标图像

天线, 仿真参数如表 1。

表 1 仿真参数

地球半径 $R_e = 6377$ km	轨道高度 $h = 800$ km
卫星速度 $v_a = 7467.4$ m/s	距离分辨率 $\rho_r = 3$ m
方位分辨率 $\rho_a = 3$ m	脉冲重复频率 PRF = 3000 Hz
方位向发射子孔径数目 $N_a = 3$	方位向接收子孔径数 $N_a = 3$
方位向子孔径长度 $d_a = 5$ m	方位向天线总长度 $D_a = 15$ m

在地面场景中, 仿真加入两个动目标, SCR=8.28 dB, CNR=10 dB, 场景图像如图 5, 是一片山地区域。

两个动目标所在距离门分别为 164 和 189。图 6 表示 SFAP 杂波抑制前某一个通道的距离-多普勒谱和方位向功率谱求和结果:

由图 6 可见, 方位向的功率谱求和在干扰信号和运动目标所在的距离单元处都形成了尖峰, 杂波信号在距离-多普勒域能量分布开来, 动目标信号的频谱完全被杂波所掩盖, 无法区分出动目标。

使用基于特征值分解的空频自适应处理算法进行杂波抑制, 图 7 为杂波抑制后的距离多普勒谱和方位向功率谱求和结果。

显然, SFAP 可以有效地抑制杂波谱, 极大地减小了干扰信号的影响, 在距离-多普勒内只剩余动目标的信息和少量残留的杂波信息加噪声信息。动目标所在距离门很容易检测出。

可见, 杂波抑制前, 运动目标、杂波以及噪声在距离-多普勒域混叠, 方位向的功率谱求和后动目标所在距离门的谱能量和杂波谱能量无法区分; 但是使用 SFAP 进行杂波抑制后, 动目标所在距离门的谱能量相比残留杂波有明显的区别, 在方位向功率谱求和图中干扰信号得到极大地抑制。杂波抑制后的距离-多普勒信号进行方位向匹配滤波, 得到动目标信号的成像结果如图 8。

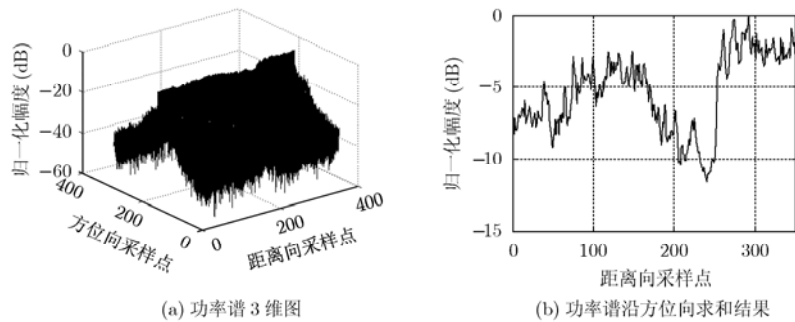


图 6 杂波抑制前某一个通道的距离-多普勒谱

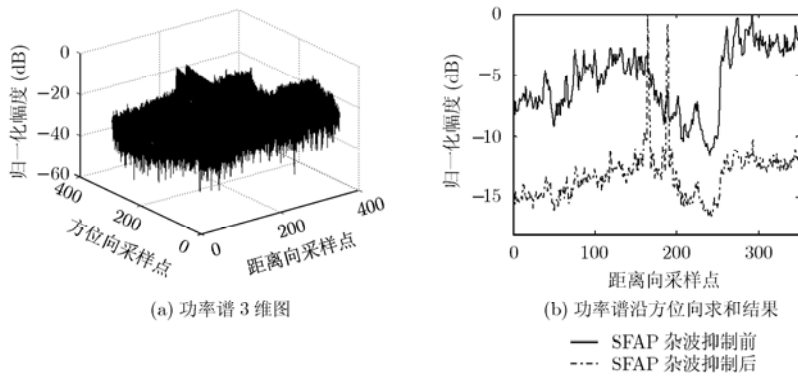


图 7 杂波抑制后某一个通道的距离-多普勒谱

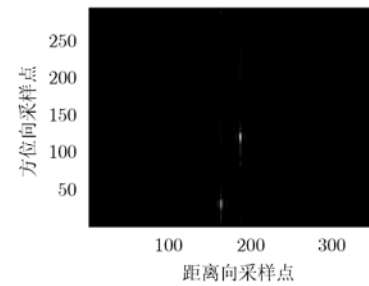


图 8 方位向匹配滤波后动目标信号的成像结果

此时动目标成像位置与理论值一致。由于径向速度的影响, 偏离了正确的方位位置, 所以在进行方位压缩之前, 需要估计动目标的多普勒中心频率和多普勒调频斜率, 在动目标方位向匹配滤波函数中对其进行补偿, 以使运动目标出现在正确的方位位置。并使用时频分析方法对动目标多普勒中心频率和多普勒调频斜率的进行估计。

6 结束语

时空自适应处理能有效地抑制杂波, 限制地提高 SCNR, 从而提高动目标检测的性能。星载 MIMO-SAR 由于使用多个孔径发射正交编码信号, 多个孔径接收回波, 通过回波分离后, 增加了空间自由度, 同时针对星载 SAR 回波数据具有方位向相干脉冲数据比较大, 通道数目相对较小的特点, 采用空间-频率域部分自适应处理算法, 有效并快速地完成多发多收星载 SAR 的杂波抑制和动目标检测。

参考文献

- [1] Wang Wen-qing. Applications of MIMO technique for aerospace remote sensing[C]. Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, 2007: 1-10.
- [2] Wang Wen-qing, Peng Qi-cong, and Cai Jing-ye. Novel MIMO SAR for urban remote sensing applications[C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, 2008: 139-144.
- [3] 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.
- [4] 戴喜增. MIMO 雷达分集检测和宽带合成的理论与方法研究[D]. [博士学位论文], 清华大学电子系, 2008.
- [5] 宋岳鹏, 杨汝良. 应用多发孔径实现高分辨率宽测绘带的合成孔径雷达研究[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(9): 2110-2113.

Song Yue-peng and Yang Ru-liang. Study of high resolution,

- wide swath synthetic aperture radar using multiple transmit-receive apertures[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(9): 2110-2113.
- [6] 宋岳鹏. 多发孔径合成孔径雷达系统技术研究[D]. [博士学位论文], 中科院电子所, 2008.
- [7] Ender J H G. Space-time adaptive processing for synthetic aperture radar[C]. IEE Colloquium, London, 1998: 611-618.
- [8] Ender J H G and Brenner A R. PAMIR-A wideband phased array SAR MTI system[J]. *IEE Proceedings Radar Sonar Navigation*, 2003, 150(3): 165-172.
- [9] Suess M, Riegger S, and Pita W, et al. TerraSAR-X design and performance[C]. EUSAR2002, Kohn, Germany, 2002: 49-52.
- [10] Nohara T J, Weber P, and Premji A, et al. SAR-GMTI processing with Canada's RadarSat-2 satellite[C]. Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium, Lake Louise, Canada, 2000: 379-384.
- [11] Klemm R. Introduction to space-time adaptive processing[J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(1): 5-12.
- [12] BarBarossa S and Farina A. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signals[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic System*, 1994, 30(2): 341-358.
- [13] Farina A and Timmoneri L. Real-time STAP technique[J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(1): 13-22.
- [14] 康雪艳. 机载 SAR 地面动目标检测成像技术研究[D]. [博士学位论文], 中科院电子所, 2004.
- [15] Klemm R. Real-time adaptive airborne MTI-I space-time processing radar[C]. CIE International Conference, Beijing, China, 1996: 755-760.
- [16] Delphine C and Ursula S. First experimental Scan MTI results achieved with the multi-channel SAR system PAMIR[C]. EUSAR,Ulm, 2004: 521-524.

张晓光: 男, 1975 年生, 助理研究员, 研究方向为信号与信息处理.

刘祥峰: 男, 1979 年生, 工程师, 研究方向为信号与信息处理.

付 珉: 男, 1974 年生, 研究员, 研究方向为信号与信息处理.