

分布式位置和姿态测量系统的概念与应用方向

李道京^① 滕秀敏^② 潘舟浩^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室 北京 100190)

^②(数据通信科学技术研究所 北京 100191)

摘要: 该文讨论了分布式位置和姿态测量系统(POS)的概念与体制。针对不同的应用方式,论述了其关键技术指标,明确了光学遥感设备尤其是多子阵天线结构成像雷达对其要求,初步分析了获得高精度位置和姿态信息可能的技术途径,指出了其未来的应用方向。

关键词: 位置和姿态测量; 分布式系统; 合成孔径雷达; 光学遥感; 对地观测

中图分类号: V249.32

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)04-0400-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.13086

The Concept and Applications of Distributed POS

Li Dao-jing^① Teng Xiu-min^② Pan Zhou-hao^①

^①(*Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*Data Communication Technology Research Institute, Beijing 100191, China*)

Abstract: In this study, the concept and system of a distributed POS (Position and Orientation System) are discussed. Based on the different operation modes, the principle technical parameters and requirements for optical camera and imaging radar with multiple subarray antennas are presented. Further, technical approaches to obtain precise position and attitude information for the POS are investigated, and some possible applications are proposed.

Key words: Position and attitude measurement; Distributed system; Synthetic Aperture Radar (SAR); Optics remote sensing; Earth observation

1 引言

位置和姿态测量系统(Position and Orientation System, POS)能够实时测量遥感设备所在的位置和方向的3个线性坐标和3个转动坐标以及加速度,经过后处理还可得到更高精度的设备位置姿态信息。利用这些位置姿态信息对所获取的遥感数据进行高精度的几何校正,可大大提高遥感数据产品的质量,在补偿飞行平台姿态不稳带来的误差的同时,可以实现无或减少地面控制点测图,降低数据获取的成本并缩短制图周期。

目前,世界上利用POS辅助合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)和光学设备(可见光相机、成像光谱仪、激光雷达)实施遥感测量已经是非常普遍、成熟的做法,并获得了非常好的应用效果,其典型系统如加拿大Applanix公司的POS

510和POS 610。

POS在结构上主要由惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)单元、全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)单元和POS计算机系统(POS Computer System, PCS)单元3部分组成,使用时IMU单元通常需和SAR天线相位中心固联或和光学遥感设备镜头固联。较大体积重量的IMU单元虽具有较高的数据精度,但考虑到安装条件,其应用也可能受到限制。为实现有效的系统集成,在保证数据精度的同时,要求IMU单元具备体积小重量轻的特点。

随着飞行平台技术的发展,在同一平台上采用多观测窗口实现多遥感设备同时观测已成为可能,典型的如SAR、可见光相机、成像光谱仪和激光雷达同时工作,由于观测窗口分布在非刚性平台的不同位置,各个遥感设备的姿态稳定控制方式不同,每个遥感设备都需使用POS,并与其IMU固联,由此需形成一个分布式的多节点POS系统。与此同时,基于分布式多子阵天线结构的成像雷达,典型

2013-09-16收到,2013-10-14改回;2013-10-21网络优先出版

国家“973”计划项目(2009CB72400)资助课题

*通信作者: 李道京 lidj@mail.ie.ac.cn

的如长基线 InSAR 和大型阵列天线 SAR, 其信号处理也需使用子阵级的 POS 数据信息, 也对分布式的多节点 POS 系统提出了需求。从系统工程的角度考虑, 在飞行平台上简单地同时使用多个 POS 显然不合理, 进一步考虑到要减少 POS 系统的体积重量尤其是固联在遥感设备上的 IMU 体积重量, 分布式的多节点 POS 的概念和体制还需深入研究。

本文讨论了分布式 POS 的概念和体制, 论述了其技术指标和要求, 明确了其应用方向。

2 分布式 POS 的概念和体制

为实现各种遥感数据融合, 上述多节点分布式 POS 系统应具有统一的时空基准, 假定定义设置在飞行平台上的输出时空基准信号的 POS 为主节点, 设置在各个观测窗遥感设备上的 POS 为子节点, 与应用需求对应的分布式 POS 功能如下:

(1) 主节点采用体积重量较大的高精度 IMU, 多个子节点采用体积重量较小的低精度 IMU, 经综合处理在所有子节点获得接近主节点精度的测量信息;

(2) 主子节点均采用体积重量精度相当的 IMU, 经综合处理在所有节点获得相对精度提升的测量能力。

总体看来, 分布式 POS 应是一个以主子多节点形式在空间分布的具有多点高测量精度的位置和姿态测量系统。

3 POS 的主要技术指标

典型的 POS 系统如加拿大 Applanix 公司的 POS 510 和 POS 610^[1], 其主要技术指标和参数如表 1 所示。

表 1 POS 510 和 POS 610 系统技术指标参数

Tab. 1 System technical parameters of POS 510 and POS 610

参数	POS 510	POS 610
位置(m)	0.05~0.30	0.05~0.30
速度(m/s)	0.005	0.005
横滚和俯仰(°)	0.0050	0.0025
真航向(°)	0.008	0.005
数据率(Hz)	200	200
IMU 单元重量(kg)	1.5	4.5

目前 POS 510 和 POS 610 都获得了广泛的应用, 和 POS 510 相比, POS 610 具有更高的姿态测量精度, 但其 IMU 的体积和重量较大。

4 光学设备对 POS 的要求

POS 510 5~10 cm 量级的定位精度已可满足大部分可见光相机、成像光谱仪和激光雷达等几类光学遥感设备的位置测量精度要求, 但其 0.005°姿态测量精度, 还可能制约着光学遥感设备的几何测量精度, 尤其是在观测距离较远时。例如, 当观测距离 6 km 时, 0.005°姿态测量精度可导致 0.52 m 的几何测量误差, 难以满足 1:5000 比例尺成图精度要求, 需使用姿态测量精度更高的 POS 610。一般来讲, 光学遥感设备对 POS 的姿态测量精度要求较高。

5 SAR 对 POS 的要求

5.1 2D-SAR 成像对 POS 的要求

POS 510 5~10 cm 量级的定位精度已可满足用于 2 维成像的 2D-SAR 图像定位精度要求, 由于 SAR 的天线波束较宽, POS 0.05°~0.10°的姿态测量精度已可满足 SAR 波束指向控制要求, 但 SAR 成像处理对位置精度尤其是相对位置精度有很高的要求, 通常相对位置精度需优于 1/16 波长^[2](在合成孔径时间内, 对应的双程相位误差为 $\pi/4$), 这里的相对位置精度指在合成孔径时间内的非线性位置误差, 在微波频段工作的 SAR 合成孔径时间通常在 10 s 量级, 考虑到基于 IMU 的 POS 的工作原理, 合成孔径时间越短, 用 POS 获得的相对位置精度越高, 通常要求的相对位置精度约为 1 mm。为达到如此高的相对位置精度要求, 在 SAR 成像处理过程中, 对 POS 输出的数据需要进行特殊处理^[3,4]。

从成像机理看, 近年提出的用于 3 维成像的 3D-SAR 对 POS 相对位置精度的要求和用于 2 维成像的 2D-SAR 接近。

5.2 InSAR 对 POS 的要求

基于一发两收主副天线结构的 InSAR 高程反演公式为:

$$z = H - r \cos \left(\alpha + \arcsin \left(-\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{B} \right) \right) \quad (1)$$

上式表明斜距 r , 基线长度 B , 基线与水平方向的夹角 α , 载机高度 H , 干涉相位 $\Delta\phi$, 这 5 个参量的测量误差 $\sigma_r, \sigma_B, \sigma_\alpha, \sigma_H, \sigma_\phi$ 都会引起高程测量误差。通过微分可求得这 5 个参量引起的高程误差分量^[5]:

$$\sigma_h^{(1)} = -\cos \theta \sigma_r \quad (2)$$

$$\sigma_h^{(2)} = r \tan(\theta - \alpha) \sin \theta \cdot \frac{\sigma_B}{B} \quad (3)$$

$$\sigma_h^{(3)} = r \sin \theta \cdot \sigma_\alpha \quad (4)$$

$$\sigma_h^{(4)} = \sigma_H \quad (5)$$

$$\sigma_h^{(5)} = \frac{\lambda r \sin \theta}{2\pi B \cos(\theta - \alpha)} \sigma_\phi \quad (6)$$

由此可以简单估计每个参量误差引起的高程测量误差的大小。这里 θ 为天线视角, λ 为 SAR 波长。

在实际工作中, 高程测量误差的大小主要是由相位测量误差引起的, 而相位测量误差主要受信噪比、多视视数、图像配准的精度、基线长度引起的去相干、2 维相位解缠绕的方法等几方面因素的影响。接收机热噪声无疑会对相位测量产生影响, 采用多视处理在减小图像相干斑影响的同时, 也可提高相位的测量精度。

目前可同时获取地物高程信息的 InSAR 分为刚性基线、柔性基线和双站/重过航 3 种形式, 不同形式 InSAR, 对 POS 的精度要求也不同, 下面举例对此进行说明。

5.2.1 刚性基线毫米波 InSAR 刚性基线双天线 InSAR 通常使用 1 个 POS, 其 IMU 安装在主天线的相位中心处, 获取主天线相位中心的位置信息, 使用 POS 姿态信息的主要目的在于根据刚性基线的长度和姿态角, 获取副天线相位中心的位置。

一个刚性基线毫米波 InSAR 系统参数和对应的高程精度分析结果^[6]如表 2、表 3 所示。

表 2 毫米波 InSAR 系统参数

Tab. 2 System parameters of millimeter-wave InSAR

参数	数值
信号载频	35 GHz
刚性基线长度	1 m
载机高度	3000 m
天线视角	35°
场景中心斜距	3662 m
基线与水平方向夹角	0°

表 3 毫米波 InSAR 高程精度分析

Tab. 3 Height measurement accuracy of millimeter-wave InSAR

高程反演参数	测量误差	高程反演误差
σ_r	0.1 m	0.0819 m
σ_B	0.1 mm	0.1470 m
σ_α	0.01°	0.3664 m
σ_H	0.05 m	0.0500 m
σ_ϕ	3.97°	0.2422 m

在上述参数下的高程精度为 0.4730 m, 可见对刚性基线 InSAR, 姿态测量精度是限制高程测量精度的主要因素。

5.2.2 柔性基线 L 波段 InSAR 双天线 InSAR 的基本原理是干涉测角, 为实现干涉测角, 首先要解决主副两个天线的相位中心相对位置测量问题, 在此基础上, 基线是刚性还是柔性的已不重要。

对柔性基线双天线 InSAR, 可考虑采用两个 POS 分别获取两个天线的相位中心位置, 此时形成的双 POS 系统, 不仅是分布式 POS 的一个特例, 而且是分布式 POS 的最小结构。

对柔性基线双天线 InSAR, 当 POS 的位置测量精度 1 mm, 则基线长度测量精度为 1 mm, 8 m 基线对应的基线倾角测量精度约为 0.007°。

一个 L 波段 InSAR 系统参数和对应的高程精度分析结果如表 4、表 5 所示。

表 4 L 波段 InSAR 系统参数

Tab. 4 System parameters of L-band InSAR

参数	数值
信号载频	1.36 GHz
柔性基线长度	8 m
载机高度	4000 m
天线视角	45°
场景中心斜距	5657 m
基线与水平向夹角	0°

表 5 L 波段 InSAR 高程精度分析

Tab. 5 Height measurement accuracy of L-band InSAR

高程反演参数	测量误差	高程反演误差
σ_r	0.3 m	0.2121 m
σ_B	1 mm	0.5000 m
σ_α	0.007°	0.4887 m
σ_H	0.05 m	0.0500 m
σ_ϕ	3.97°	1.7202 m

在上述参数下的高程精度为 1.8696 m, 假定 POS 能具有 1 mm 量级的位置测量精度, 可见干涉相位的测量精度和柔性基线长度就成了影响 L 波段 InSAR 的高程精度的主要因素。

和 2D-SAR 要求的相对位置精度不同, 此时双天线 InSAR 双 POS 结构下要求的位置精度应考虑线性位置误差, 故 POS 要获得 1 mm 量级的位置测量精度并非易事, 相关的问题需深入研究。

值得指出的是, 由于 InSAR 实际上需要的是同时刻两天线相位中心的相对位置, 尽管 POS 的位置

精度在 GPS 数据间隔内具有随着时间增加而降低的特点，若假定两个 POS 的位置误差随时间的变化曲线一致，通过数据处理就可能获得满足 InSAR 使用要求的瞬时高精度相对基线参数。但事实上，由于 POS 惯性器件误差的影响，两个 POS 的位置误差发散趋势具有随机性，其位置误差随时间变化曲线很难具有一致性，上述假定很难成立。

解决上述问题的一个思路是利用长时 GPS 数据，估计每个 POS 的位置误差随时间变化曲线并对其数据实施校正。与此同时，也可考虑利用已有的挠曲形变建模补偿和传递对准技术研究如何进一步提高测量精度问题。

5.2.3 双站/重过航 InSAR 典型代表为编队卫星 X 波段 InSAR 系统，目前主要采用差分 GPS 信号获得天线相位中心的空间位置。当位置测量精度 5 cm 时，基线长度测量精度为 5 cm，1000 m 基线对应的基线倾角测量精度约为 0.0029°。

一个编队卫星 X 波段 InSAR 系统参数和对应的高程精度分析结果如表 6、表 7 所示。

表 6 编队卫星 X 波段 InSAR 系统参数
Tab. 6 System parameters of X-band InSAR satellites flying in formation

参数	数值
信号载频	10 GHz
基线长度	1000 m
卫星高度	500 km
天线视角	30°
场景中心斜距	577 km
基线与水平向夹角	0°

表 7 编队卫星 X 波段 InSAR 高程精度分析
Tab. 7 Height measurement accuracy of X-band InSAR satellites flying in formation

高程反演参数	测量误差	高程反演误差
σ_r	0.5 m	0.4330 m
σ_B	5 cm	8.3283 m
σ_α	0.0029°	14.6023 m
σ_H	0.05 m	0.0500 m
σ_ϕ	8°	0.2221 m

在上述参数下的高程精度为 16.8174 m。较长的基线有可能获得较高的高程测量精度，但长基线会

导致图像的去相干，故进一步提高天线相位中心的位置测量精度具有重要的意义。假定由 POS 提供的天线相位中心相对位置精度可达到 1 cm，系统的高程测量精度可达到 3.3975 m。

6 分布式 POS 的应用方向

6.1 多光学载荷遥感飞机

- 主子节点数：3~4 个
- 空间分布：10~30 m
- 姿态测量精度：0.0025°~0.005°

多光学载荷遥感飞机工作示意图如图 1 所示。

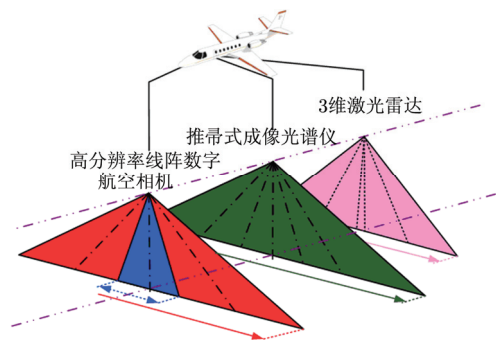


图 1 多光学载荷遥感飞机工作示意图
Fig. 1 The schematic diagrams of multiple optical payload remote sensing airplane

6.2 柔性长基线 InSAR

- 主子节点数：2~3 个
- 空间分布：8~100 m
- 相对位置测量精度：1~2 mm

应用平台除机载 8~15 m 长柔性基线 InSAR 外，还要考虑星载 60~100 m 长柔性基线 InSAR 系统。

星载柔性长基线 InSAR 的示例如图 2 所示的美国航天飞机载 SRTM 系统^[7]。

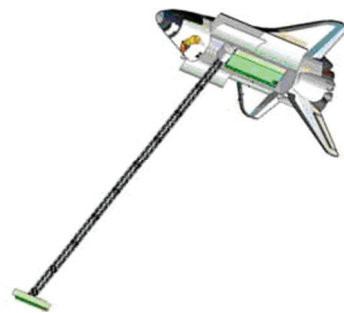


图 2 美国航天飞机载柔性长基线 SRTM 系统
Fig. 2 Space shuttle SRTM with flexible long baseline

6.3 机载稀疏阵列天线 3D-SAR

- 主子节点数: 8~16 个
- 空间分布: 10~15 m
- 相对位置测量精度: $1\text{ mm}-0.0625\lambda$

机载稀疏阵列天线 3D-SAR 工作示意图^[8,9]如图 3 所示。

6.4 艇载共形稀疏阵列天线成像雷达

- 主子节点数: 20~30 个
- 空间分布: 70~100 m
- 相对位置测量精度: $1\text{ mm}-0.0625\lambda$

艇载共形稀疏阵列天线成像雷达工作示意图^[10]如图 4 所示。

机载稀疏阵列天线 3D-SAR 和艇载共形稀疏阵列天线成像雷达将采用基于子阵结构的阵列天线,

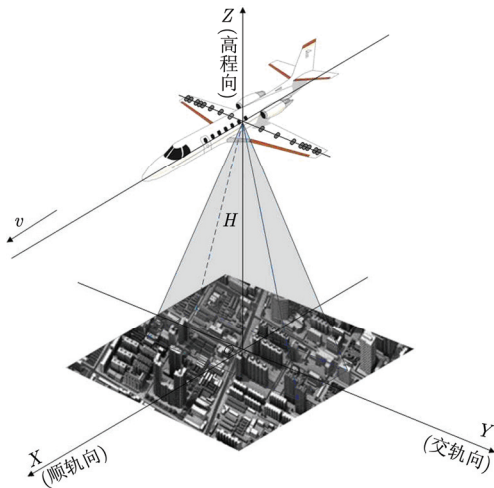


图 3 机载稀疏阵列天线 3D-SAR 工作示意图

Fig. 3 The schematic diagrams for airborne sparse array 3D-SAR system

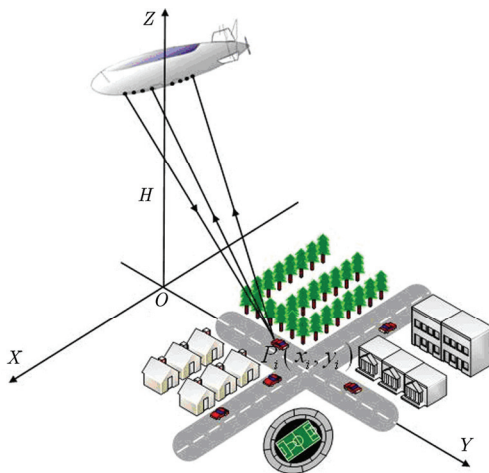


图 4 艇载共形稀疏阵列天线成像雷达工作示意图

Fig. 4 The schematic diagrams for airship conformal sparse array radar system

由于子阵数量较多, 所需固联在子阵相位中心处的 IMU 数量也较多, 要求以测量阵列形变为主要目的分布式 POS 子节点具有较高的位置测量精度, 同时具有较小的体积和重量。

要特别说明的是, POS 输出数据率较高, 可感知平台的高频振动信息。为减少平台高频振动影响, 可考虑在子阵和平台间采取减振措施。在此基础上, 对 POS 以较高数据率输出的数据进行滤波处理, 有可能会进一步提高位置和姿态测量精度。针对实际应用情况, 选用适当的 POS 数据滤波方法, 也是未来研究工作中的一个重点。

文献[11]研究了大型稀疏阵列天线成像雷达中的阵列形变误差测量和补偿方法, 给出了子阵位置测量误差在 1 cm 时的成像结果, 从一个方面说明了分布式 POS 应用的可行性。

6.5 分布式小卫星雷达

- 主子节点数: 2~6 个
- 空间分布: 200 m~2 km
- 相对位置测量精度: 1~5 cm

美国的 TechSat-21 分布式小卫星雷达系统^[12]如图 5 所示。

7 结束语

分布式 POS 的概念是我国根据高分辨率对地观测系统的实际应用需求提出的, 具有创新性, 其技术实现难度很大, 但具有重要的应用价值。

本文讨论了分布式 POS 的体制, 论述了其关键技术指标, 明确了其可能的应用方向。针对不同的应用方式, 初步分析了获得高精度位置和姿态信息可能的技术途径, 对立足自我, 突破高分辨率对地观测系统的关键技术具有积极的推动作用。

感谢北京航空航天大学的房建成教授、钟麦英教授、刘百奇博士、李建利博士、刘占超博士、郭佳博士对本文研究工作的无私帮助, 与他们的讨论使我们受益匪浅。

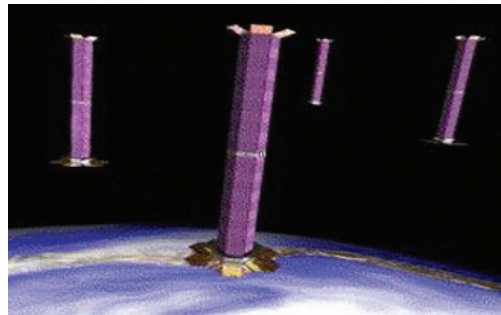


图 5 分布式小卫星雷达系统

Fig. 5 Distributed small satellite radar system

参考文献

- [1] POS AV510/610 Installation and operation manual[M]. Applanix Corporation, 2010.
- [2] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995.
- [3] 刘百奇, 房建成. 一种基于可观测度分析的 SINS/GPS 自适应校正滤波新方法及其应用[J]. 航空学报, 2008, 29(2): 430-436. Liu Bai-qi and Fang Jian-cheng. A new adaptive feedback kalman filter based on observability analysis for SINS/GPS[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2008, 29(2): 430-436.
- [4] 刘百奇, 房建成. 一种基于可观测度分析的 SINS / GPS 空中对准新方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4302-4305. Liu Bai-qi and Fang Jian-cheng. Novel in-flight alignment based on observability analysis for SINS/GPS[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(16): 4302-4305.
- [5] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. Wang Chao, Zhang Hong, and Liu Zhi. Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry[M]. Beijing: Science press, 2002.
- [6] Li Dao-jing, Liu Bo, Pan Zhou-hao, *et al.* Airborne MMW InSAR interferometry with cross-track three-baseline antennas[C]. 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Nuremberg, April 2012: 301-303.
- [7] J J van Zyl. The shuttle radar topography mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography[J]. *Acta Astronautica*, 2001, 48(5-12): 559-565.
- [8] Hou Y N, Li D J, and Hong W. The thinned array time division multiple phase center aperture synthesis and application[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2008), Boston, America, 2008: 25-28.
- [9] 滕秀敏, 李道京. 机载交轨稀疏阵列天线雷达的下视三维成像处理[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1311-1317. Teng Xiu-min and Li Dao-jing. Downward-looking 3D imaging processing for airborne cross-track sparse array radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(6): 1311-1317.
- [10] Teng X M and Li D J. Stationary targets imaging and moving targets detection based on airship conformal sparse array[C]. 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR'2011), 2011: 396-399.
- [11] 侯颖妮, 李道京, 尹建凤, 等. 基于稀疏综合孔径天线的艇载成像雷达研究[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2377-2382. Hou Ying-ni, Li Dao-jing, Yin Jian-feng, *et al.* Airship imaging radar based on aperture synthesis of thinned array[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(12): 2377-2382.
- [12] Martin M and Stallard M. Distributed satellite missions and technologies-the techsat 21 program[C]. AIAA Space Technology Conference, 1999: 28-30.

作者简介



李道京(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达系统和雷达信号处理技术。

E-mail: lidj@mail.ie.ac.cn



潘舟浩(1986-), 男, 博士生, 研究方向为机载毫米波 InSAR 数据处理技术。

E-mail: pzhphz2008@163.com



滕秀敏(1987-), 女, 工程师, 研究方向为信息安全技术。

E-mail: xmteng@163.com