

广域监视动目标检测模式下动目标点迹仿真及轨迹关联方法研究

郑世超^{*①②} 刘亚波^① 宋红军^① 闫贺^{①②} 吴琨^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100039)

摘要: 由于可以在较短时间内对大范围区域进行动目标监视, 广域监视动目标检测(Wide Area Surveillance, WAS-GMTI)模式已经成为机载监视雷达的一种重要工作模式。目前具备 WAS-GMTI 工作模式的系统较少, 实际数据较难获得, 严重影响了对 WAS-GMTI 中相关处理算法的验证。该文提出一种基于电子地图路网信息的 WAS-GMTI 动目标点迹仿真方法。该方法根据载机和电子地图路网信息直接产生动目标信息, 避免了仿真场景回波所需的大量运算, 而且产生的动目标信息可以合理地融合到真实地理环境中。此外, 联合对同一动目标的多次观测信息, 该文还给出了一种动目标的轨迹关联方法。仿真结果验证了该文所提方法的有效性。

关键词: 动目标检测; 广域监视; 动目标点迹仿真

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)09-2108-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00068

A Research on Moving Target Trajectory Simulation and Tracking in Wide Area Surveillance Ground Moving Target Indication Mode

Zheng Shi-chao^{①②} Liu Ya-bo^① Song Hong-jun^① Yan He^{①②} Wu Kun^{①②}

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

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Wide Area Surveillance Ground Moving Target Indication (WAS-GMTI) mode is an important mode in airborne radar systems since it can monitor extensive area in a short time. However, there are few systems that possess WAS-GMTI mode. Therefore, real data of WAS-GMTI mode are difficult to obtain which have a great impact on the corresponding algorithm validation. In this paper, a target trajectory simulation method combined with electronic map is proposed. Since information of moving targets is based on information of platforms and electronic maps, simulating the echo of scenes can be avoided. Furthermore, the moving targets are combined with geographic environment reasonably and repetitious information of the same target can be used in tracking. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: Ground Moving Target Indication (GMTI); Wide area surveillance; Target trajectory simulation

1 引言

广域监视动目标检测(Wide Area Surveillance, WAS-GMTI)模式可以全天时、全天候地获取大范围地面运动目标的信息, 便于大面积区域内的交通监管和军事侦查, 引起了人们的广泛关注和重视。该模式已经得到了成功应用: 美国在伊拉克战争期间利用 E-8 JSTARS 上的 WAS-GMTI 模式在夜间成功侦察到伊拉克装甲部队的撤退行动; 德国的 PARMIR 系统可以通过 WAS-GMTI 模式实现交通监管^[1,2]。

WAS-GMTI 模式通过快速扫描, 实现大面积区

域内的动目标监视; 通过连续扫描, 实现对热点地区的重复监测, 获取同一动目标的多次信息, 以确定动目标的运动轨迹。由于 WAS-GMTI 模式比较复杂, 动目标检测和轨迹关联处理具有很大的难度, 因此, 需要有该模式下的数据对处理算法的功能进行验证。这些数据都通过雷达载体飞行获得往往不太实际, 而且这是已有的 SAR(Synthetic Aperture Radar)系统其它模式下的真实数据所无法取代的, 所以必须通过仿真来获得所需要的动目标信息, 从而对 WAS-GMTI 模式下的相关处理算法进行验证。但由于涉及到多次扫描, WAS-GMTI 模式下的仿真远较 SAR/GMTI 模式复杂。首先, WAS-GMTI 模式扫描范围大、波位多, 每个波位均对应一个场景, 因而需要产生同一动目标的多次数据, 而且要求这

些数据是相关的，以便进行后续的轨迹关联；其次，大场景要求动目标数量多，合理性要求动目标尽量靠近道路并沿道路方向移动；第三，相邻波位的波束覆盖区域之间具有一定重叠度，因而重复的动目标需要进行合并；最后，各次扫描中检测到的动目标需要进行关联。以上复杂情况使得 WAS-GMTI 仿真困难，很少见到相关文献报道。

为了使仿真的动目标点迹可以和真实地理环境合理融合，本文提出一种结合电子地图路网信息的 WAS-GMTI 动目标点迹仿真方法。本文方法根据电子地图路网信息直接产生动目标经纬度信息，并转换为相对于载机的位置信息，然后将相应信息分配到各次扫描、不同波位的动目标数据库中，实现 WAS-GMTI 模式下的动目标点迹仿真。在此基础上，根据载机和动目标的几何关系以及天线的扫描设置，合并相邻波位中重复产生的相同动目标，联合同一动目标的多次观测信息对其进行轨迹关联。最后利用载机和动目标相对信息将距离、方位角信息转换为经纬度信息，并标注在参考地图上。本文方法也可以作为实际系统中 WAS-GMTI 模式全链路的一部分，与前端动目标检测部分衔接，将实际数据中检测到的动目标信息替代仿真的动目标信息，通过同样的方式对其进行处理。根据标注结果就可以验证 WAS-GMTI 实际系统处理算法的功能。

文章的结构安排如下：首先对 WAS-GMTI 模式做简要的介绍，然后给出整个仿真的流程，并进一步介绍流程中的相关处理；最后使用该方法对仿真数据进行处理，处理结果验证了其有效性。

2 WAS-GMTI 模式简介

WAS-GMTI 模式是一种大面积快速监视地面运动目标的工作方式。由于其天线采用方位向扫描的工作方式，方位向测绘范围和方位向分辨率具有新的特点。对于 WAS-GMTI 系统来说，其测绘范围包括载机在一次扫描时间内飞过的距离和天线方位向扫描所扩大的测绘范围。因此在这种模式下，相同飞行时间内可以获得更大范围区域的信息^[3-6]。

WAS-GMTI 模式下在飞行过程中波束沿着航迹方向快速重复扫描。雷达系统在一个波束指向角发射完一系列脉冲串信号后，天线就规则地依次转动到其它波束指向角发射信号，这样就能成功扫描到比常规固定波束雷达更加宽广的场景，实现大面积动目标监视，而且重访率高，能够从不同角度检测动目标。经过反复扫描，实现对热点地区的多次监测，不仅能够检测动目标，还可以确定动目标的

运动轨迹。WAS-GMTI 模式工作原理如图 1 所示^[7,8]。

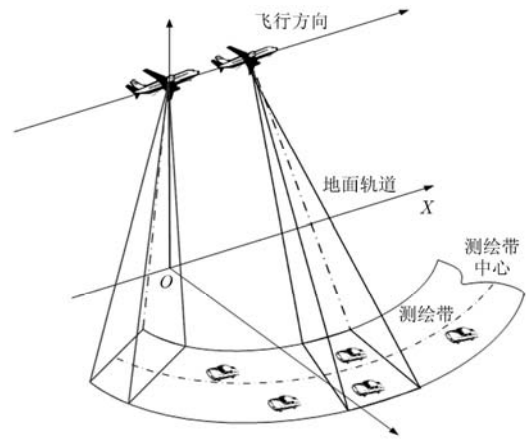


图 1 WAS-GMTI 工作原理图

3 WAS-GMTI 动目标点迹仿真

与 SAR/GMTI 模式下动目标的仿真不同，由于涉及到扫描及多次重访工作，WAS-GMTI 模式下的仿真远较 SAR/GMTI 复杂。本文不考虑前端的设计及动目标检测算法研究，直接根据载机信息、波束控制信息和电子地图路网信息获取 WAS-GMTI 模式下的动目标数据库。在此基础上，利用载机和动目标的经纬度信息及高程信息获取动目标的相对位置及径向运动矢量信息，即可实现 WAS-GMTI 模式下的动目标点迹仿真。图 2 给出了 WAS-GMTI 模式下的动目标点迹仿真流程图。

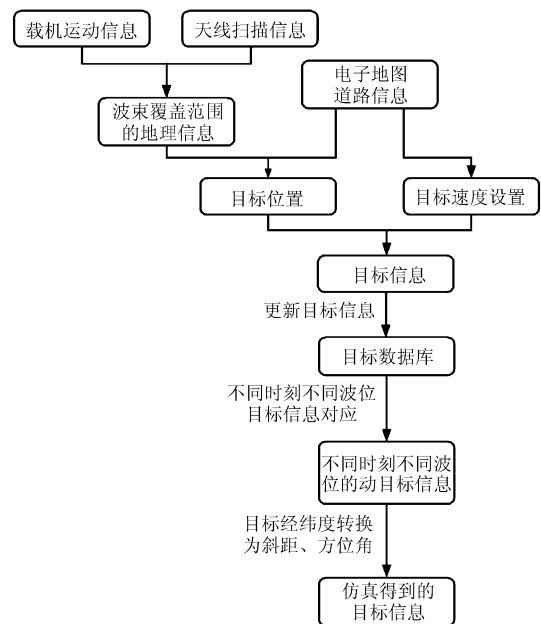


图 2 WAS-GMTI 动目标点迹仿真框图

具体实现步骤如下:

(1) 依据载机运动信息和天线扫描信息确定地面观测范围, 从电子地图中提取该范围内的道路信息。然后沿道路设置动目标位置及速度矢量, 注意使其运动方向和道路方向一致。设置动目标位置时, 首先将选定的道路划分为若干段, 并近似认为每一段道路都是该段起点与终点的连线, 将运动目标设置到该直线上;

(2) 按照载机位置、波位间隔和动目标速度更新动目标位置和径向速度, 形成动目标数据库;

(3) 获取不同时刻不同波位对应的地面观测范围, 从动目标数据库中提取对应的运动目标;

(4) 根据载机和动目标的经纬度及高程信息获取动目标与载机的距离及沿波束指向方向的速度投影信息, 实现 WAS-GMTI 模式下的动目标点迹仿

真。

由于一个波位时间内载机运动的距离远小于载机和动目标之间的距离, 所以在本文中认为在每个波位时间内载机的位置是不变的, 取载机在波位中心时刻的位置进行计算。

动目标点迹仿真中前 3 步较为简单, 以下详细介绍第 4 步实现过程。如图 3 所示 3 维坐标系中, X , Y 和 Z 轴分别代表了经度, 纬度和海拔高度信息。某一波位中心时刻, 已知载机位于 $C(x_1, y_1, h_1)$, 动目标位置为 $P(x_2, y_2, h_2)$, 为了和实际情况相符合, 需要将经纬度信息转换为相对位置信息, 即距离和方位角。在机载情况下, 载机的地面投影和动目标的距离较短, 所以本文在距离和经纬度坐标转换时忽略了地球曲率的影响。则动目标与载机的距离可近似表示为^[9]

$$R = \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + \left(2R_e \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{2[1 - \cos(y_2 - y_1) + \cos y_1 \cos y_2 - \cos y_1 \cos y_2 \cos(x_2 - x_1)]}}{2} \right) \right)^2} \quad (1)$$

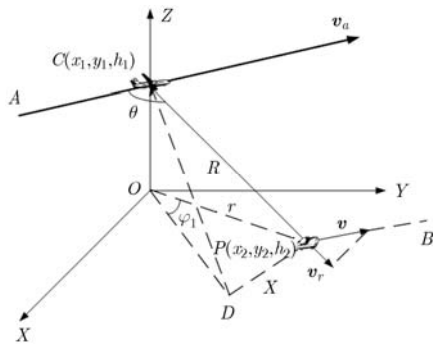


图 3 载机同运动目标几何关系

其中 R_e 为动目标位置对应的地球半径。

动目标的方位角指的是动目标和载机连线与载机尾方向的夹角, 将航迹沿机尾方向延长至 A , 可得

$$\theta = \angle ACP = \arccos \left(\frac{AC^2 + CP^2 - AP^2}{2 \cdot AC \cdot CP} \right) \quad (2)$$

除此之外, 还要求得动目标速度 v 在载机和动目标连线上的投影, 即径向速度 v_r 。这可以通过沿动目标运动方向延长至 B , 求得

$$v_r = \cos \angle BPC \cdot v \quad (3)$$

由于不同时刻、不同波位载机的位置不同, 根据时间间隔和动目标速度更新动目标的位置和动目标的径向速度, 然后将每个动目标 (R, θ, v_r) 的信息嵌入到对应的波位中, 即可实现 WAS-GMTI 动目标点迹的仿真。

4 动目标轨迹关联和标注

仿真动目标点迹的目的在于验证后续处理算法的有效性, 所以在仿真得到动目标点迹信息后, 要进行动目标的轨迹关联和标注, 并将标注结果与原始动目标数据库比较从而验证相应处理算法。

对于实测数据中的动目标信息, 也可以根据本方法进行关联和标注。如果有合作动目标(运动方向、速度等相关参数已知的目标), 将标注结果与先验知识对比, 就可以确定实际处理结果是否准确; 如果只有非合作动目标(相关参数未知的目标), 可以根据标注结果与实际地图道路信息作对比, 初步确定处理过程的准确性。

整个验证过程的基本步骤如下:

(1) 合并相邻波位中重复出现的相同动目标;

(2) 将相邻扫描观测中, 后次扫描内第 $n-1$, n 和 $n+1$ 波位内的动目标与前次扫描中第 n 个波位内的动目标依据斜距及速度矢量信息进行轨迹关联;

(3) 将轨迹关联后的动目标斜距和角度信息转换为经纬度信息, 标注在参考地图上;

(4) 将标注结果与设置的动目标信息进行对比, 判断处理过程的准确性。

4.1 轨迹关联

由于天线扫描, 相邻波位之间的照射区域存在重叠^[10], 因此同一动目标可能在不同波位的仿真中出现。所以在轨迹关联之前需要合并相邻波位中重复出现的相同动目标。从实际工程出发, 我们采用了较为简便的判断依据: 如果相邻波位中的两个

动目标到载机的斜距之差和这两个动目标的多普勒频率之差小于门限值，则将这两个动目标进行合并，具体门限值根据系统参数而定。为了便于后续处理，我们均保留后一个波位中的动目标。

轨迹关联是对多次扫描中观测到的同一动目标进行关联^[11]。由于相邻两次扫描的时间间隔内载机运动的距离远小于载机到目标的斜距，所以认为相邻两次扫描照射到同一观测区域时的天线指向变化很小。在计算时，我们将相邻两次扫描观测中，后次扫描内第 $n-1$ 、 n 和 $n+1$ 波位内的动目标与前次扫描中第 n 个波位内的动目标进行关联，以减小运算量。

如图 4 所示，相邻两次观测到同一动目标时，载机从 A 运动至 B ，动目标从 C 运动至 D 。我们可以得到的动目标信息为距离 AC 和沿 AC 方向的径向速度为 v_1 ，距离 BD 和沿 BD 方向的径向速度为 v_2 。

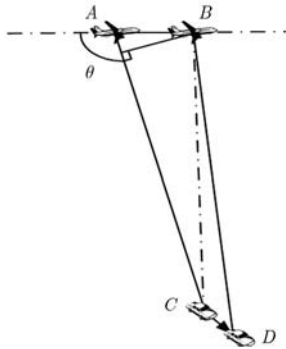


图 4 相邻两次扫描内载机和动目标位置变化示意图

对于静止目标，载机运动导致相邻两次扫描中照射到目标时，载机到目标的距离 R 发生变化，其变化量为 ΔR_s ^[12]。所以运动目标在相邻两次扫描中的距离 R 的变化由两部分组成，载机运动引起的 ΔR_s 和目标运动引起的 ΔR 。则由于目标运动引起的两次扫描中载机到动目标的距离之差 $\Delta R = \Delta R_w - \Delta R_s$ ，其中 ΔR_w 为总的距离变化。

根据上面的分析，在关联时我们使用了两个信息：目标运动引起的载机到动目标的距离变化 ΔR ，动目标径向速度的变化 Δv_r 。对每个动目标将这两个信息分别加权得到一个表达式： $T = \alpha \cdot \Delta R + \beta \cdot \Delta v_r$ ，其中 α 、 β 均为加权值。如果相邻两次扫描中两个动目标的表达式 T 小于某个门限值(门限值根据具体的系统参数设定)，则将这两个动目标关联起来。

4.2 目标定位标注

精确的动目标定位方法需要将载机信息，波束

指向和地面高程信息联立求解方程组^[13,14]。本文提出一种简易的定位方法，如图 5 所示：首先求出动目标位置与载机地面投影位置之间的地距 OP 和 OP 相对于正侧视方向的方位角 φ_1 ：

$$\varphi_1 = \arcsin(X/r) \tag{4}$$

其中 $r = OP = \sqrt{R^2 - (h_1 - h_2)^2}$ ， $X = R \cdot \sin(\theta - 90)$ ， θ 为动目标与载机的连线和载机机尾方向的夹角。

如图 5 所示(右侧视)，则 P 点经纬度可以表示为^[9]

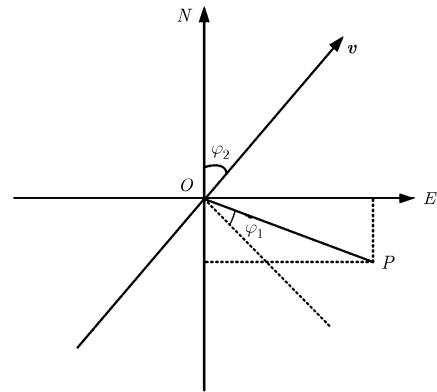


图 5 动目标定位几何关系(右侧视)

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_2 &= y_1 - \frac{OP \cdot \cos(\varphi_2 - 90 - \varphi_1)}{6371.004 \cdot \frac{\pi}{180}} \\ \hat{x}_2 &= x_1 - \frac{OP \cdot \sin(\varphi_2 - 90 - \varphi_1)}{6371.004 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cos\left(\frac{y_1 + \hat{y}_2}{2}\right)} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

同样，左侧视情况下， P 点经纬度可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_2 &= y_1 + \frac{OP \cdot \sin(180 - \varphi_2 - \varphi_1)}{6371.004 \cdot \frac{\pi}{180}} \\ \hat{x}_2 &= x_1 + \frac{OP \cdot \cos(180 - \varphi_2 - \varphi_1)}{6371.004 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cos\left(\frac{y_1 + \hat{y}_2}{2}\right)} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

将动目标的距离、方位角信息转换为经纬度信息后，就可以将动目标标注在参考地图上，完成电子地图标注。

5 仿真实验

为了验证上述 WAS-GMTI 模式下仿真方法的有效性，本文在计算机上进行了仿真实验，系统的仿真参数见表 1 所示。其中载机飞行方向以正北为 0° ，顺时针递增。

在进行轨迹关联和定位之前，我们对相邻波位检测到的相同目标进行合并。合并前后的标注结果

表 1 仿真参数

飞行高度	7248 m	到场景中心地距	30 km
飞行速度	185 m/s	场景地距范围	6 km
飞行方向	186°	最大斜视角	45°
脉冲重复频率	2000 Hz	目标海拔	500 m
载机当前经度	109.96°	方位向波束宽度	4°
载机当前纬度	40.28°		

表 2 实测数据系统参数

信号带宽	60 MHz
脉冲驻留个数	512
通道个数	4
方位向扫描角	70° ~ 110°
平台速度	185 m/s
方位向波束宽度	3°
通道间隔	0.144 m
PRF	2100 Hz

如图 6 所示, 可以发现合并之后, 相同动目标不再重复出现, 从而验证了本文所使用的目标合并准则的有效性。

在对合并后的目标点迹进行轨迹关联、定位后, 最终的标注结果如图 7 所示。

图 6, 图 7 中目标的箭头方向表示动目标的径向速度方向, 这是由于在实际的广域 GMTI 系统中, 我们只能获得动目标的径向速度。而为了贴近实际情况, 在仿真动目标点迹时, 我们也只给出了动目标的径向速度。

根据初始生成的动目标的位置信息和动目标标注结果对比, 可以发现动目标基本处于仿真时所取的相应道路附近。由此证实了整个仿真流程的有效性及其相关处理算法的准确性。

由于整个仿真流程是建立在设定的几何模型基础上, 所以需要通过定位结果来验证该几何模型的准确性。我们使用实测数据对该几何模型的准确性进行了验证, 实际系统的参数如表 2 所示。实测数据中对应场景为内蒙古某市的德萨线公路附近, 经

纬度范围为: 东经 110.453° ~ 110.543°, 北纬 40.192° ~ 40.273°。

根据实测数据中检测到的动目标信息, 对其进行定位和标注。从图 8 中可以发现, 运动目标都被标注到了相应区域的道路附近, 从而验证了本文中的几何模型在机载情况下的有效性。

6 结论

本文方法利用了电子地图信息, 使得动目标仿真更贴近真实环境, 在工程实现之前即可为目标轨迹关联方法提供数据支撑。而且该方法不需要仿真场景回波, 产生的动目标信息也很简单, 大大减小了运算量。此外, 该方法可扩展性好, 可以根据每次波位扫描信息及地图信息仿真包含地貌及目标信息的回波信号, 实现更接近真实状况下的 WAS-GMTI 多场景回波仿真。而且可以与实际系统对接, 验证实际系统处理的准确性。对 WAS-GMTI 模式的处理算法功能验证分析具有重要的意义。



图 6 目标合并前、后标注结果对比

图 7 仿真动目标关联后标注结果



图8 实测动目标定位后标注结果

参考文献

- [1] Brenner A R and Ender J H G. Demonstration of advanced reconnaissance techniques with the airborne SAR/GMTI sensor PAMIR[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(2): 152-162.
 - [2] Entzminger J N, Senior JR, Fowler C A, *et al.* JointSTARS and GMTI: past, present and future[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(2): 748-761.
 - [3] 闫贺, 郑明洁, 李飞, 等. 广域监视模式下新的杂波加噪声谱密度矩阵估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(12): 2852-2857.
Yan He, Zheng Ming-jie, Li Fei, *et al.* A new clutter plus noise spectral density matrix estimation method in wide area surveillance mode[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 2852-2857.
 - [4] 张佳佳, 周芳, 孙光才, 等. 基于机载前向阵雷达的三通道斜视 SAR-GMTI 技术研究[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(2): 344-350.
Zhang Jia-jia, Zhou Fang, Sun Guang-cai, *et al.* Study on three channels squint SAR-GMTI system based on the forward-looking airborne radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 344-350.
 - [5] Zhang Zeng-hui, Zhu Ju-bo, and Wang Yong-liang. Local degrees of freedom of clutter for airborne space-time adaptive processing radar with subarrays[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(3): 130-136.
 - [6] 凌忠. 机载对海雷达杂波抑制性能分析[J]. *现代雷达*, 2012, 34(7): 41-43.
Ling Zhong. Analysis of airborne maritime surveillance clutter suppression performance[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(7): 41-43.
 - [7] 郑明洁, 闫贺, 张冰尘, 等. 基于 DBS 图像的双通道广域监视雷达动目标检测和参数估计方法[J]. *雷达学报*, 2012, 1(1): 36-42.
Zheng Ming-jie, Yan He, Zhang Bing-chen, *et al.* A novel method of moving target detection and parameters estimation for Bi-Channel WAS radar based on DBS image[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 36-42.
 - [8] Yan He, Wang Robert, Li Fei, *et al.* Ground moving target extraction in a multichannel wide-area surveillance SAR/GMTI system via the relaxed PCP[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 617-621.
 - [9] 卫宇. 考虑地球曲率情况下两点距离问题的求解[J]. *航空兵器*, 2008, (3): 7-12.
Wei Yu. Solution of distance between two points considering curvature of the earth[J]. *Area Weaponry*, 2008, (3): 7-12.
 - [10] Cerutti-Maori D, Klare J, Brenner A R, *et al.* Wide-area traffic monitoring with the SAR/GMTI system PAMIR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3019-3030.
 - [11] 张绪锦, 朱兆达, 邓海涛, 等. 三天线机载 SAR 动目标轨迹检测[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(3): 466-469.
Zhang Xu-jin, Zhu Zhao-da, Deng Hai-tao, *et al.* Moving target track detection of airborne SAR with three antennas[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(3): 466-469.
 - [12] 包敏, 郭睿, 李亚超, 等. 基于实测数据的广域三通道 SCANSAR-GMTI 算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(9): 1963-1969.
Bao Min, Guo Rui, Li Ya-chao, *et al.* SCANSAR-GMTI based on real three-channel data[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(9): 1963-1969.
 - [13] 彭代强, 林幼权, 杜鹏飞. 机载 SAR 图像快速经纬度计算及精度分析[J]. *现代雷达*, 2010, 32(3): 48-52.
Peng Dai-qiang, Lin You-quan, and Du Peng-fei. A fast algorithm for latitude and longitude calculation for airborne SAR and its location precision analysis[J]. *Modern Radar*, 2010, 32(3): 48-52.
 - [14] 高祥武, 黄广民, 杨汝良. 机载 SAR 目标快速定位方法和定位精度分析[J]. *现代雷达*, 2004, 26(9): 4-7.
Gao Xiang-wu, Huang Guang-min, and Yang Ru-liang. Study on a fast target location method for airborne SAR and location precision analysis[J]. *Modern Radar*, 2004, 26(9): 4-7.
- 郑世超: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为动目标检测与成像。
刘亚波: 男, 1984 年生, 助理研究员, 研究方向为 SAR/ISAR 运动目标检测及成像。
宋红军: 男, 1968 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为 SAR 系统仿真、成像新体制研究、信号处理。