

## 基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 技术研究

沈明威 朱岱寅 朱兆达 叶少华  
(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

**摘要:** 该文研究了和/差波束干涉 SAR/GMTI 技术在通道不平衡条件下地杂波对消问题。文中阐述了和/差波束干涉 SAR/GMTI 的原理, 推导了理想条件下地杂波空域对消因子。实际系统中, 由于存在通道幅相不一致等误差, 直接空域对消并不能有效抑制地杂波。该文研究了基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 方案, 通过二维信号子空间处理自适应地校正通道误差, 进而对地杂波进行空域对消。仿真实验表明该方案对系统误差的敏感度显著下降, 具有很好的鲁棒性, 更适合于工程实施。

**关键词:** 地面动目标检测; 和/差波束; 通道误差; 杂波对消; 信号子空间处理

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0019-04

## Research on SAR/GMTI Using $\Sigma\Delta$ -Beams Based on Signal Subspace Processing

Shen Ming-wei Zhu Dai-yin Zhu Zhao-da Ye Shao-hua  
(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,  
Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In this paper, a GMTI method for  $\Sigma\Delta$ -beams is investigated, which is achieved by incorporating the along-track interferometric SAR/ GMTI technique with signal subspace processing. The principle of along-track interferometric SAR/ GMTI is analyzed, and the spatial cancellation matrix used to preprocess the  $\Sigma$  image is derived. In practice, because of the channel errors (gain and phase error), a two-dimensional signal subspace processing method is used, which can blindly calibrate the sensors error and achieve the moving targets detection. The simulation results are presented to demonstrate the validity of this scheme.

**Key words:** Ground moving targets detection;  $\Sigma\Delta$ -Beams; Channel errors; Clutter cancellation; Signal subspace processing

### 1 引言

地面慢动目标显示(GMTI)是机载雷达迫切需要具备的一项功能。机载雷达 GMTI 的主要困难在于地面慢动目标信号在时、空、频域都淹没在强大的主瓣杂波中。目前实用的机载雷达 GMTI 技术是机载 SAR 沿航迹干涉动目标指示技术。它利用相邻两路 SAR 图像对应像素存在相位差, 此相位差对固定目标与动目标不同这样一个事实, 把相邻两路 SAR 图像逐个像素空域对消来抑制地杂波, 提高动目标信杂比, 使动目标突显出来。美国已成功研制出具有干涉 SAR/GMTI 功能的 JSTARS 和 AN/APG-76 雷达系统<sup>[1]</sup>。国内对此技术也进行了深入的研究<sup>[2]</sup>。文献[3]将双端口干涉 SAR/GMTI 技术运用到理想相位单脉冲和/差波束天线中, 提出了和/差波束干涉 SAR/GMTI 方案。

和/差波束干涉 SAR/GMTI 方案, 实质上仍属于沿航迹干涉 SAR 技术。目前我国在研的军用机载 SAR 是机载火控雷达的一个工作模式, 而在研的和现有的机载火控雷达都是使用机械扫描天线, 采用相位单脉冲体制。因此研

究基于相位单脉冲天线的和/差波束干涉处理技术来抑制主杂波, 进而实现对淹没在强杂波背景中的慢动军事目标进行检测, 具有十分重要的现实意义。

实际雷达系统不可避免存在误差, 如通道幅相不一致, 仍用对消因子对和、差通道两幅 SAR 图像直接进行空域杂波对消, 主杂波对消结果必然下降。因此, 如何在目前工程上能保证的系统精度条件下, 通过改进和/差波束干涉 SAR/GMTI 方案, 有效抑制地杂波, 实现 GMTI, 这是本文研究的主要内容。

本文第 2 节给出基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 原理框图; 第 3 节推导空域对消因子; 第 4 节分析信号子空间处理过程; 第 5 节提供和/差波束干涉 SAR/GMTI 方案与改进方案的计算机仿真结果; 第 6 节给出全文结论。

### 2 基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 原理框图

基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 原理框图如图 1 所示。

第 1 步 和/差波束天线分别接收回波, 两路均进行

SAR 成像处理, 产生同一照射区域的两幅 SAR 图像。

SAR 处理采用线性 R-D 成像算法<sup>[4]</sup>。

第 2 步 和通道 SAR 图像修正。理想通道平衡时, 两幅 SAR 图像中固定目标对应像素存在确定的幅度与相位关系, 可以利用空域对消因子  $W(R, f_d)$  修正和通道 SAR 图像, 使固定目标在两幅 SAR 图像上完全一致。

第 3 步 信号子空间处理。实现由于通道不平衡引起的和、差通道 SAR 图像幅度、相位误差校正。

第 4 步 地杂波空域对消, 进行动目标检测。

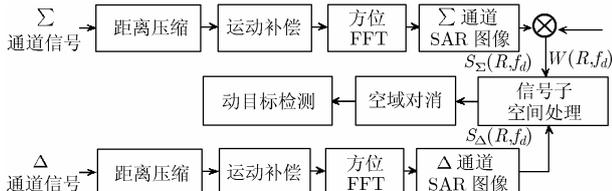


图 1 基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 原理框图

### 3 和/差波束天线空域对消因子计算

和/差波束天线区域成像的几何关系如图 2 所示。图中,  $A$  和  $B$  为两个子孔径天线的相位中心, 间距为  $d$ 。  $C$  为全孔径天线相位中心。  $O$  是成像区参考点, 位于波束中心线上。  $R_0$  是  $C$  到成像区心的距离,  $R_1$  为  $A$  和  $B$  到成像区中心的距离,  $R_2$  是  $C$  到成像区内  $P$  点的距离,  $R_3$  与  $R_4$  分别为  $A$  和  $B$  到成像区内  $P$  点的距离。天线波束斜视角为  $\theta_s$ , 载机速度为  $V_a$ 。

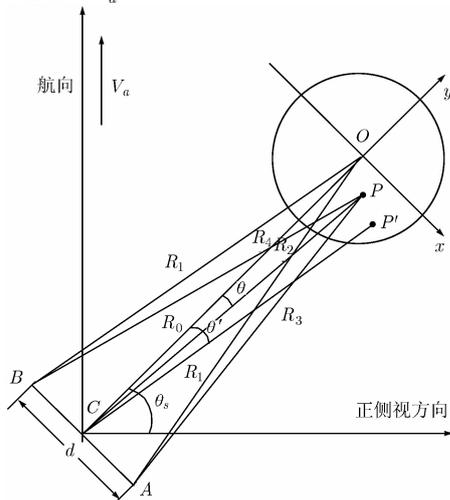


图 2 和/差波束干涉 SAR/GMTI 成像几何关系

设地面散射点  $P$  相对于天线波束指向的方位角为  $\theta$ ,

经距离压缩, 和、差通道接收到的  $P$  点信号为:

$$\begin{aligned} S_{\Sigma} &= A_1 e^{j\psi_1} \left\{ D \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} (R_2 + R_3) \right] + D \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} (R_2 + R_4) \right] \right\} \\ S_{\Delta} &= A_2 e^{j\psi_2} \left\{ D \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} (R_2 + R_3) \right] - D \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} (R_2 + R_4) \right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $S_{\Sigma}$  和  $S_{\Delta}$  分别表示和路与差路的信号;  $D$  为  $P$  点复反射系数;  $A_1$ ,  $\psi_1$ ,  $A_2$  和  $\psi_2$  分别为和、差通道的增益系数

与相位延迟。

考虑到  $R_3 - R_4 \approx d \sin \theta$ , 以及和、差两路都以成像区中心为参考点作运动补偿, 式(1)可进一步写为

$$\begin{aligned} S_{\Sigma} &= 2A_1 e^{j\psi_1} D \cdot \cos \left[ \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right] \exp \left[ -j \frac{\pi}{\lambda} (2R_2 + R_3 + R_4 - 4R_0) \right] \\ S_{\Delta} &= -j2A_2 e^{j\psi_2} D \cdot \sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right] \exp \left[ -j \frac{\pi}{\lambda} (2R_2 + R_3 + R_4 - 4R_0) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

理想条件下  $A_1 = A_2$ ,  $\psi_1 = \psi_2$ 。和、差通道接收到的同一散射点的回波信号具有确定的幅度与相位关系<sup>[3]</sup>:

$$\Delta_{S_{\Delta}} = S_{\Delta} / S_{\Sigma} = -j \tan \left( \left( \pi d / \lambda \right) \sin \theta \right) \quad (3)$$

和、差通道接收到的信号经 SAR 聚焦处理, 输出的 SAR 图像是复原的地面散射特性。根据上述分析, 和、差两路 SAR 图像对应像素存在确定的幅相关系。因此可利用此幅相关系对逐个像素进行空域对消, 如下式所示:

$$S_1(R, f_d) = S_{\Sigma}(R, f_d) W(R, f_d) - S_{\Delta}(R, f_d) \quad (4)$$

其中  $S_{\Sigma}(R, f_d)$  为和波束 SAR 图像,  $W(R, f_d)$  为空域对消因子,  $S_{\Delta}(R, f_d)$  为差波束 SAR 图像。可求出空域对消因子为

$$\begin{aligned} W(R, f_d) &= -j \tan \left( \left( \pi d / \lambda \right) \sin \theta \right) \\ &= -j \tan \left( \pi d f_d / (2V_a \cos \theta_s) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

理想条件下, 上述对消过程可完全抑制固定地杂波。动目标由于径向速度引入附加的多普勒频率, 在 SAR 图像中其方位位置会偏离真实位置, 上述空域对消对动目标影响很小, 因此动目标的信杂比得以提高。在此基础上, 采用简单的 CFAR 检测技术就可检测出落入主杂波区域的慢动目标。

### 4 信号子空间处理

在本节, 称经空域对消因子补偿后的和波束 SAR 图像为修正和波束 SAR 图像, 记为  $f_1(R, f_d)$ ; 差波束 SAR 图像记为  $f_2(R, f_d)$ 。即

$$f_1(R, f_d) = S_{\Sigma}(R, f_d) \cdot W(R, f_d) \quad (6)$$

$$f_2(R, f_d) = S_{\Delta}(R, f_d) \quad (7)$$

实际中, 由于存在通道不平衡, 空域对消后, SAR 图像中静止目标输出并不为零。

$$\begin{aligned} S_1(R, f_d) &= f_1(R, f_d) - f_2(R, f_d) \\ &= \left( \left( A_1 / A_2 \right) \cdot e^{j(\psi_1 - \psi_2)} - 1 \right) \cdot f_2(R, f_d) \end{aligned} \quad (8)$$

通道不平衡引起的 SAR 图像幅度、相位误差可表示为<sup>[5,6]</sup>

$$f_1(R, f_d) = f_2(R, f_d) ** h(R, f_d) \quad (9)$$

其中  $**$  代表二维卷积运算,  $h(R, f_d)$  为通道误差引起二维空域冲激函数。将 SAR 图像划成小块, 在各子块内通道误差近似不变。因此估计出  $h(R, f_d)$ , 就能补偿通道误差, 实现杂波完全对消。

$$\hat{f}_1(R_i, f_{d_j}) = \sum_{m=-n_r}^{n_r} \sum_{n=-n_{f_d}}^{n_{f_d}} h_{mn} f_2(R_i - m\Delta r, R_i, f_{d_j} - n\Delta f_d) \quad (10)$$

式中  $\Delta r$  和  $\Delta f_d$  分别为图像距离维和方位维采样间隔， $h_{mn}$  为二维冲激函数  $h(R, f_d)$  的系数， $N_r = 2n_r + 1$ ， $N_{f_d} = 2n_{f_d} + 1$  为  $h(R, f_d)$  的阶数。

信号子空间处理就是根据最小均方差准则的正交性原理，将  $f_1(R_i, f_{d_j})$  子块投影到  $f_2(R_i, f_{d_j})$  子块及周围  $N - 1$  子块张成的线性空间  $\Psi$  上，直接估计  $\hat{f}_1(R_i, f_{d_j})$ ， $N = N_r \cdot N_{f_d}$ 。

$$\Psi = \left[ f_2(R_i - m\Delta r, f_{d_j} - n\Delta f_d), \right. \\ \left. m = -n_r, \dots, n_r, n = -n_{f_d}, \dots, n_{f_d} \right] \quad (11)$$

由于 SAR 图像子块划分越小，误差估计越精确，但运算量显著增大。处理时发现，将 SAR 图像每个子块大小确定为 30 像素  $\times$  25 像素时，能有效对消杂波。对  $f_2(R_i, f_{d_j})$  子块及周围的  $N - 1$  子块，进行 Gram-Schmidt 正交化处理，形成  $N$  个标准正交基。由于 SAR 处理后，空域相关性降低，取  $n_r = 2$ ， $n_{f_d} = 1$ ，相应地  $N = 15$ 。因此，计算出  $f_1(R_i, f_{d_j})$  在这 15 个正交基上的投影，即可求得  $\hat{f}_1(R_i, f_{d_j})$ 。

经信号子空间处理后，两幅 SAR 图像中对应像素的幅相误差得到了校正。空域对消后，地杂波得到抑制， $\hat{f}_1(R_i, f_{d_j})$  就是检测出的慢动目标：

$$\hat{f}_2(R_i, f_{d_j}) = f_1(R_i, f_{d_j}) - \hat{f}_1(R_i, f_{d_j}) \quad (12)$$

### 5 仿真结果

为了便于比较，我们同时对两种方案进行计算机仿真，仿真采用的主要参数如下：雷达波长  $\lambda = 3.125\text{cm}$ ，子孔径间距  $d = 0.7\text{m}$ ，发射 LMF 信号带宽  $B = 10\text{MHz}$ ，发射信号时宽为  $\tau = 10\mu\text{s}$ ，载机速度  $V_a = 200\text{m/s}$ ，载机高度  $H = 6\text{km}$ ，成像距离  $R = 40\text{km}$ ，前斜视角  $\theta_s = 45^\circ$ ，SAR 图像距离、方位分辨率均为 15m。

仿真中在地面均匀设置固定点散射源模拟地杂波，点源反射率为复高斯随机变量，方差为 1，间距为  $5\text{m} \times 5\text{m}$ 。在坐标(200, 200)处设置一动目标 A，径向速度为 3m/s，反射强度为 1，因此对消前动目标信杂比为 0dB。

雷达检测通常根据干涉对消后的动目标信杂比与对消前动目标信杂比的比值，来衡量主杂波的抑制效果。比值越大，主杂波抑制越显著。

#### 5.1 无系统误差时的情况

系统无误差时，采用和/差波束干涉 SAR/GMIT 方案，把经空域对消因子修正后的和波束 SAR 图像与差波束 SAR 图像直接干涉空域对消，仿真结果如图 3 所示。图 3(a)，图 3(b)为修正和波束图与差波束图，图 3(c)为二者空域干涉对消图。由图 3(d)，可以看出对消后动目标信杂比提高了 20dB。

采用改进方案，将修正和波束 SAR 图像与差波束

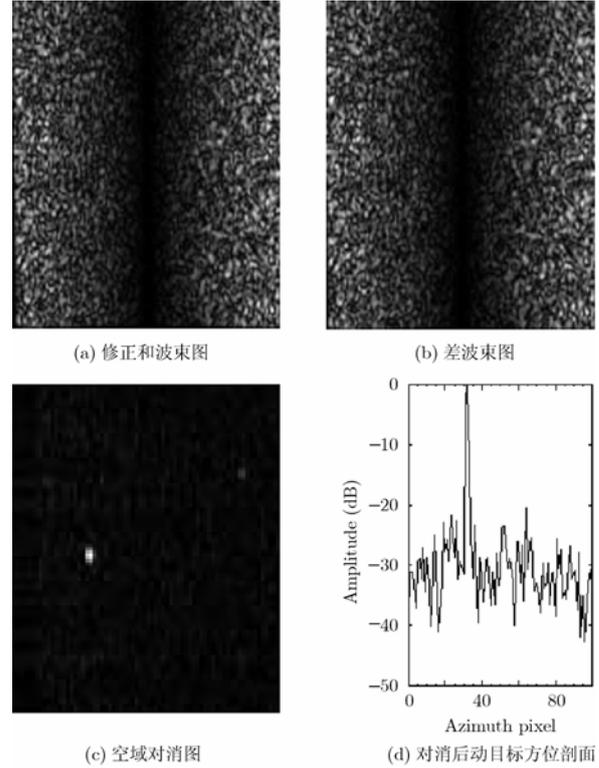


图 3 系统无误差时和/差波束干涉 SAR/GMTI 仿真结果

SAR 图像经信号子空间处理，再进行干涉空域对消，仿真结果如图 4 所示。图 4(a)，图 4(b)分别为经信号子空间处理后的修正和波束图、差波束图，图 4(c)为空域干涉对消图。显然理想条件下，两种方案都能有效抑制地杂波，动目标信杂比均提高了约 20dB，此时很容易检测慢动目标。

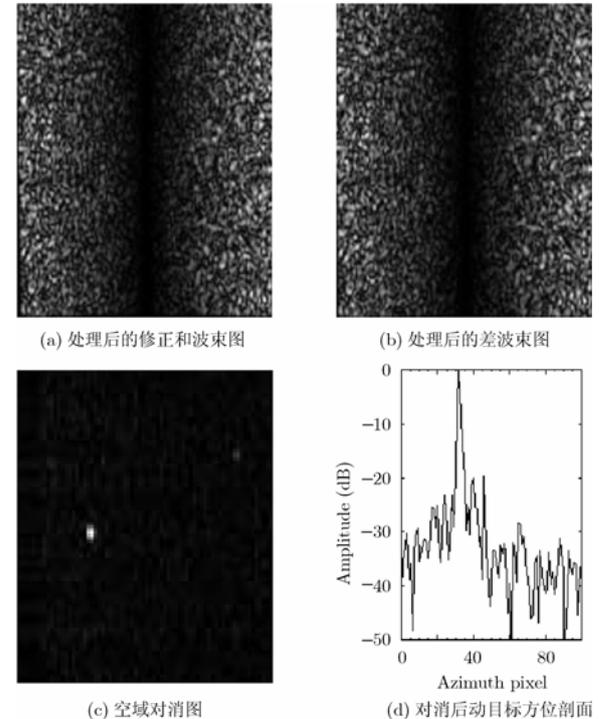


图 4 系统无误差时基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 仿真结果

#### 5.2 系统有误差时的情况

假定通道间不完全匹配，相邻通道间存在幅度误差为

3dB, 相位误差为  $5^\circ$ 。

图 5 为和差波束干涉 SAR/GMTI 方案的仿真结果。空域对消后, 杂波基本没有得到抑制, 动目标淹没在杂波中, 无法辨识。

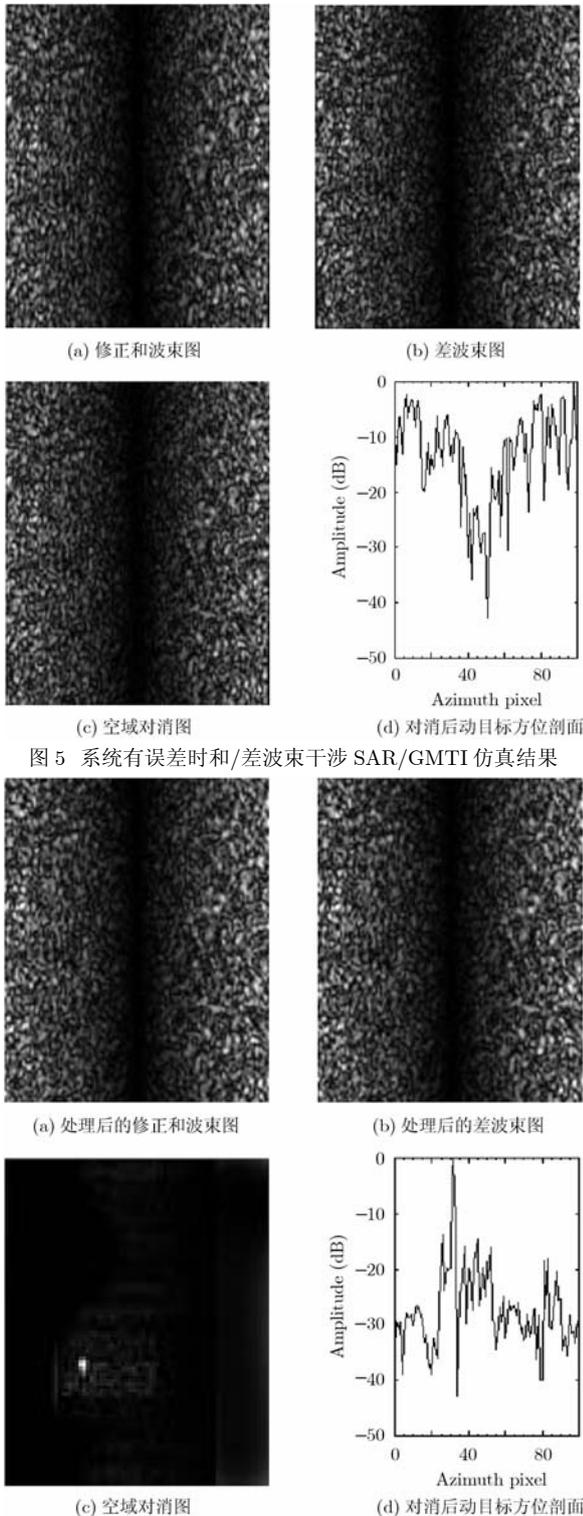


图 5 系统有误差时和/差波束干涉 SAR/GMTI 仿真结果

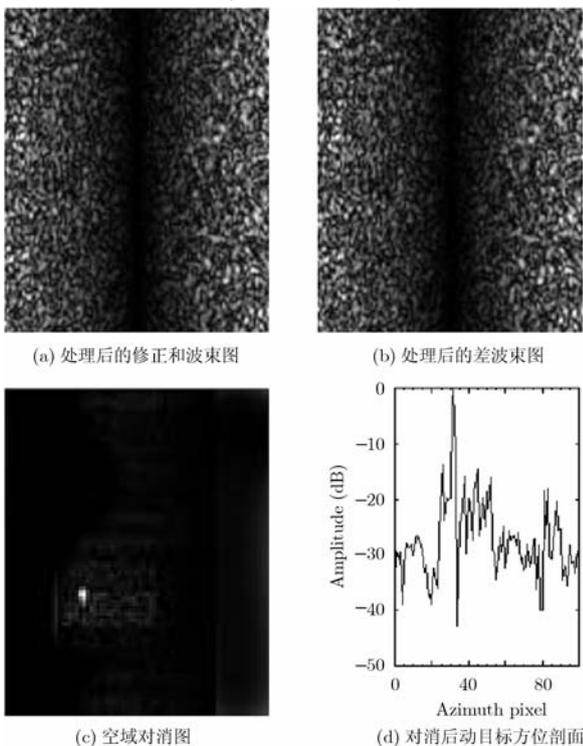


图 6 系统有误差时基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 仿真结果

图 6 为基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 方案的仿真结果。经信号子空间处理后, 空域对消很好地抑制了主杂波, 动目标信杂比提高了 15dB, 因而仍能检测慢动目标。

从上面的仿真结果可以看出, 改进前的方案对系统误差极为敏感; 而基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 方案, 具有很好的鲁棒性, 无论系统有无误差, 都可以获得很好的杂波对消效果。

## 6 结束语

通过以上的分析和仿真结果表明, 本文提出的基于信号子空间处理的和/差波束干涉 SAR/GMTI 方案在系统存在误差的情况下能可靠地抑制地杂波, 进而实现地面慢动目标检测。该方案相对于改进前而言具有很好的鲁棒性, 对系统误差不敏感, 对通道间的一致性要求较低, 因此易于工程实施。

## 参考文献

- [1] Tobin M. Real time simulations SAR/GMTI in a tactical airborne environment. Proc. of EUSAR, Koenigswinter, Germany, 1996: 63-66.
- [2] 朱岱寅, 朱兆达. 机载干涉 SAR/ISAR 对地慢速目标成像研究. 电子与信息学报, 2003, 25(5): 586-590.  
Zhu Dai-yin and Zhu Zhao-da. Studies of ground slow-moving target imaging by airborne interferometric. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(5): 586-590.
- [3] 叶少华. 机载 SAR 原始成像处理和干涉 SAR/GMTI 技术研究. [博士学位论文], 南京: 南京航空航天大学, 2002.
- [4] 朱岱寅, 朱兆达. 机载 SAR 斜视区域成像研究. 电子学报, 2002, 30(9): 1387-1389.  
Zhu Dai-yin and Zhu Zhao-da. Studies on airborne squint-looking SAR patch-mapping. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(9): 1387-1389.
- [5] Soumekh M. Moving targets detection and imaging using an X band-track monopulse SAR. *IEEE Trans. on AES*, 2002, 38(1): 315-333.
- [6] Soumekh M. Signal subspace fusion of uncalibrated sensors with application in SAR and diagnostic medicine. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1999, 8(1): 127-137.

沈明威: 男, 1981 年生, 博士, 研究方向为动目标检测和雷达信号处理。

朱岱寅: 男, 1974 年生, 副研究员, 研究方向为雷达成像和信号处理。

朱兆达: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号检测与处理。