

文章编号: 2095-4980(2015)05-0763-06

一种改进的星载 SAR 图像控制点几何校正模型

陈吉庭, 余安喜, 董 臻

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 星载合成孔径雷达(SAR)用电磁波获取地球表面的电子图像。由于是侧视成像, SAR 图像固有地含有定位误差, 这些误差来源于 SAR 成像几何、成像模式、散射特性以及图像形成过程。因此, 在 SAR 图像使用中必须考虑这些误差并予以校正。利用先验控制点信息可提高星载 SAR 图像定位精确度, 校正几何畸变。分析了星载 SAR 图像定位的系统误差传递规律, 通过将误差传递特性相似的系统误差源进行等效合并, 提出了一种改进的系统误差校正模型, 蒙特卡洛(Monte-Carlo)仿真实验验证了新模型具有更高的系统误差校正精确度。

关键词: 先验控制点; 几何校正; 系统误差; 误差源; 校正模型; 校正精确度

中图分类号: TN957

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201505.0763

Improved model of control point correction for spaceborne SAR image

CHEN Jiting, YU Anxi, DONG Zhen

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Spaceborne Synthetic Aperture Radar(SAR) obtains electronic image of the earth's surface using electromagnetic waves. For it is side-looking imaging, SAR image inherently contains geolocation error caused by SAR image acquisition geometry, imaging mode, scattering properties and image formation process. These errors should be considered and corrected for SAR image utilization. Geolocation accuracy of spaceborne SAR image and geometric distortion can be improved and corrected by using prior control point. The system error transfer law of spaceborne SAR image geolocation is analyzed. An improved system error correction model is proposed by combining the system error sources with similar error transfer characteristics. Monte-Carlo simulation results show that the new model has higher correction accuracy of system error.

Key words: prior control point; geometric correction; system error; error source; correction model; correction accuracy

约 50 年前, Wiley 第一次发现侧视雷达通过利用回波信号中的多普勒频移可以改善其方位分辨力。这个里程碑式的发现标志着现在被称为合成孔径雷达(SAR)技术的诞生。SAR 原理提出后, 伴随着这一理论和技术的发展, SAR 图像定位始终是一个重要问题。实际的 SAR 卫星图像应用中, 卫星的地面目标图像必须有精确的像素位置, 在图像的后处理中, 为了保证几何校准精确度也必须对图像像素进行精确的定位。光学遥感卫星可以利用角度信息对目标进行定位, 星载 SAR 定位是基于成像处理得到的 SAR 影像信息及雷达卫星轨道数据, 结合距离方程、多普勒方程和地球模型方程联立来求解图像像元对应地面目标点的三维坐标。能否在工程上实现星载 SAR 图像定位, 需要有效地控制雷达本身的系统误差, 这就关系到系统误差估计的问题。由于误差的存在降低了最终遥感图像的可信度, 同时也使遥感图像用于决策支持的范围受到限制。因此对可能的误差源, 及其影响大小的分析即成为一个重要的问题。

国内对星载 SAR 图像定位系统误差校正的研究相对而言起步较晚, 近几年大量学者钻研该领域, 逐步对该领域有较好认识。其中 Soo H Rho^[1]对星载 SAR 成像几何以及几何畸变进行了详细的论述, 并就利用地面控制点进行几何校正的算法展开了研究。王青松^[2]对 SAR 定位模型以及 SAR 图像定位精确度进行了详细的叙述, 并就 SAR 定位相对系统误差校正方法进行了论证。John C Curlander^[3]系统地分析了 SAR、信号处理, 对引起雷达图

像几何失真的误差源进行了详细论述。魏钟铨^[4]全面系统地论述了目标定位的各种误差源,并对其对定位精确度的影响进行了说明。CHENG Chunquan^[5]根据控制点数量以及控制点分布区域开展了 SAR 图像定位误差的研究,LIU Jiayin^[6]、ZHANG Lu^[7]从定位解算模型角度对系统误差的校正进行了说明,葛咏^[8]、钟霞^[9]则是从误差估计、误差分析的角度对系统误差进行了研究。高叶盛^[10]围绕环视 SAR 成像处理中出现的几何失真问题,通过分析引起几何失真的机理,提出基于子图像素实际地理坐标的几何失真校正方法,并证明方法的有效性。

利用先验控制点信息可提高星载 SAR 图像定位精确度,分析了星载 SAR 图像定位的系统误差传递规律。传递特性存在明显差异的系统误差源,其引起的定位误差很容易被测定,进而可以校正误差源引起的定位误差。而传递特性相似的系统误差源,很难区分校正其引起的定位误差,因此把系统误差源合并等效,提出一种改进的系统误差校正模型。最后,利用 Monte-Carlo 仿真实验验证了新模型具有更高的系统误差校正精确度。

1 星载 SAR 图像定位的系统误差传递

如图 1 所示, P_T , P_S 分别表示目标点和卫星中心相对于地球球心的位置矢量模值。 V_S 代表卫星运行速度, R 为斜距。结合星载 SAR 成像特点以及距离多普勒(Range-Doppler, RD)定位模型三大方程,影响星载 SAR 图像定位精确度的系统误差因素众多,在此主要研究影响定位精确度的各项系统误差源:卫星轨道位置确定误差、卫星轨道速度确定误差、斜距测量误差。

1.1 卫星轨道位置确定误差

该误差可分解为沿航向位置误差、垂直航向位置误差和径向位置误差。

由 SAR 成像几何关系可知,沿航向位置误差 ΔP_x 主要引起目标沿方位向定位误差:

$$\Delta a = \Delta P_x \frac{P_T}{P_S} = a_1(\theta) \Delta P_x \quad (1)$$

式中: P_T 表示地面目标点的位置矢量; P_S 表示 SAR 卫星天线相位中心位置矢量; θ 是下视角。此外,回波起始误差同样等效于沿航向位置误差,引起方位向定位误差。

垂直航向位置误差 ΔP_y 主要引起目标沿距离向定位误差:

$$\Delta r = \Delta P_y \frac{P_T}{P_S} = r_1(\theta) \Delta P_y \quad (2)$$

在这个垂直航向目标位置上,一个小的方位目标偏移由地球的旋转速率的漂移所产生,然而,这个影响是相当小的,在大多数应用中,可以忽略不计。

径向位置误差 ΔP_z 对定位精确度的影响可以等效地心角引起的定位误差。地心角表达式为:

$$\theta = \arccos \left[\frac{(P_T^2 + P_S^2 - R^2)}{(2P_T P_S)} \right], \text{ 径向位置误差 } \Delta P_z \text{ 引起地心角变化为:}$$

$$\Delta \theta = \arccos \left[\frac{P_T^2 + (P_S + \Delta P_z)^2 - R^2}{2P_T (P_S + \Delta P_z)} \right] - \arccos \left[\frac{(P_T^2 + P_S^2 - R^2)}{2P_T P_S} \right] \approx \frac{[4P_S^2 P_T - 2(P_T^2 + P_S^2 - R^2)P_T]}{(2P_S P_T)^2 \sqrt{1 - \left[\frac{(P_T^2 + P_S^2 - R^2)}{2P_S P_T} \right]^2}} \Delta P_z \quad (3)$$

式中 R 表示 SAR 影像斜距,对反余弦函数进行关于变量 ΔP_z 的泰勒级数展开,忽略高次项后,得到近似后的线性项。因此径向位置误差引起的沿距离向目标定位误差为:

$$\Delta r = P_T \Delta \theta = \frac{[4P_S^2 P_T - 2(P_T^2 + P_S^2 - R^2)P_T]}{(2P_S P_T)^2 \sqrt{1 - \left[\frac{(P_T^2 + P_S^2 - R^2)}{2P_S P_T} \right]^2}} P_T \Delta P_z = r_2(\theta) \Delta P_z \quad (4)$$

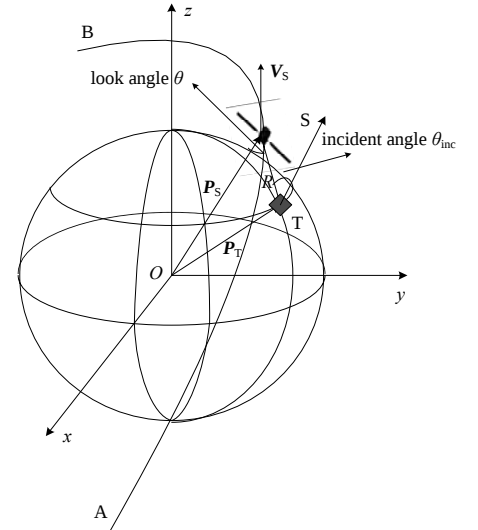


Fig.1 Spaceborne SAR imaging geometry
图1 星载 SAR 成像几何示意图

1.2 卫星轨道速度确定误差

该误差可分解为沿航向速度误差 ΔV_x 、垂直航向速度误差 ΔV_y 和径向速度误差 ΔV_z 。速度误差可以等效成一个多普勒偏移误差,进而导致目标定位沿方位向产生位置偏移,偏移量与卫星速度误差在斜距方向的投影成比例。速度误差投影可表示为:

$$\Delta V = \Delta V_x \sin \eta + \Delta V_y \sin \theta + \Delta V_z \cos \theta \quad (5)$$

因此,卫星轨道速度确定误差引起的是方位向定位误差:

$$\Delta a = \Delta V_x \cdot \frac{R \sin \eta}{V_s \cos(\eta^3)} + \Delta V_y \cdot \frac{R \sin \theta}{V_s \cos(\eta^3)} + \Delta V_z \cdot \frac{R \cos \theta}{V_s \cos(\eta^3)} = a_2(\theta) \Delta V_x + a_3(\theta) \Delta V_y + a_4(\theta) \Delta V_z \quad (6)$$

式中: η 是斜视角; V_s 是 SAR 卫星天线相位速度矢量。

1.3 斜距误差

传感器到目标的斜距由信号穿过大气的传播时间所决定。一般而言,斜距误差主要由载荷时延误差 $\Delta \tau_1$ 、回波起始误差 $\Delta \tau_2$ 、电磁波在大气中的传播时延误差 $\Delta \tau_3$ 组成。斜距误差主要引起目标沿距离向定位误差:

$$\Delta r = \frac{c(\Delta \tau_1 + \Delta \tau_2 + \Delta \tau_3)}{2 \sin \theta_{\text{inc}}} = r_3(\theta) \Delta R \quad (7)$$

式中: c 是光速; ΔR 为等效斜距 $c(\Delta \tau_1 + \Delta \tau_2 + \Delta \tau_3)$; θ_{inc} 为入射角。具体表达式为:

$$\theta_{\text{inc}} = \arcsin \left(\sin \theta \frac{P_s}{P_T} \right) \quad (8)$$

依据系统误差的分析,得到星载 SAR 图像定位的系统误差传递规律如式(9)、式(10)所示:

$$e_r = r_1(\theta) \Delta P_y + r_2(\theta) \Delta P_z + r_3(\theta) \Delta R \quad (9)$$

$$e_a = a_1(\theta) \Delta P_x + a_2(\theta) \Delta V_x + a_3(\theta) \Delta V_y + a_4(\theta) \Delta V_z \quad (10)$$

式中 e_r, e_a 分别代表距离向和方位向的综合误差。

2 星载 SAR 图像定位的系统误差校正方法

星载 SAR 图像定位时存在系统误差,这些系统误差极大地影响定位精确度。利用地面控制点的先验信息,可以找出 SAR 图像在控制点处距离向、方位向的综合误差,得到星载 SAR 图像定位的系统误差传递规律如式(11)、式(12)所示:

$$e_{ri} = r_{1i}(\theta) \Delta P_{yi} + r_{2i}(\theta) \Delta P_{zi} + r_{3i}(\theta) \Delta R_i + \Delta \xi \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (11)$$

$$e_{ai} = a_{1i}(\theta) \Delta P_{xi} + a_{2i}(\theta) \Delta V_{xi} + a_{3i}(\theta) \Delta V_{yi} + a_{4i}(\theta) \Delta V_{zi} + \Delta \zeta \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (12)$$

式中: i 表示第 i 个地面控制点; n 表示控制点数; e_{ri}, e_{ai} 分别表示第 i 个地面控制点的距离向综合误差和方位向综合误差; $\Delta \xi, \Delta \zeta$ 分别表示距离向高斯噪声、方位向高斯噪声。

对式(11)、式(12)采用线性最小二乘估计误差源,同时采用 Monte-Carlo 仿真得到误差源的统计分布。利用各系统误差的估计结果,可以对图像各像素的定位结果进行修正。

3 一种改进的系统误差校正模型

针对存在先验控制点信息误差、传递特性极其相似的系统误差源以及控制点较少的情形,考虑采用一种将传递特性相似的系统误差源合并为等效误差源的方式对系统误差进行校正。式(9)、式(10)可等效为下面的表达式:

$$e_r = r_1(\theta) \Delta P_y + r_2(\theta) \Delta P_z + r_3(\theta) \Delta R = (\Delta P_y + \beta \Delta P_z) r_1(\theta) + r_3(\theta) \Delta R = \Delta P_{yz} r_1(\theta) + r_3(\theta) \Delta R \quad (13)$$

$$e_a = a_1(\theta) \Delta P_x + a_2(\theta) \Delta V_x + a_3(\theta) \Delta V_y + a_4(\theta) \Delta V_z = (\Delta P_x + \gamma \Delta V_x) a_1(\theta) + a_3(\theta) \Delta V_y + a_4(\theta) \Delta V_z = \Delta P_{xV} a_1(\theta) + a_3(\theta) \Delta V_y + a_4(\theta) \Delta V_z \quad (14)$$

式中: $(\Delta P_y + \beta \Delta P_z), (\Delta P_x + \gamma \Delta V_x)$ 分别是距离向、方位向的合并等效误差源; $\beta = \frac{r_2(\theta)}{r_1(\theta)}$; $\gamma = \frac{a_2(\theta)}{a_1(\theta)}$ 。此时,式(9)、式(10)中需要估计的参量个数由 7 个转变为式(13)、式(14)中的 5 个,这为滤波器减少了估计量的个数,同时提高

了模型的稳健度和精确度。

假设卫星平台高度为 580 km, 卫星平台速度为 7 500 m/s, 下视角为 $40^\circ \sim 45^\circ$ 。各种误差源定位误差曲线分别如图 2、图 3 所示。

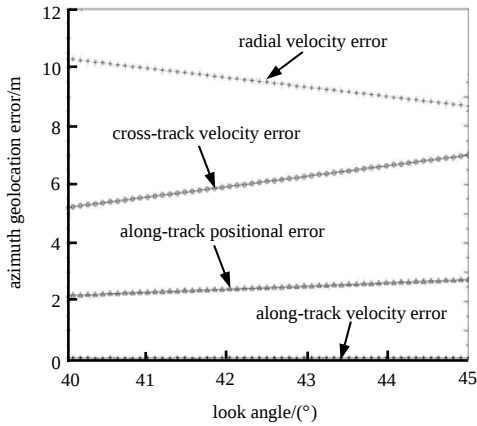


Fig.2 Azimuth geolocation error
图 2 方位向定位误差

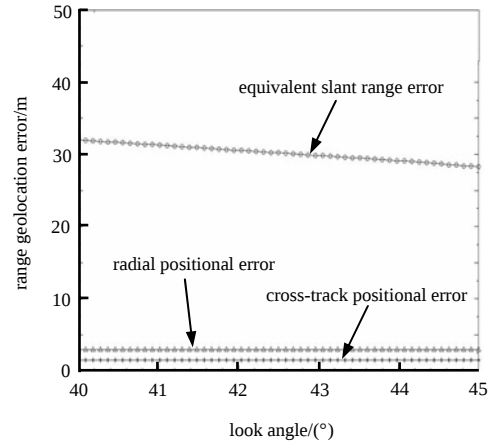


Fig.3 Range geolocation error
图 3 距离向定位误差

图 2、图 3 分别是方位向定位误差、距离向定位误差。从图 2 中可以看出, 影响方位向定位误差的 4 个误差源: 沿航向位置误差、沿航向速度误差、垂直航向速度误差、径向速度误差。后两者的传递特性存在着明显的差异, 因而, 可以区分并校正系统误差源各自带来的定位误差; 而沿航向位置误差源与沿航向速度误差源的传递特性几乎一致, 难以区分校正各自带来的定位误差。同样, 从图 3 中可以看出, 影响距离向定位误差的 3 个误差源: 垂直航向位置确定误差、径向位置误差、等效斜距误差。垂直航向位置确定误差源与径向位置误差源的传输特性基本一致, 难以区分校正各自带来的定位误差。对于误差传递特性相似的系统误差源, 本文把沿航向位置误差源与沿航向速度误差源合并为一个等效误差源, 把垂直航向位置确定误差源与径向位置误差源合并为一个等效误差源。合并得到等效误差源后, 其与等效之前传递特性存在差异的误差源的传递特性明显不同, 这说明等效误差源与等效之前传递特性存在差异的误差源都可以区分校正各自带来的定位误差。

4 仿真实验

在距离向和方位向分别以下视角间隔为 0.5° , 选取 10 个控制点, 考虑式(11)、式(12)。式中噪声 $\Delta(\Delta\xi, \Delta\zeta)$ 为高斯白噪声且距离向噪声与方位向噪声独立, 噪声 $\Delta(\Delta\xi, \Delta\zeta)$ 均值为 0, 方差为 σ^2 , $\sigma_a = \sigma_r = \sigma$ 。在不同控制点位置精确度 σ 下, 统计了各控制点定位误差修正后的平均残余误差 $\eta(\eta_r, \eta_a)$, 其中, η 表示的是定位误差修正后测量值与真实值之间的差值。残余误差越小, 表明误差修正的精确度越高。 δ 表示系统误差源相对误差, 指的是估计所造成的绝对误差与被估计的真实值之比, 以百分数表示。

从表 1 可知, 垂直航向速度误差源、径向速度误差源、等效斜距误差源的估计相对误差较小 ($\delta \leq 8\%$), 这说明上述 3 类误差源传递特性存在差异, 能够较为准确地被估计出来。垂直航向位置确定误差源、径向位置确定误差源、沿航向位置确定误差源、沿航向速度误差源的估计相对误差较大 ($\sigma \geq 10\%$), 这说明上述 4 种误差源难以估计。这些结论与理论分析完全吻合。此外, 从表 1 中还能看到, 当 δ 较小时, 系统残余误差也较小, 说明此时误差修正精确度较高。对于存在的难以估计误差源, 文中采用等效误差源表达式, 重复仿真实验过程, 得到表 2 等效误差源估计。在表 2 中需要估计的参量有 5 个, 第 1 个参量估计的是 $(1+\gamma)\Delta P_x$, 第 2 个参量估计的是 $(1+\beta)\Delta P_y$, 后 3 个参量与表 1 中的参量含义相同。从表 2 可以看到, 等效误差源后, 各类误差源都能较好地得到估计, 系统残余误差也能得到较好的修正。此时, 把系统残余误差加到 SAR 图像像元上, 可以较好地提高 SAR 图像定位精确度。

表 1 估计误差源
Table1 Error source estimation

prior control point error	system error sources												original geolocation residual error	
	ΔP_x /m			ΔP_y /m			ΔP_z /m			ΔV_x /(m·s ⁻¹)			η_r /m	η_a /m
	real value	estimation	δ	real value	estimation	δ	real value	estimation	δ	real value	estimation	δ		
$\sigma=2$ m	3.00	3.30	10%	3.00	2.46	18%	3.00	2.40	20%	0.50	0.44	4%	72.40	14.80
$\sigma=4$ m	3.00	3.50	17%	3.00	2.32	22%	3.00	2.32	22%	0.50	0.36	8%	94.30	23.50

prior control point error	system error sources									estimated error source residual error	
	ΔV_y /(m·s ⁻¹)			ΔV_z /(m·s ⁻¹)			ΔR /m			η_r /m	η_a /m
	real value	estimation	δ				real value	estimation	δ		
$\sigma=2$ m	0.50	0.48	4%	0.50	0.49	2%	12.40	13.0	4.8%	14.50	4.60
$\sigma=4$ m	0.50	0.46	8%	0.50	0.46	8%	12.40	13.4	8%	16.80	6.50

表 2 等效误差源估计
Table2 Equivalent error source estimation

prior control point error	system error sources									original geolocation residual error	
	ΔP_x /m			ΔP_y /m			ΔV_y /m			η_r /m	η_a /m
	real value	estimation	δ	real value	estimation	δ	real value	estimation	δ		
$\sigma=2$ m	4.78	5.10	6.7%	5.00	5.25	5.0%	0.50	0.48	4.0%	68.70	15.50
$\sigma=4$ m	4.78	5.19	8.5%	5.00	5.42	8.4%	0.50	0.46	8.0%	91.30	24.60

prior control point error	system error sources						estimated error source residual error	
	ΔV_z /(m·s ⁻¹)			ΔR /m			η_r /m	η_a /m
	real value	estimation	δ	real value	estimation	δ		
$\sigma=2$ m	0.50	0.49	2.0%	12.40	13.90	4.0%	6.90	3.20
$\sigma=4$ m	0.50	0.46	8.0%	12.40	13.30	7.3%	9.10	4.52

5 结论

本文利用先验控制点信息提高星载 SAR 图像定位精确度，分析了星载 SAR 图像定位的系统误差传递规律，得出垂直航向速度误差、径向速度误差、斜距误差的传递特性存在差异，可以区分校正各自带来定位误差的系统误差源；而沿航向位置确定误差、沿航向速度确定误差、垂直航向位置确定误差、径向位置确定误差是难以区分校正各自带来定位误差的误差源。此时，把沿航向位置确定误差与沿航向速度确定误差合并为等效误差源，把垂直航向位置确定误差与径向位置确定误差合并为等效误差源。等效误差源后，得到改进的误差校正模型，该种改进的误差校正模型可以较好地提高星载 SAR 图像定位精确度。

参考文献：

[1] Rho S H,Kim J,Kwag Y K.Geolocation error correction for Synthetic Aperture Radar image using the ground control point[C]// 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver,Canada:[s.n.], 2011:4363–4366.

- [2] 王青松, 黄海风, 董臻. 星载干涉合成孔径雷达—高效高精度处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (WANG Qingsong, HUANG Haifeng, DONG Zhen. Spaceborne interferometric Synthetic Aperture Radar—high precision, fast processing method[M]. Beijing: Science Press, 2012.)
- [3] Curlander J C, McDonough R N. 合成孔径雷达—系统与信号处理[M]. 韩传钊, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006. (Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar—System and Signal Processing[M]. Translated by HAN Chuanzhao. Beijing: Electronic Industry Press, 2006.)
- [4] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (WEI Zhongquan. Synthetic Aperture Radar Satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [5] CHENG Chunquan, ZHENG Shujian, LIU Xiaojun, et al. Spaceborne SAR image geolocation in mountain area with sparse GCP[C]// 2011 International Symposium on Image and Data Fusion (ISIDF). Tengchong, China: [s.n.], 2011: 1–4.
- [6] LIU Jiayin, HONG Wen. Reverse-range-doppler method for automated geocoding SAR images[J]. Journal of Electronics, 2012, 29(3): 242–247.
- [7] ZHANG Lu, Timo Balz, LIAO Mingsheng. Satellite SAR geocoding with refined RPC model[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 69(3): 37–49.
- [8] 葛咏, 王劲峰. 基于机理的合成孔径雷达系统成像误差理论分析[J]. 地球信息科学, 2000, 3(1): 28–32. (GE Yong, WANG Jingfeng. Theoretic analysis of system imaging error based on mechanical Synthetic Aperture Radar[J]. Geoinformation Science, 2000, 3(1): 28–32.)
- [9] 钟霞, 张建伟, 于灏. 基于最小二乘估计的雷达系统误差卫星定标方法[J]. 空间科学学报, 2013, 33(5): 554–560. (ZHONG Xia, ZHANG Jianwei, YU Hao. Satellite calibrate method of radar system error based on least squares[J]. Chinese Journal of Space Science, 2013, 33(5): 554–560.)
- [10] 高叶盛, 朱岱寅. 环视 SAR 成像处理中的几何失真校正方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010, 8(3): 297–302. (GAO Yesheng, ZHU Daiyin. Geometric distortion correction of sweep SAR imaging processing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010, 8(3): 297–302.)

作者简介:



陈吉庭(1990–), 男, 湖南省郴州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为星载 SAR 几何精校正技术. email: chenweir0206@163.com.

余安喜(1978–), 男, 河南省潢川县人, 副教授, 主要研究方向为星载 SAR 干涉技术.

董臻(1973–), 安徽省六安市人, 研究员, 主要研究方向为星载 SAR 系统与信号处理技术.