

基于 CSI 处理的三通道机载 SAR 地面动目标检测

张绪锦^{1,2}, 张长耀², 朱兆达¹, 邓海涛²

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016; 2. 华东电子工程研究所, 安徽合肥 230031)

摘 要: 本文运用杂波抑制干涉的方法来提高系统处理时的杂波对消能力, 该方法通过在图像域直接补偿通道间相位差之后进行子图像间的两两对消, 并进行动目标的相位干涉, 以确定动目标的方位位置. 因而能有效地完成被地杂波掩盖的地面慢速运动目标的检测、测速及高精度定位. 最后给出了对部分实测数据采用 32 个方位脉冲相干积累对消后进行恒虚警检测的处理结果.

关键词: 地面动目标检测; 杂波抑制干涉; 恒虚警检测; 杂波对消

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 04-0789-05

Three Aperture Airborne SAR GMTD Based on CSI Processing

ZHANG Xu-jin^{1,2}, ZHANG Chang-yao², ZHU Zhao-da¹, DENG Hai-tao²

(1. Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: According to the characteristic of the radar system, this paper applied clutter suppression interferometry (CSI) processing to improve clutter cancellation ability of the system. The processing compensates the difference phases for each receive channel in image domain and makes clutter cancellation between sub images. According interfered phase of moving target to determine its azimuth location. So the approach can perform the detection, radial velocity estimation and accurate relocation of moving targets masked by ground clutter. Finally, show part processing results of the actual measured data recorded from the SAR/MTI system.

Key words: ground moving target detection (GMTD); clutter suppression interferometry (CSI); CFAR process; clutter cancellation

1 引言

合成孔径雷达(SAR)作为一种高科技的侦察手段, 在军事应用场合中除了获得高分辨率的图像外, 还需要具有对地面运动目标和固定目标进行探测、定位、跟踪和分类的能力. 机载合成孔径雷达地面动目标检测面临的最大问题是机载雷达下视时较强的地杂波难以有效抑制, 针对战场感知雷达系统, 文献[1]提出了用干涉仪天线抑制地杂波的方法, 本文结合某试验雷达的具体情况, 采用杂波抑制干涉(CSI)的处理方法来提高系统的抑制杂波能力. CSI处理的主要优点是不受 DPCA 条件限制, 不需要自适应计算权矢量, 在图像域直接补偿通道间相位差并进行通道间的两两对消, 不影响对消后通道间的干涉相位. 仿真和实测数据的处理结果表明, CSI处理可以有效提高系统对地杂波的抑制能力和对目标的检测能力.

本实验雷达具有条带 SAR 成像、同时 SAR/MTI、广

域 MTI 和聚束 SAR 等多种工作模式. 当工作在条带和聚束模式时为全孔径收发; 而工作在同时 SAR/MTI 和广域 MTI 模式时为全孔径发射, 三个子孔径接收, 子孔径方位向的波束宽度为 3.9° , 三个子孔径天线的相位中心为等间隔的 $d = 0.533\text{m}$, 本文的重点是在同时 SAR/MTI 模式下的地面动目标检测.

2 机载 SAR/MTI 雷达的信号模型

三通道 SAR/MTI 雷达采集数据的几何模型如图 1 所示.

为论述方便, 我们定义载机平台的飞行航线方向(纵向)为 y 轴, 与之垂直的方向(横向)为 x 轴, 设飞行速度为 v , 飞行高度为 h , 天线沿平台飞行方向以等间距 d 排列有三个天线 A 、 B 、 C , θ 为天线中心点 B 对应的天线斜视角, γ 为天线波束中心下视角(为载机航线与飞行高度之间的夹角), $R_A(t)$ 、 $R_B(t)$ 和 $R_C(t)$ 分别为地面点目标 P 到雷达天线 A 、 B 、 C 的实时斜距, 其中 R

$= h/(\cos \gamma \cdot \cos \theta)$, 为 $t = 0$ 时 P 点到中间孔径 B 的距离. 由图中几何关系可推导出(过程略) t 时刻三个天线到发射波束覆盖场景内任一目标 P (运动或静止目标) 的距离, 经泰勒展开和菲涅耳近似后, 忽略时间 t 三次以上的高次项后分别近似为:

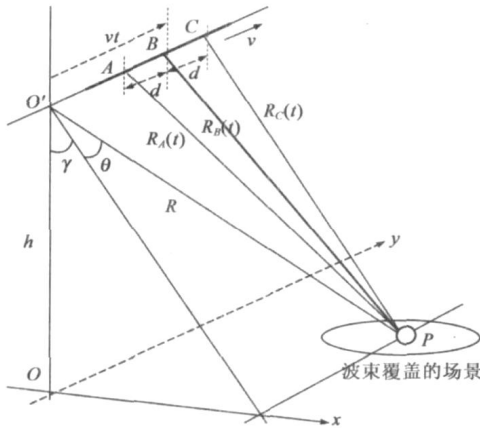


图 1 三孔径干涉 SAR/MTI 数据收集几何关系

$$R_B(t) \approx R - v \sin \theta \cdot t + \frac{v^2 \cos^2 \theta}{2R} t^2 + \frac{v^3 \sin \theta \cos^2 \theta}{2R^2} t^3 \quad (1)$$

$$R_A(t) \approx R_B(t) + \frac{d^2 + 2dR \sin \theta}{2R_B(t)} - \frac{vd}{R_B(t)} t \quad (2)$$

$$R_C(t) \approx R_B(t) + \frac{d^2 - 2dR \sin \theta}{2R_B(t)} + \frac{vd}{R_B(t)} t \quad (3)$$

其中, $|t| \leq \frac{T_s}{2}$, T_s 为合成孔径时间. 从上面三个式子中我们可以看到 $R_A(t)$ 、 $R_C(t)$ 实际上是由求解 $R_B(t)$ 后才能获得, 因此有必要对式(1)作进一步的分析, 在雷达运动的过程中, 由中间孔径 B 产生的相位延迟为:

$$\varphi(t) = -\frac{2\pi}{\lambda} [2R_B(t)] \quad (4)$$

由此引起的多普勒频率为:

$$f_d(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{2v \sin \theta}{\lambda} - \frac{2v^2 \cos^2 \theta}{\lambda R} t - \frac{3v^3 \sin \theta \cos^2 \theta}{\lambda R^2} t^2 \quad (5)$$

当 $t = 0$ 时, 多普勒中心频率为:

$$f_{dc} = f_d(t) \big|_{t=0} = \frac{2v \sin \theta}{\lambda} \quad (6)$$

$$\text{调频斜率: } f_{dr} = f'_d(t) \big|_{t=0} = -\frac{2v^2 \cos^2 \theta}{\lambda R} \quad (7)$$

调频变化率:

$$f_{dd} = f''_d(t) \big|_{t=0} = -\frac{6v^3 \sin \theta \cos^2 \theta}{\lambda R^2} \quad (8)$$

雷达在 SAR/MTI 工作模式下, 一般都是用于观察远距离区域目标和场景, 为战场指挥人员提供打击目标指示或进行打击后的效果评估, R_0 一般都很大, 斜视角 θ 很小, 因此 $f''_d(0)$ 的影响可以忽略. 由此而来式(5)的多普勒频率可以近似为:

$$f_a(t) \approx f_{dc} + f_{dr} \cdot t \quad (9)$$

同样中间孔径 B 的斜距 $R_B(t)$ 也可用 f_{dc} 和 f_{dr} 进一步简洁地表示为:

$$R_B(t) \approx R - \frac{\lambda f_{dc}}{2} t - \frac{\lambda f_{dr}}{4} t^2 \quad (10)$$

在获得了式(1)的简洁表达方式之后, 式(2)、(3) 也可以进一步简化. 现设发射信号的复信号模型为:

$$s_i(t) = \sum p(t - nT_p) \quad (11)$$

$$p(t) = \text{rect}\left[\frac{t}{\tau_p}\right] \cos[2\pi f_0 t + \pi b t^2] \quad (12)$$

其中, T_p 为脉冲重复周期, n 为合成孔径时间内的方位脉冲数, τ_p 为发射脉冲宽度, b 为发射信号的调频斜率, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数, 其取值在 $0 \leq t \leq \tau_p$ 时为 1, 其余为 0. 不考虑天线方向图加权因素, 接收信号经混频和正交相干检波后分别为:

$$S_B(t, \tau) = a \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_B(t)\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R_B(t)/C}{\tau_p}\right] \cdot \exp\left\{j\pi b \left[\tau - \frac{2R_B(t)}{C}\right]^2\right\} \quad (13)$$

$$S_A(t, \tau) = a \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_A(t) + R_B(t))\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - (R_B(t) + R_A(t))/C}{\tau_p}\right] \cdot \exp\left\{j\pi b \left[\tau - \frac{(R_B(t) + R_A(t))}{C}\right]^2\right\} \quad (14)$$

$$S_C(t, \tau) = a \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_C(t) + R_B(t))\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - (R_B(t) + R_C(t))/C}{\tau_p}\right] \cdot \exp\left\{j\pi b \left[\tau - \frac{(R_B(t) + R_C(t))}{C}\right]^2\right\} \quad (15)$$

其中: $\tau = t - nT_p$, a 为与目标散射特性有关的常数, C 为光速. 将式(10)代入式(13)后得:

$$S_B(t, \tau) = a \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - t_B}{\tau_p}\right] \cdot \exp\left\{j\pi b [\tau - t_B]^2\right\} \cdot \exp(j2\pi f_{dc} t) \cdot \exp(j\pi f_{dr} t^2) \quad (16)$$

由于 SAR/MTI 模式用于对远距离目标检测与成像, 且 $R_A(t) \approx R_B(t) \approx R_C(t) \gg d$, 因此在子驻留内可近似地认为 $t_A = t_B = t_C$, 另外, 为便于表示把各式中相同的常数项一并简记为 G . 这样一来(16)式就变成:

$$S_B(t, \tau) = G \cdot \exp[j(2\pi f_{dc} t + \pi f_{dr} t^2)] \quad (17)$$

同样, 经过代换化简等处理后可以得到另外两个式子类似的表示形式.

3 三通道间的杂波对消

三个子天线在飞行时接收到的回波信号存在恒定的时间间隔, 导致通道间存在多普勒频率偏差, 在生成三个子孔径各自的图像时需要连同由于平台运动产生

的线性调频项相位一起补偿掉,也就是要进行走动校正、距离脉压和通道间的距离单元对齐。在三通道信号分别与各自方位参考信号相乘,完成了去斜率处理后,经 FFT 变换,得到三幅子图像 M_A, M_B, M_C 。由于前、中、后三个接收孔径在方位位置存在的偏差,对静止目标(地杂波)而言,方位向频率仍存在一个相位偏差,在两个相邻子图像进行地杂波抑制处理时需要将此偏差进行补偿,才能有效的将静止目标对消掉。设通道 A 子图像 M_A 的频域数据为 I_A , 通道 B 的为 I_B , 则 AB 两通道子图像间的干涉补偿相位为:

$$\Delta \varphi_{AB} = a \tan \left[\frac{\sum \text{Im}(I_A \cdot \bar{I}_B)}{\sum \text{Re}(I_A \cdot \bar{I}_B)} \right] \quad (18)$$

$\bar{I}_B$ 表示 I_B 的共轭。同样可获得 BC 通道间的补偿相位 $\Delta \varphi_{BC}$ 。将 A 通道子图像进行相位补偿后与 B 通道子图像进行对消可得前路对消子图像 M_{AB} , 将 B 通道子图像进行相位补偿后与 C 通道子图像进行对消可以得到后路对消子图像 M_{BC} , 即:

$$M_{AB}(f) = M_A(f) \cdot \exp(-j \cdot \Delta \varphi_{AB}) - M_B(f) \quad (19)$$

$$M_{BC}(f) = M_B(f) \cdot \exp(-j \cdot \Delta \varphi_{BC}) - M_C(f) \quad (20)$$

4 地面动目标检测方法和处理结果

4.1 实现方法

基于 CSI 处理的三孔径天线 SAR/MTI 同时沿航迹向干涉动目标检测算法的实现如图 2 所示。

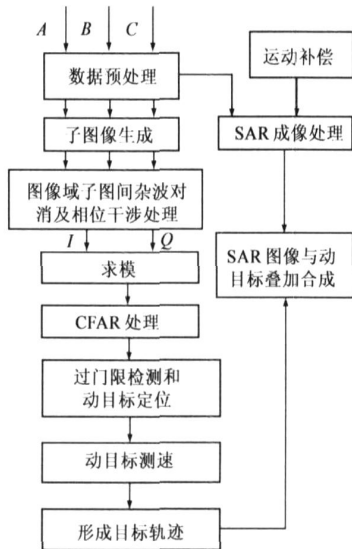


图 2 同时 SAR/MTI 处理流程

4.2 子孔径的划分

将一个合成孔径时间在时间上分成多段,每一段的时间称为子孔径时间,子孔径间可以重叠或非重叠,为降低处理的复杂性,常采用均匀非重叠来划分子孔径,子孔径时间的选择和地杂波对消能力、距离分辨率、动目标的速度范围有关,子孔径时间长,对地杂波的抑制

能力强,但若动目标在子孔径时间内,移出了一个距离单元,动目标的检测能力下降,距离分辨率越高,动目标的距离变化越容易超过一个距离单元。所以在 GMTI 模式下一般的选择是尽量让距离分辨力低一些,以保证地面动目标在最大运动速度下依然处于子孔径时间内,从而不会超过一个距离单元。若每距离单元为 6m,假设系统设计可检测的动目标最大径向速度为 8m/s,则子孔径时间取约 0.75s。将三接收天线收到的回波信号进行子孔径划分,设合成孔径内的方位脉冲数为 M ,子孔径数为 L ,则子孔径长度为 $\Delta M = M/L$ 。

4.3 地面动目标检测处理

在对消后的图像中,虽然信杂比得到了较大的改善,但往往有杂波剩余,为了可靠的检测到动目标,还需要采取以下步骤:

- (1) 根据场景分布统计出杂波对消比的判决门限值来确定对消后的信号是杂波还是动目标;
- (2) 采用 CFAR 技术作进一步检测;
- (3) 对于地面固定场景,对消后其强度总是降低的,但对地面动目标,其对消后的幅度随速度变化,所以可根据最小可检测速度来估算动目标对消前后的比值,通过这一比值来确定当对消比大于某一固定值时,认为是地面静止场景的剩余,反之可能是动目标;

(4) 在子图像对消后,有动目标、杂波和噪声三种成份,经 CFAR 检测后仍有杂波残余,所以必须将子图像间进行距离、方位、多普勒、幅值上的四维相关,把相关不上的残余删除,以降低杂波剩余,减小虚警图像点,降低对动目标后续处理的计算量。

4.4 动目标定位

由于存在运动,动目标相对静止目标,具有不同的质心频率,检测到地面运动目标存在单元的方位位置为动目标的虚假位置。因此动目标的真实方位位置 y 需要通过前后两路对消子图像中动目标虚假位置单元的干涉相位来计算,前后两路对消子图像进行干涉后为:

$$H(f) = \frac{M_{AB}}{M_{BC}} = \exp[j \Psi(f)] \quad (21)$$

$$\Psi(f) = \pi \frac{2dy + d_m(\cos^2 \theta)}{R} - \frac{4\pi f'}{f_{pre}} \quad (22)$$

其中: f_{pre} 为雷达工作时的脉冲重复频率; f' 为检测到动目标时的虚假多普勒频率; d_m 为采用 DPCA 处理时,因无法满足 DPCA 条件而根据实际情况做出的采样间隔重排调整值,它与平台飞行速度、脉冲重复频率和接收孔径间距有关。由式(21)和(22)可计算出动目标真实方位位置 y , 动目标在距离向的位置 x 可直接由其所在的距离门位置给出。

4.5 动目标测速

由于动目标存在径向速度,使其相对于静止目标有

不同的质心频率, 当获取了动目标在子图像中的真实位置之后, 就可以通过动目标的真实位置与虚假位置所在单元的频率之差来计算动目标的径向速度, 该频率差为:

$$f_{dc} - f' = \frac{2v_r}{\lambda} - f' = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (23)$$

即:
$$v_r = \frac{v_r}{R} - \frac{\lambda}{2f'} \quad (24)$$

在经过以上步骤, 完成了动目标的方位聚焦处理之后, 就可以将动目标迭加至 SAR 图像中动目标真实的位置上。

4.6 计算机仿真

采用 CSI 处理的三孔径接收 GMTI 仿真参数的配置为: 脉宽 21 μ s, 重复频率 700Hz, 雷达波长 0.03m, 发射带宽 21MHz, 平台速度 150m/s, 采样频率 25MHz, 三个接收子天线间距 0.53m, 全孔径天线方位向长度 1.6m, 三分之一子孔径方位向的波束宽度加权后约为 4.0°, 地面静止目标(即地杂波)幅度服从均匀分布, 相位 0~2 π 随机分布, 并注入高斯噪声。场景内有一个运动目标, 径向速度为 $v_r = 1.0$ m/s。信号杂波比为 $S_r/C_r = 15$ dB, 它由目标的雷达散射面积, 地面杂波的散射系数等参数决定。

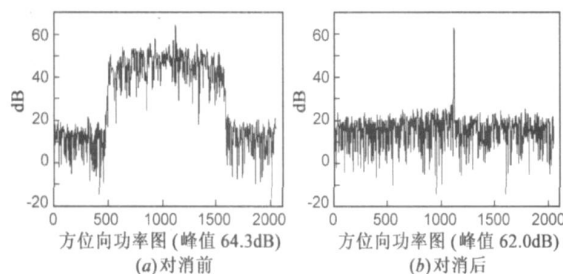


图3 杂波对消前后获得的幅度增益

图3为通过以上仿真参数获得的杂波对消前和对消后方位向 2048 个脉冲积累的幅度增益图, 从图中可以看到对消前图像杂波电平约 50dB, 动目标所在方位脉冲的峰值功率 64.3dB, 对消后图像的剩余杂波电平约 20dB, 接近噪声电平, 动目标所在方位脉冲的峰值功率 62.0dB, 可见 CSI 处理杂波抑制性能较好。用前述的分析计算可知其输出信杂比为 44.27dB, 信杂比改善 29.27dB, 定位误差 0.24m, 测速误差 0.08m/s。将动目标的径向速度改为 $v_r = 2.0$ m/s 时, 则获得的输出信杂比为 49.94dB, 信杂比改善 34.94dB, 定位误差 0.19m, 测速误差 0.05m/s。

4.7 实测数据的处理结果

我们对距离 4096 个点, 方位 512 个脉冲的一段原始数据进行成像和地面动目标检测, 载机(Y-7)到场景中心点的初始距离为 27 公里, 天线波束中心下视角 $\gamma \approx 78^\circ$, 发射脉冲宽度 10 μ s, 发射带宽 20MHz, 脉冲重复频率 1000Hz, 工作在 X 波段, 三孔径之间为等间隔的 d

$= 0.533$ m, 将数据按接收的通道数分成三个子图像分别处理。在被处理的这一段数据里, 受天线及接收通道之间不同幅相特性和系统传输延迟等因素的影响, 前子孔径天线的接收相位中心相对于中间天线孔径向后偏移了 0.79m, 后子孔径天线向前偏移了 0.02m; 从该段实测数据中估计出的载机平台速度为 $v = 112.389$ m/s, 方位多普勒中心 $f_{dc} = 150.239$ Hz, 斜视角 $\theta = 1.19^\circ$; 将数据在方位向分成 16 个子段进行处理, 每个子段内含 32 个方位脉冲, 当获取了动目标的径向速度及真实位置后, 将所有在前路对消子图像中的动目标提取出来, 分别在方位向进行 IFFT 变换至数据域, 再将这些子图像合成, 完成动目标通道间距离单元对齐, 通道间的幅度和相位均经校正处理后, 进行方位向全孔径聚焦处理, 并把动目标叠加到 SAR 图像上。

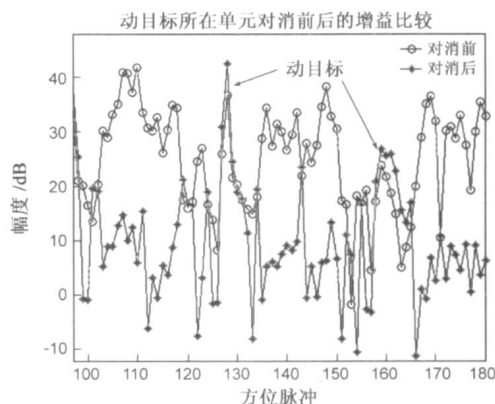


图4 动目标所在单元对消前后结果

图4为运用 CSI 对动目标所在的子图单元进行对消前后的比较结果, 由于采用的是每 32 点相干积累检测出一个动目标(即一个 CPI 含 32 个脉冲), 图中显示出来的是第 4、第 5 个 CPI 的检测结果, 从图中可以看到, 经对消后第 4 个 CPI 除了动目标所在的第 128 号单元, 第 5 个 CPI 除了动目标所在的第 160 号单元附近的增益明显大之外, 原先比动目标还强的地杂波均被有效地抑制掉, 被地杂波掩埋的动目标被成功检出。

动目标检测采用单元平均恒虚警(CA-CFAR)法, 算法的判决准则是当 $T_i > k \cdot u$ 时认为有动目标存在, 其中 T_i 为欲检测单元数据, k 为门限系数由虚警概率决定, $u = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L R_i$ 为参考单元数据的平均值(在该处理中

取 $L = 8$, 即相邻单元的左右各 3 个、上下各 1 个), 利用滑动的窗口逐一判断所有的回波数据。运用上面讨论的 SAR/MTI 处理方法在这块数据中检测到了 8 个地面慢速运动目标, 经解速度模糊后获得它们的径向速度($1^\# \sim 8^\#$)分别为: 2.8m/s、2.0m/s、3.5m/s、1.8m/s、-3.0m/s、-3.3m/s、3.4m/s、-3.4m/s, 其中 $5^\#$ 、 $6^\#$ 、 $8^\#$ 与 $1^\#$ 、 $2^\#$ 、 $3^\#$ 、 $4^\#$ 、 $7^\#$ 的径向速度方向相反。图5为检测到的运

动目标与 SAR 图像叠加合成的结果。

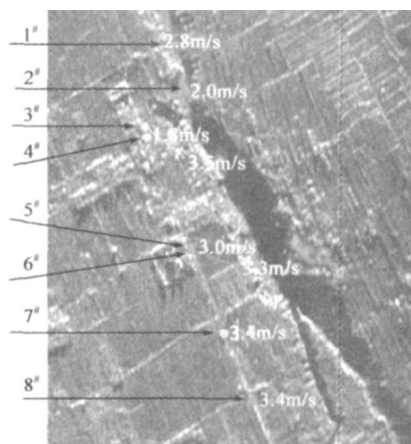


图 5 动目标与 SAR 图像叠加

5 结论

本文给出的地杂波对消、动目标检测、径向速度估计及目标定位的原理和实现方法,通过计算机仿真并结合录取到的三孔径 SAR/MTI 实测数据的处理,其结果表明该方法杂波对消特性好,能够有效的检测出地面慢速运动目标。

参考文献:

- [1] E Yadin. A performance evaluation mode for a two port interferometric SAR-MTI[A]. IEEE 1996 National Radar Conference [C]. USA, 1996. 261- 266.
- [2] 李景文, 李春升, 周荫清. 三孔径 INSAR 动目标检测与成像[J]. 电子学报, 1999, 27(6): 40- 43.
LI Jing wen, LI Chun sheng, ZHOU Ying qing. Three aperture INSAR moving targets detecting and imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(6): 40- 43. (in Chinese)

- [3] E F Stockburger, D N Held. Interferometric moving ground target imaging [A]. IEEE international radar conference [C]. IEEE, 1995. 438- 443.
- [4] J Meyer Hilberg, B Bickert, K P Schmitt. Results of flight tests of a two channel radar system with real time MTI processing [A]. IEE Proc Radar Sonar Navig[C]. 2003, 15(1): 23- 27.
- [5] Tim J Nohara, Peter Weber, et al. SAR-GMTI processing with Canada's radarsat2 satellite[A]. IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium [C]. 2000. 379- 384.

作者简介:



张绪锦 男, 1966 年生于贵州锦屏县, 高级工程师, 2000 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2004 年至今在南京航空航天大学通信与信息系统专业攻读博士学位, 主要从事 SAR 系统设计和 SAR/MTI 技术的研究。

E-mail: michaelzhang2968@sina.com



张长耀 男, 1942 年生于上海, 研究员, 1966 年毕业于中国人民解放军哈尔滨军事工程学院, 曾获国家级和省部级科技进步奖 10 多项, 主要从事雷达信号处理和 SAR/MTI 处理技术的研究。

朱兆达 男, 1939 年生, 教授, 1960 年毕业于南京航空学院, 南京航空航天大学博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 研究方向为雷达信号检测与处理。

邓海涛 男, 1978 年出生于湖北京山, 中国电子科技集团公司第 38 研究所工程师, 主要从事高分辨 SAR 成像和动目标检测处理工作。