

多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验的飞行路线规划与雷达参数设计

薛 莲¹, 周 鹏¹, 张振华², 王 影², 张 晰³, 韩倩倩²

(1. 中国石油大学(华东) 海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580; 2. 北京遥测技术研究所, 北京 100076; 3. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 多模式小卫星 SAR(synthetic aperture radar, 合成孔径雷达)是一种搭载于小卫星平台的新体制雷达系统, 它集 SAR、散射计、高度计、波谱仪 4 种传感器的优势于一身。它可以根据需求分时实现几种工作模式的切换, 可兼顾对海洋目标和海洋动力环境的高精度测量。由于卫星发射存在诸多不确定因素, 为了在卫星发射前对多模式小卫星 SAR 进行检验, 本文对拟开展的机载挂飞试验进行了介绍。首先, 介绍了拟开展的机载挂飞试验的等效性原则。接下来, 介绍了各种工作模式试验、SAR/散射计联合反演试验、多视向 SAR 试验的飞行路线规划。之后, 介绍了机载挂飞试验的雷达参数设计方法。最后, 给出了各种工作模式的雷达参数设计结果。所设计的飞行路线和雷达参数可以为机载挂飞试验服务, 并且实现了星载技术指标的准等效验证。通过小卫星 SAR 卫星组网可弥补目前 SAR 卫星时间分辨率低的缺点。

关键词: 多模式小卫星 SAR; 机载挂飞试验; 飞行路线规划; 雷达参数设计; 卫星组网

中图分类号: TP955 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2021)05-0062-12

DOI: 10.11759/hyxx20210208003

多模式小卫星 SAR 是一种搭载于小卫星平台的新体制雷达系统^[1-2]。它利用二维相控阵天线波束指向控制灵活的优势, 在星上可以分时实现多种 SAR 成像模式, 以及高度计、散射计、波谱仪等海洋动力要素探测模式。通过小卫星 SAR 卫星组网可解决目前 SAR 卫星时间分辨率低的不足。多模式小卫星 SAR 具有非常高的灵活性, 既能实现高精度的目标探测, 又能实现高精度的海洋动力要素反演, 具有良好的发展前景。

在完成 SAR 卫星载荷的地面环境、振动、部件测试等试验的基础上, 在卫星载荷入轨前开展机载挂飞试验对卫星载荷的功能和性能进行准等效验证为国内外通行做法^[3]。为完成载荷功能和性能验证, 同时兼顾成本和效率, 需对机载试验的飞行路线进行合理规划。另外, 由于平台高度和速度等方面的差异, 星载雷达的工作参数并不适用于机载试验, 需对机载试验中的雷达参数进行专门设计。

针对 SAR、高度计、散射计、波谱仪四种模式的系统参数设计方法, 国内外学者已经开展了很多相关研究。王睿^[4]比较详细地介绍了 SAR 条带模式的

天线长度、PRF(pulse repetition frequency, 脉冲重

复频率)等参数的选取方法。张卫华等^[5]讨论了如何在条带 SAR 参数设计过程中实现高分辨率指标, 给出了星载 SAR 几何关系、PRF 等参数的选取方法。Naderi 等^[6]介绍了 NSCAT 星载散射计的性能指标、天线子系统和分辨率的设计、风场反演精度分析等内容。Dong 等^[7]和 Lin 等^[8]介绍了一种 Ku 波段扇形波束旋转扫描散射计的性能指标、系统参数、风场反演精度分析等内容。杨双宝^[9]介绍了高度计的系统设计, 以及对高度计信号带宽、PRF、脉冲宽度、峰值发射功率等参数的选择进行了研究, 并进行了系统的仿真验证。储小青^[10]对海浪波谱仪系统参数设置进行了研究, 主要包括入射角、波段、波束宽度、

收稿日期: 2020-11-06; 修回日期: 2021-02-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1405600); 山东省自然科学基金(ZR2019MF004); 国家海洋局海洋遥测工程技术中心创新青年基金项目(2017003); 自然资源部第一海洋研究所资助项目(N1705037)

[Foundation: National Key R&D Program of China, No. 2017YFC1405600; Shandong Provincial Natural Science Foundation, No. ZR2019MF004; the Youth Fund of China Marine Telemetry Engineering Research Center, No. 2017003; Project of the First Institute of Oceanography, MNR, No. N1705037]

作者简介: 薛莲(1995—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事海洋微波遥感研究, E-mail: z18050027@s.upc.edu.cn; 周鹏(1976—), 通信作者, E-mail: zhoupeng@upc.edu.cn

积分时间等系统参数的选取方法。总体而言，已有文献通常只是给出了 SAR、散射计、波谱仪、高度计的系统参数设计结果，在系统参数设计方法的论述方面叙述相对较少。

本文针对多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验的飞行线路规划与雷达参数设计进行了研究。首先对多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验的等效性原则进行了介绍，接下来介绍了多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验的飞行线路规划，之后对多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验的雷达参数设计方法进行了介绍，最后给出了系统参数设计的结果。所设计的多模式小卫星 SAR 等效挂飞试验的飞行路线规划与雷达参数设计结果，为拟开展的机载挂飞试验提供了重要基础，并且实现了星载技术指标的准等效验证。

1 多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验的等效性原则

1.1 工作模式对等原则

在多模式小卫星 SAR 中，设计有 SAR、波谱仪、散射计、高度计四种工作模式。波谱仪模式和高度计模式工作于小入射角，SAR 模式和散射计模式工作于中等入射角。在小卫星 SAR 平台上，可通过天线指向控制和平台姿态控制相结合实现上述 4 种工作模式。在机载挂飞试验中，通过在不同飞行架次上采用不同的天线安装方式，同时利用所搭载的二维相控阵天线子阵，同样可应用于 SAR、波谱仪、散射计、高度计 4 种工作模式，从而保证了机载挂飞试验与小卫星 SAR 系统的工作模式对等。图 1 展示了机载挂飞试验过程中几种工作模式对应的波束扫描状态。

1.2 组网功能等效原则

在机载挂飞实验中，通过飞行架次和路线的设计，以时间分辨率相当的原则模拟多颗卫星工作于 SAR、波谱仪、散射计、高度计等不同工作模式，准同步地获取同一区域的目标和海洋动力参数信息，从而保证了机载挂飞试验方案的组网功能等效。例如：通过设计飞行路线和合理控制天线波束指向，可在短时间内分别以 SAR 模式和散射计模式获取同一海域的回波数据，然后可通过 SAR 和散射计的联合反演提高风场反演精度。再如：通过设计飞行路线，可在短时间内以 SAR 模式从不同视向观测同一海域，然后可通过处理多视向数据降低 SAR 海浪反演的截断波长效应。

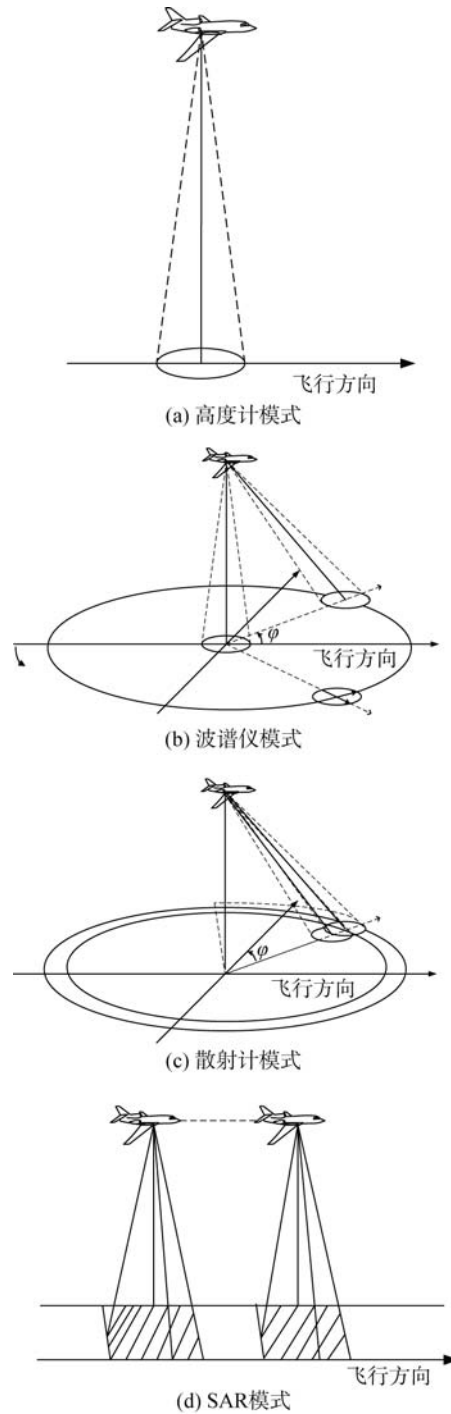


图 1 不同模式下机载挂飞试验波束扫描示意图
Fig. 1 Diagram of beam scanning in the airborne flight test under various modes

1.3 SAR 图像分辨率相当原则

由于平台尺寸等方面的限制，机载挂飞试验中只使用小卫星 SAR 的一个天线子阵，造成小卫星 SAR 和机载试验的方位分辨率指标并不相等。因此，拟采用“多视处理后方位分辨率相当”等原则保证

方位分辨率的实质等效,通过采用相同的信号带宽保证距离分辨率的实质等效。这里的“多视处理后方位分辨率相当”原则是指:

$$\frac{l_{sa}}{2} = M \cdot \frac{l_{aa}}{2}, \quad (1)$$

式中, l_{sa} 和 l_{aa} 分别表示小卫星 SAR 和机载 SAR 的方

位向天线尺寸, M 表示方位向多视处理倍数。

1.4 机载挂飞试验的等效性总结

表 1 从工作模式数量、卫星组网功能、SAR 空间分辨率、时间分辨率、载荷测试项目 5 个方面,对多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验与小卫星 SAR 在轨工作的准等效性进行了说明。

表 1 多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验的准等效性说明列表

Tab. 1 List of the quasi equivalence of the airborne flight test for multimode small satellite SARs

| 等效性的内容 | 小卫星 SAR | 机载飞行试验 |
|-----------|--|--|
| 工作模式数量 | 4 种, 包括: SAR、波谱仪、散射计、高度计。依靠小卫星 SAR 的姿态调整和波束指向控制实现模式切换 | 4 种, 包括: SAR、波谱仪、散射计、高度计。依靠不同架次使用不同天线安装方式和波束指向控制实现模式切换 |
| 卫星组网功能 | 2 颗或更多颗卫星以相对较短的时间间隔, 分别工作在 SAR、波谱仪、散射计、高度计等不同工作模式下, 对同一海域进行目标和海洋动力信息采集 | 通过飞行架次和路线的设计, 以时间分辨率相当的原则模拟多颗卫星工作于 SAR、波谱仪、散射计、高度计等不同模式, 获取同一区域的目标和海洋动力参数信息 |
| SAR 空间分辨率 | 距离分辨率取决于信号带宽, 方位分辨率取决于方位向天线尺寸 | 采用和小卫星 SAR 相同的信号带宽, 采用“多视处理后方位分辨率相当”的原则进行成像处理 |
| 时间分辨率 | 按 18 颗卫星组网设计, 对重点观测区域的重访周期为 1 小时以内 | 对实验区域观测按循环绕飞方式进行。所选取的运-5B 飞机, 其飞行速度在 160 km/h 以上, 考虑飞行过程中的姿态和航线调整时间, 一次绕飞距离总长控制在约 100 km 以内, 绕飞周期可控制在 1 小时以内, 与小卫星组网重访时间相当 |
| 载荷测试项目 | 地面环境测试、地面振动测试、地面部件(天线、收发信道、信号处理机等)测试、卫星飞行测试等 | 地面环境测试、地面振动测试、地面部件(天线、收发信道、信号处理机等)测试、载机飞行测试等 |

2 多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验的飞行路线规划

多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验的目的是验证 4 种工作模式、SAR 空间分辨率指标、卫星组网功能模拟。需验证的项目较多, 同时应兼顾成本和效率, 因此需对机载试验的飞行路线进行合理规划。

多模式小卫星 SAR 采用的是二维相控阵天线, 全阵尺寸为 3.75 m×0.75 m, 由 5 个子阵构成, 距离向和方位向的扫描能力分别为±15°和±10°。高度计和波谱仪模式均具有小入射角的特点, 在安装天线时将法线垂直于地面安装。SAR 和散射计模式均具有中等入射角的特点, 在安装天线时倾斜 45°或 60°安装。对于天线安装方式相同的工作模式, 为节约成本、提高效率, 在设计飞行架次时可考虑对不同模式的测试进行适当合并。

经综合设计, 飞行试验中规划了 5 个飞行架次。第 1 架次为设备检飞, 验证设备工作状态; 第 2 架次完成高度计模式、波谱仪模式的数据录取; 第 3 架次完成散射计模式的数据录取; 第 4 架次完成 SAR 模式、散射计模式的数据录取, 为 SAR/散射计联合反演等试验提供数据支撑; 第 5 架次完成 SAR 模式的数据录取, 为多视向 SAR 等试验提供数据支撑。

2.1 高度计模式和波谱仪模式的飞行路线规划

第 2 架次工作于高度计模式和波谱仪模式, 将相控阵天线的法线垂直于地面安装。飞行高度选取 3 km。各航段的编号以带圆圈的数字表示, 使用①—⑪航段飞行, 在④—⑤—⑥—⑦—⑧—⑨航段完成高度计模式和波谱仪模式数据的获取。图 2 为第 2 架次的挂飞航线规划。

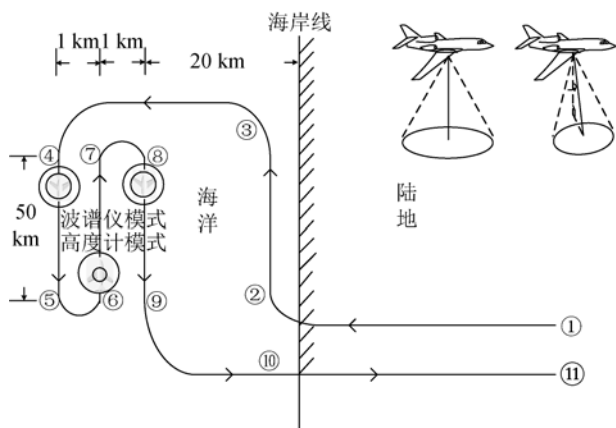


图2 第2架次的挂飞航线规划

Fig. 2 Flight route planning of the second flight

2.2 散射计模式和 SAR/散射计联合反演试验的飞行路线规划

第3架次工作于散射计模式，将天线倾斜 45° 安装。飞行高度选取3 km，使用①—⑫航段飞行，在④—⑫航段完成散射计模式数据的获取。图3为第3架次的挂飞航线规划。

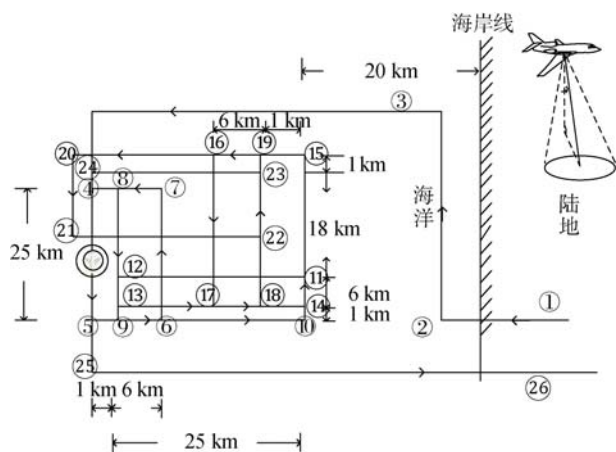


图3 第3架次的挂飞航线规划

Fig. 3 Flight route planning of the third flight

第4架次工作于SAR模式、散射计模式，开展SAR对地和海岸带成像、SAR/散射计联合反演等试验，将天线安装角度倾斜 60° 安装，飞行高度选取3 km，飞行轨迹点沿①—⑬排布。

图4为第4架次的挂飞航线规划。其中：

- ①—②航段：SAR对地成像模式。
- ②—③航段：SAR对地成像模式，对海岸线成像观测。
- ③—④航段：向海洋深入飞行，飞行距离 >20 km，

并将工作模式切换为散射计模式。

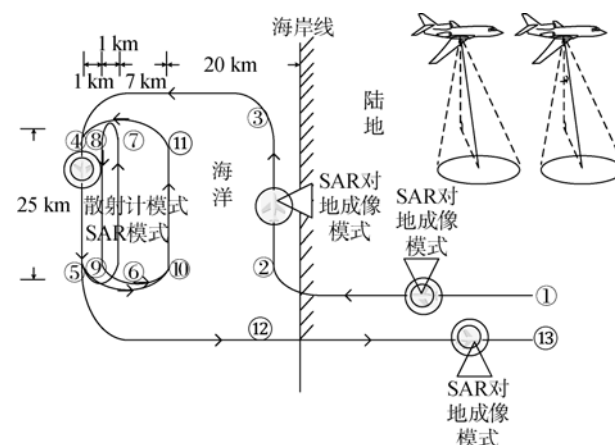


图4 第4架次的挂飞航线规划

Fig. 4 Flight route planning of the fourth flight

④—⑤航段：散射计模式，实现外波束的数据录取。

- ⑤—⑥—⑦—⑧航段：飞行返回。
- ⑧—⑨航段：散射计模式，录取内波束的数据。
- ⑩—⑪航段：SAR正侧视模式。
- ⑫—⑬航段：SAR对地成像模式。

2.3 SAR模式和多视向SAR试验的飞行路线规划

第5架次工作于SAR模式，开展SAR对地和海岸带成像、多视向SAR等试验，将天线安装角度倾斜 60° 安装，飞行高度选取3 km，飞行轨迹点沿①—⑬排布。

图5为第5架次的挂飞航线规划，其中：

- ①—②航段：SAR对地成像模式。
- ②—③航段：SAR对地成像模式，对海岸线成像观测。
- ③—④航段：向海洋深入飞行，飞行距离 >20 km。
- ④—⑤航段：SAR正侧视模式，为多视向SAR试验录取数据。
- ⑤—⑥航段：SAR正侧视模式，为多视向SAR试验录取数据。
- ⑥—⑦航段：先后为SAR前斜视模式、正侧视模式、后斜视模式，为多视向SAR试验录取数据。
- ⑦—⑧航段：SAR正侧视模式，为多视向SAR试验录取数据。
- ⑧—⑨航段：向陆地飞行，SAR对地成像模式。

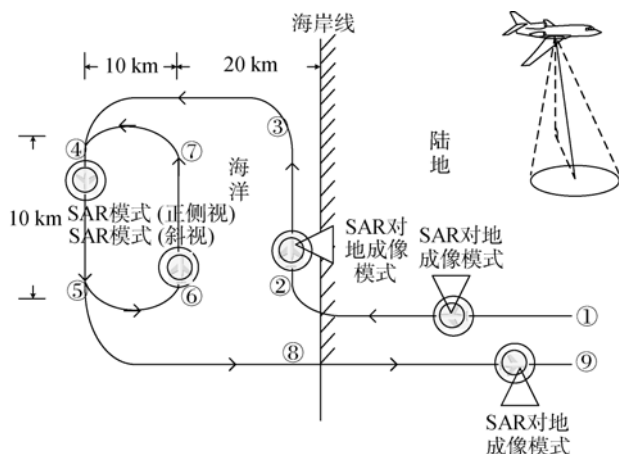


图5 第5架次的挂飞航线规划
Fig. 5 Flight route planning of the fifth flight

3 多模式小卫星 SAR 机载挂飞试验的雷达参数设计方法

3.1 SAR 模式的参数设计方法

SAR 模式下机载挂飞实验的系统参数设计需确定测绘带宽范围、方位向多视数、信号带宽、 P_{RF} 等工作参数。试验时天线采用的是小卫星 SAR 的一个天线子阵, 因此其尺寸和峰值功率为已知值。平台高度采用载机的安全飞行高度, 可根据经验确定。地距分辨率、方位分辨率采用的是和小卫星 SAR 相同的指标值。中心入射角采用机载 SAR 常用的 60° , 因此入射角范围可根据天线距离向的扫描能力确定。脉冲宽度、载波频率、噪声系数等参数均采用和小卫星 SAR 相同的参数值。距离模糊比、方位模糊比、系统灵敏度、数据率等是 SAR 系统中的重要指标, 当系统参数设计完成后, 需检验上述指标是否满足指定要求^[11-12]。图 6 对 SAR 模式参数设计的流程进行了总结, 其主要步骤如下。

首先, 根据天线尺寸、波长、入射角范围、平台高度等, 确定近端入射角和远端入射角对应的测绘带宽范围^[12]。

第 2 步, 由式(1)计算方位向多视数 M 。

第 3 步, 确定信号带宽 B_r 下限^[1]:

$$B_r \geq \frac{C}{2\rho_{gr} \sin \theta_n}, \quad (2)$$

式中, C 为光速, ρ_{gr} 为地距分辨率, θ_n 为近端入射角。

第 4 步, 确定 P_{RF} (pulse repetition frequency, 脉冲重复频率) 的上限和下限^[1]。在确定了 P_{RF} 的下限

和上限后, 为使回波脉冲的时间范围避开发射脉冲和星下点回波, 需绘制斑马图进行波位设计并对 P_{RF} 进行选择^[12]。

第 5 步, 计算所需的平均功率 P_{av} :

$$P_{av} = \frac{P_t T_r}{P_{R1}}, \quad (3)$$

式中, P_t 为峰值发射功率, P_{R1} 为脉冲重复时间, T_r 为脉冲宽度。

第 6 步, 验证距离模糊比、方位模糊比、系统灵敏度、数据率等指标是否满足要求^[12]。若不满足指标要求, 需再作调整。

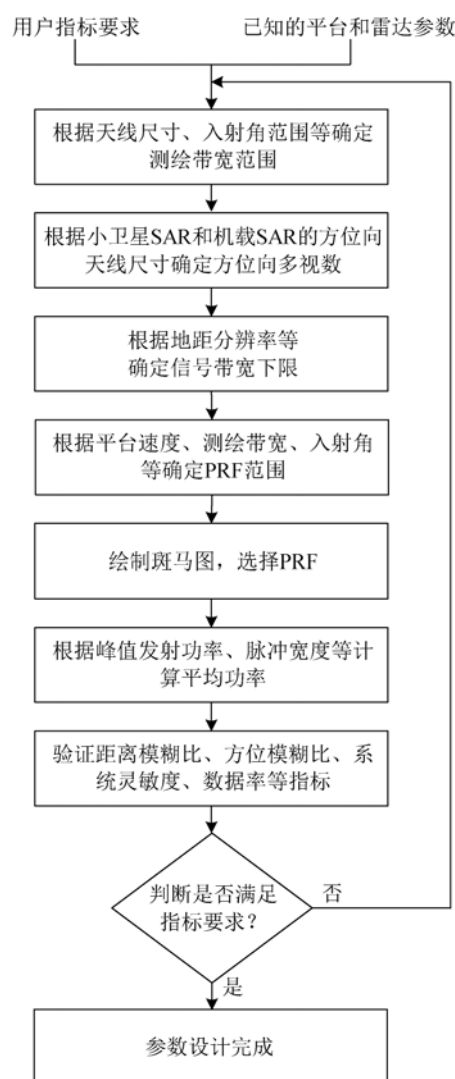


图6 SAR 模式参数设计流程图
Fig. 6 Parameter design flow chart of the SAR mode

3.2 高度计模式的参数设计方法

高度计模式下机载挂飞实验的系统参数设计需

确定方位向波束宽度、距离向波束宽度、信号带宽、 P_{RF} 范围、峰值发射功率、雷达足迹大小等工作参数。测高精度、有效波高测量范围采用与小卫星 SAR 相同的指标值。与 SAR 模式类似，方位向天线尺寸、距离向天线尺寸、平台高度、载波频率、脉冲宽度等参数往往是已知的^[13-14]。图 7 对高度计模式参数设计的流程进行了总结，其主要步骤如下：

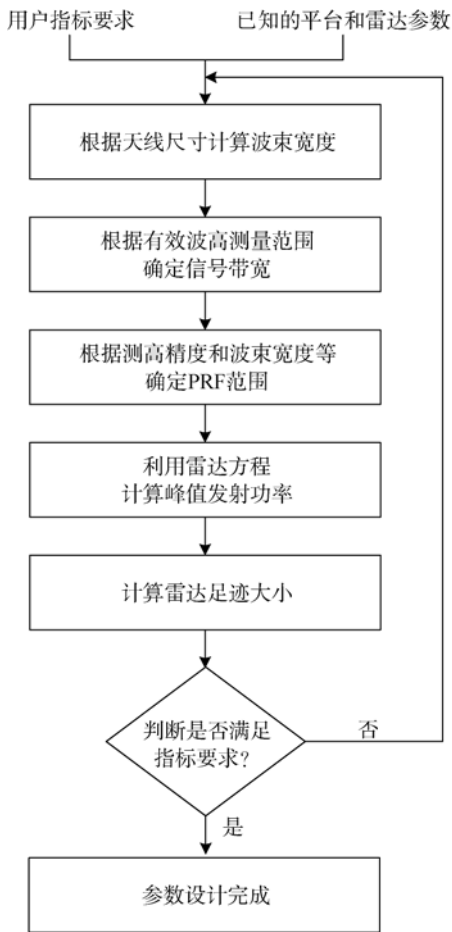


图 7 高度计模式参数设计流程图

Fig.7 Parameters design flow chart of altimeter mode

首先，由天线尺寸确定方位向波束宽度 φ_a 和距离向波束宽度 φ_r ^[1]。

第 2 步，确定信号带宽 B 。要求距离分辨率 ρ_r 要小于希望测量的最小振幅^[1](即：有效波高测量范围最小值 $H_{s,min}$ 的一半)。

第 3 步，确定 P_{RF} 的范围。测高精度的公式可表示为：

$$e_h = 1.25 \sqrt{\frac{(N_g \cdot e_T)^2 + e_{s,max}^2}{N_g \cdot N}} \cdot \left(1 + \frac{2}{S_{NR}}\right), \quad (4)$$

式中， N_g 为形成跟踪门的数目(一般取 $N_g=4$)， e_T 为系统点目标分辨率且有 $e_T=0.426C\tau/2$ (其中 τ 为压缩后的脉冲宽度)， $e_{s,min}$ 为最大均方波高(即：有效波高测量范围最大值 $H_{s,min}$ 的四分之一)， N 为独立测量数(即： P_{RF} 与高度测量平均时间的乘积)。利用式(4)，可计算出 P_{RF} 的下限。另外，为避免出现距离模糊，应满足：

$$P_{RF} \leq \frac{C}{2H \cdot \left[\sec\left(\frac{\varphi_a}{2}\right) - 1\right]}, \quad (5)$$

式中， H 为平台高度。利用式(5)，可计算出 P_{RF} 的上限。

第 4 步，利用雷达方程计算峰值发射功率 P_t 。具体的计算公式为^[1]：

$$P_t = \frac{64\pi^2 \cdot H^3 \cdot kBT_0 F \cdot S_{NR} \cdot L}{G^2 \lambda^2 \cdot N_{E\sigma^0} \cdot C\tau}, \quad (6)$$

式中， k 为玻尔兹曼常数， $T_0=290$ K， F 为接收机噪声系数， S_{NR} (signal to noise ratio, 信噪比)取 10 dB， L 为系统损耗， G 为天线增益， λ 为波长， $N_{E\sigma^0}$ 为归一化噪声系数。

第 5 步，根据几何关系和波束宽度计算雷达足迹大小 D_F ^[1]。

3.3 散射计模式的参数设计方法

散射计模式下机载挂飞实验的系统参数设计需确定内外波束入射角和视角、天线旋转速度、峰值发射功率、 P_{RF} 范围等工作参数。与 SAR 模式类似，方位向天线尺寸、距离向天线尺寸、平台高度、载波频率、脉冲宽度等参数往往是已知的。内波束刈幅、外波束刈幅、地距分辨率、方位分辨率的指标值，可根据机载平台的飞行高度和天线尺寸等估算后进行合理设定。信号带宽、去调频处理后带宽、回波功率归一化标准偏差采用与小卫星 SAR 相同的参数值。图 8 对散射计模式参数设计的流程进行了总结，其主要步骤如下：

第 1 步，根据内波束刈幅、外波束刈幅的指标值，确定天线内外波束视角和入射角^[1]。

第 2 步，根据距离向、方位向的天线尺寸计算距离向、方位向天线的波束宽度。

第 3 步，计算天线旋转速度的下限 Ω_{min} 。根据沿星下点轨迹连续覆盖的要求，可得到^[1]：

$$\Omega_{min} = 2\pi \cdot \frac{v_g}{\rho_{gr}}, \quad (7)$$

式中， v_g 为平台地面速度， ρ_{gr} 为地距分辨率。

第 4 步，确定 P_{RF} 的范围。根据沿扫描方向轨迹

连续覆盖的要求, 可得到:

$$P_{RF} \geq M_b \cdot \frac{v_t}{\rho_{az}}, \quad (8)$$

式中, M_b 为散射计的波束个数, v_t 为波束足印在地面扫描时的切向速度, ρ_{az} 为方位分辨率。接下来, 根据避免距离模糊的要求确定 P_{RF} 的上限。对应的计算公式为^[1]:

$$P_{RF} \leq \frac{C}{2\rho_{gr} \sin \theta_f}. \quad (9)$$

类似于 SAR 模式中的约束关系, 当在 P_{RF} 的上、下限之间挑选具体的 P_{RF} 时, 回波的返回时间需避开发射脉冲和星下点回波的返回时间。

根据回波功率归一化标准偏差 K_p 与信噪比 S_{NR} 的关系, 可计算出所需的 S_{NR} ^[12]。

最后, 利用雷达方程计算所需的峰值功率^[7]。

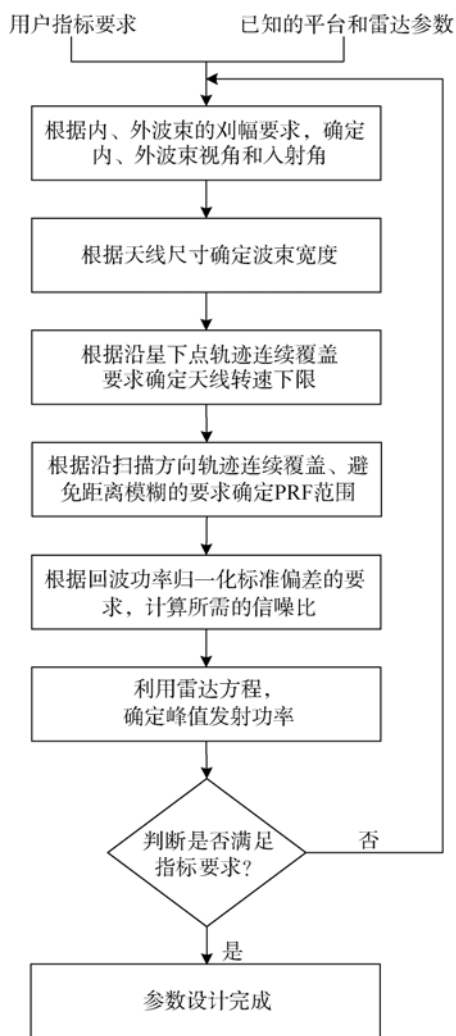


图 8 散射计模式参数设计流程图

Fig. 8 Parameters design flow chart of the scatterometer mode

3.4 波谱仪模式的参数设计方法

波谱仪模式下机载挂飞试验的系统参数设计需确定入射角、天线转速、信号带宽、 P_{RF} 、最大扫描半径、峰值发射功率等工作参数。为确定上述工作参数, 距离向天线尺寸、方位向天线尺寸、平台高度、平台速度、载波频率、脉冲宽度、信噪比、积分时间等参数往往是已知的或给定的^[10, 15]。图 9 对波谱仪模式参数设计的流程进行了总结, 其主要步骤如下:

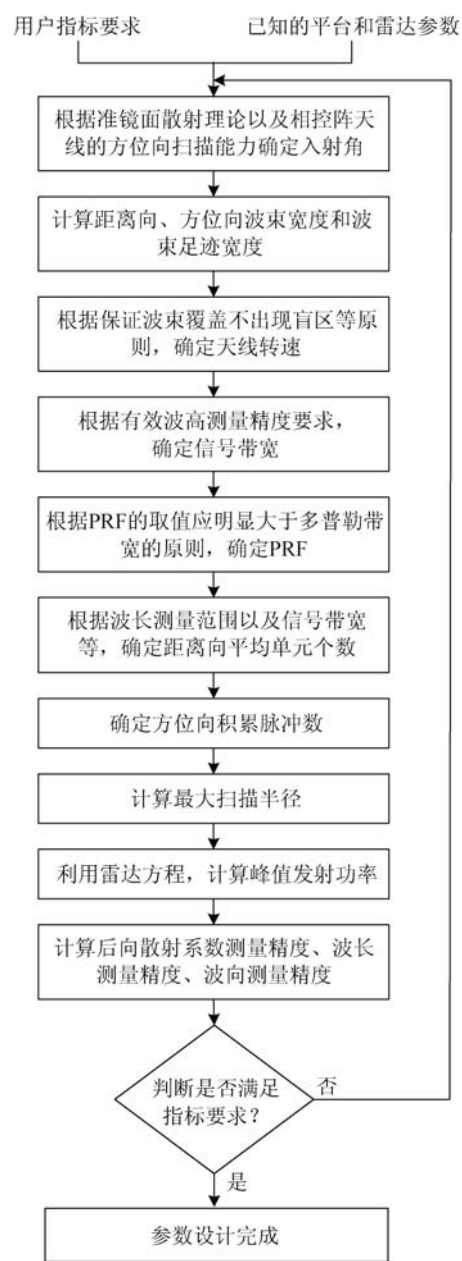


图 9 波谱仪模式参数设计流程图

Fig. 9 Parameters design flow chart of spectrometer mode

第 1 步, 确定波束入射角。由准镜面散射理论以及考虑到相控阵天线的方位向扫描能力在 10°以内, 因此将入射角确定为 0°和 10°。

第 2 步, 根据距离向、方位向的天线尺寸计算距离向、方位向天线的波束宽度 φ_a 和 φ_r 。然后, 再计算方位向和距离向波束足迹宽度 X_a 和 X_r ^[10]。

第 3 步, 确定天线转速 Ω 。由于只设置了 1 个 10°的小入射角波束, 天线转速应保证波束覆盖不出现盲区, 即有:

$$\Omega \geq 2\pi \cdot \frac{v_g}{X_r}, \quad (10)$$

式中, X_r 为距离向波束足迹宽度。

第 4 步, 根据有效波高测量精度要求确定信号带宽 B ^[15]。

第 5 步, 确定 P_{RF} 。在星载波谱仪中, 确定 P_{RF} 的原则主要是避免距离模糊。在机载挂飞试验中, 由于飞机飞行高度低造成距离向波束足印小, 距离模糊的影响基本可以忽略不计。同 SAR 模式类似, P_{RF} 的取值应保证明显大于多普勒带宽 $B_d \approx$

$2v/\lambda$ 。

第 6 步, 根据波长测量范围以及信号带宽等确定距离向平均单元个数 $N_{g,avg}$:

$$N_{g,avg} \cdot \frac{C}{2B \sin \theta} \leq \frac{\lambda'_{min}}{2}, \quad (11)$$

式中, θ 为入射角, λ'_{min} 为波长测量范围的最小值。

第 7 步, 确定方位向积累脉冲数 $N=P_{RF} \times T_{int}$, 式中 T_{int} 为积分时间^[1]。

第 8 步, 根据天线波束入射角、视角等, 计算最大扫描半径。

第 9 步, 利用雷达方程计算峰值发射功率 P_t ^[1]。

最后, 计算波长测量精度、波向测量精度、后向散射系数测量精度^[10]。

4 设计结果与分析

4.1 SAR 模式雷达参数设计结果与分析

按照 3.1 节的方法对 SAR 模式进行了参数设计。表 2、表 3 分别给出了 SAR 模式的技术指标与技术参数的设计结果。

表 2 SAR 模式参数设计的技术指标

Tab. 2 Performance indicators of the SAR mode

| SAR 模式参数设计的技术指标 | | | | | | | |
|-----------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|-----------|
| 地距分辨率 | 3 m | 方位分辨率 | 3 m | 测绘带下限 | 0.2 km | 测绘带上限 | 1.8 km |
| 距离模糊比 | <-20 dB | 方位模糊比 | <-20 dB | 系统灵敏度 | <-20 dB | 数据率 | <100 Mbps |

表 3 SAR 模式的主要技术参数设计结果

Tab. 3 Main technical parameters of the SAR mode

| SAR 模式的主要技术参数设计结果 | | | | | | | |
|-------------------|----------------------|----------|--------|------|---------|------|----------------------|
| 距离向天线 | 0.75 m | 方位向天线 | 0.75 m | 飞行高度 | 3 km | 平台速度 | 44 m/s |
| 载频 | 9.6 GHz | 系统损耗 | 7 dB | 噪声系数 | 5 dB | 脉冲宽度 | 4×10^{-6} s |
| 信噪比 | 10 dB | 信号带宽 | 70 MHz | 视角范围 | 45°~75° | 峰值功率 | 640 W |
| 接收机保护 | 1×10^{-6} s | 斜视角 | 0° | 测绘带 | 0.5 km | 多视数 | 5 |
| 入射角 | 60° | P_{RF} | 500 Hz | | | | |

为进行优化设计, 在设计过程中, 选择了中心视角和 P_{RF} 分别为(60°, 500 Hz)、(60°, 2 500 Hz)、(50°, 2 000 Hz)、(50°, 500 Hz)的 4 种组合, 对模糊比、数据率、测绘带等指标的理论值进行了对比。表 4 给出了计算结果。

为验证分辨率等指标, 利用所设计的系统参数进行了含噪情况下的点目标成像模拟, 得到了点目标的脉冲响应函数(impulse response function, IRF), 并从 IRF 中进行了指标提取^[16]。图 10 和表 5 分别给

出了 IRF 的仿真结果和技术指标的提取结果。

综合表 4 中测绘带、数据率、模糊比等指标的理论值, 以及表 5 的指标提取值, 最终选择入射角 60°、 P_{RF} 为 500 Hz 的组合。利用表 3 中的 SAR 参数进行面目标成像模拟, 图 11 给出了面目标的原图和成像结果。对比原图和成像结果图, 取得了较好的成像效果。

4.2 高度计模式雷达参数设计结果

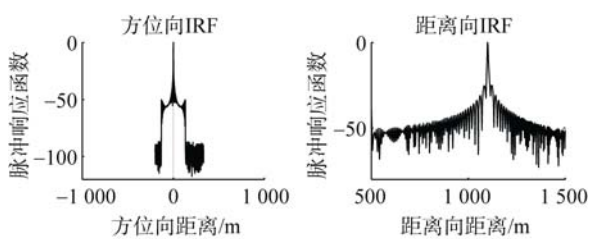
按照 3.2 节的方法对高度计模式进行了参数设计, 表 6 给出了高度计模式的参数设计结果。

表 4 SAR 模式下不同波位和 P_{RF} 组合的指标理论值
Tab. 4 Theoretical performance indicators of different combinations of wave position and P_{RF} under SAR mode

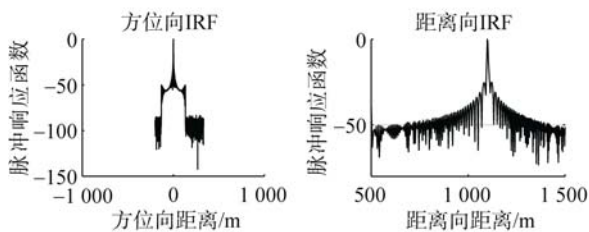
| 参数 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| 中心视角/(°) | 60 | 60 | 55 | 55 |
| 近端视角/(°) | 58.9 | 58.9 | 53.9 | 53.9 |
| 远端视角/(°) | 61.1 | 61.1 | 56.1 | 56.1 |
| P_{RF}/Hz | 500 | 2 500 | 2 000 | 500 |
| 距离模糊比/dB | -122.3 | -101.5 | -106.8 | -144.7 |
| 方位模糊比/dB | -89.3 | -117.3 | -113.4 | -89.3 |
| 系统灵敏度/dB | -84.9 | -91.9 | -93.0 | -86.9 |
| 数据率/Mbps | 1.2 | 6.1 | 4.8 | 1.2 |
| 测绘带/km | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.4 |

表 5 从脉冲响应函数中提取的指标结果
Tab. 5 Extraction results of performance indicators from IRFs

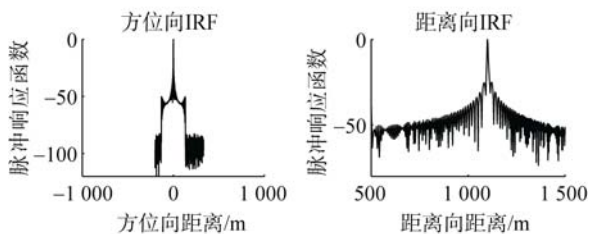
| 参数 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|
| 中心视角/(°) | 60 | 60 | 55 | 55 |
| P_{RF}/Hz | 500 | 2 500 | 2 000 | 500 |
| 地距分辨率/m | 2.8 | 2.7 | 2.7 | 2.7 |
| 方位分辨率/m | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 |
| 距离模糊比/dB | -75.9 | -59.9 | -57.1 | -57.1 |
| 方位模糊比/dB | -84.9 | -113.4 | -117.3 | -117.3 |
| 距离峰值旁瓣比/dB | -25.0 | -25.1 | -25.1 | -25.1 |
| 方位峰值旁瓣比/dB | -18.5 | -15.8 | -15.8 | -15.8 |
| 距离积分旁瓣比/dB | -15.5 | -17.2 | -17.2 | -17.2 |
| 方位积分旁瓣比/dB | -11.1 | -12.8 | -12.8 | -12.8 |



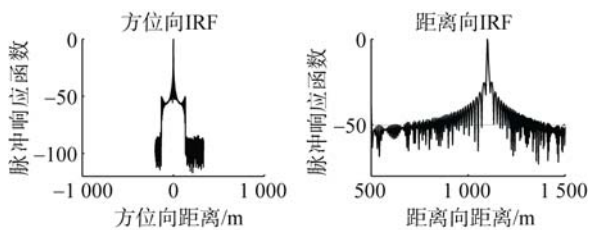
(a) 中心视角60°, P_{RF} 500 Hz



(b) 中心视角60°, P_{RF} 2 500 Hz



(c) 中心视角55°, P_{RF} 2 000 Hz



(d) 中心视角55°, P_{RF} 500 Hz

图 10 不同波位和 P_{RF} 组合的点目标方位向脉冲响应函数和距离向脉冲响应函数

Fig. 10 Azimuth and range impulse response functions of point targets corresponding to several combinations of wave position and P_{RF}



(a) 面目标原图



(b) 面目标成像结果图

图 11 SAR 模式面目标成像仿真结果

Fig. 11 Simulation result of a plane target

4.3 散射计模式雷达参数设计结果

按照 3.3 节的方法对散射计模式进行了参数设计,表 7 给出了散射计模式的参数设计结果。

4.4 波谱仪模式雷达参数设计结果与分析

按照 3.4 节的方法对波谱仪模式进行了参数设计,表 8 给出了波谱仪模式的参数设计结果。图 12 为波束足迹覆盖示意图。从图中可看出,利用所设计的天线转速,波束覆盖没有盲区。

表 6 高度计模式的主要技术参数设计结果

Tab. 6 Main technical parameters of the altimeter mode

| 高度计模式的主要技术参数设计结果 | | | | | | | |
|------------------|---------|-------|---------|----------|----------|------|-------------------------|
| 距离向天线 | 0.75 m | 方位向天线 | 0.75 m | 飞行高度 | 3 km | 平台速度 | 44 m/s |
| 载频 | 9.6 GHz | 系统损耗 | 7 dB | 噪声系数 | 5 dB | 脉冲宽度 | 12.8×10^{-6} s |
| 信噪比 | 10 dB | 信号带宽 | 300 MHz | P_{RF} | 1 000 Hz | 峰值功率 | 10 W |
| 雷达足迹 | 0.12 km | | | | | | |

表 7 散射计模式的主要技术参数设计结果

Tab. 7 Main technical parameters of the scatterometer mode

| 散射计模式的主要技术参数设计结果 | | | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|--------|-------|----------|--------|--------|
| 距离向天线 | 0.75 m | 方位向天线 | 0.75 m | 飞行高度 | 3 km | 飞行速度 | 44 m/s |
| 载频 | 9.6 GHz | 系统损耗 | 7 dB | 噪声系数 | 5 dB | 信号带宽 | 80 MHz |
| 脉冲宽度 | 1×10^{-5} s | 信噪比 | 10 dB | 内波束视角 | 45° | 内波束入射角 | 45° |
| 外波束视角 | 53° | 外波束入射角 | 53° | 天线转速 | 18 r/min | 峰值发射功率 | 10 W |
| P_{RF} | 200 Hz | | | | | | |

表 8 波谱仪模式的主要技术参数设计结果

Tab. 8 Main technical parameters of the spectrometer mode

| 波谱仪模式的主要技术参数设计结果 | | | | | | | |
|------------------|---------|---------|--------|--------|------------------------|----------|----------------------|
| 距离向天线 | 0.75 m | 方位向天线 | 0.75 m | 飞行高度 | 3 km | 飞行速度 | 44 m/s |
| 载频 | 9.6 GHz | 系统损耗 | 7 dB | 噪声系数 | 5 dB | 脉冲宽度 | 1×10^{-5} s |
| 信噪比 | 10 dB | 入射角 1 | 0° | 入射角 2 | 10° | 天线转速 | 22 r/min |
| 方位向波束宽度 | 2.3° | 距离向波束宽度 | 2.3° | 积分时间 | 6.4×10^{-2} s | P_{RF} | 5 kHz |
| 信号带宽 | 300 MHz | 峰值发射功率 | 80 W | 最大扫描半径 | 0.5 km | 波束足迹 | 0.12 km |
| 距离向单元数 | 5 个 | 积累脉冲个数 | 128 | | | | |

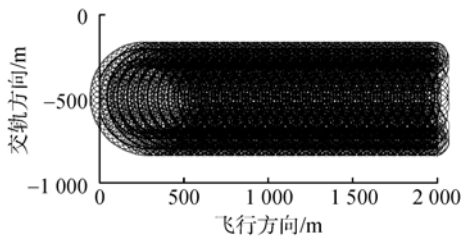


图 12 波谱仪海面波束轨迹示意图

Fig.12 Diagram of the trajectory of the spectrometer's beam footprint

5 结论

多模式小卫星 SAR 是一种具备 SAR、高度计、散射计、波谱仪四种工作模式的新型体制雷达，通过二维相控阵天线的波束控制因此具有很强的灵活性。同时目前存在 SAR 卫星时间分辨率低的问题可以由小卫星 SAR 卫星组网来解决。目前国内外通行做法是，在载荷入轨前开展机载等效挂飞试验，验证卫星载荷的功能和性能。本文先介绍了机载挂飞试验的等效性原则，又给出了不同工作模式的飞行

路线的规划，最后给出了机载挂飞试验的雷达参数设计方法。设计的飞行路线和雷达参数为机载挂飞飞行试验提供了重要依据。

参考文献:

- [1] LV Weiqiang, ZHOU Peng, WANG Ying, et al. Parameter design of multi-mode small satellite SAR system[C]//IEEE. 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 8617-8620.
- [2] ZHOU Peng, LV Weiqiang, ZHANG Zhenhua, et al. System parameter design of multimodal small satellite SARs operating in scan mode and transmit power optimization for marine scenes[J]. IEEE Access, 2020, 8: 36974-36987.
- [3] 国家国防科技工业局. 合成孔径雷达景象匹配制导系统机载挂飞试验要求 QJ 20317-2014[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2014.
State Administration of science, technology and industry for national defense. Airborne hang up test requirements for SAR scene matching guidance system QJ 20317-2014[S]. Beijing: State Administration of

- science, technology and industry for national defense, 2014.
- [4] 王睿. 星载合成孔径雷达系统设计与模拟软件研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(电子学研究所), 2003.
WANG Rui. Design and simulation software of spaceborne SAR system[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Electronics), 2003.
- [5] 张卫华, 王立刚. 高分辨率星载 SAR 系统关键参数的设计[J]. 雷达科学与技术, 2004, 2(4): 230-234.
ZHANG Weihua, WANG Ligang. Design of key parameters for high resolution spaceborne SAR system[J]. Radar science and technology, 2004, 2(4): 230-234.
- [6] NADERI F M, FREILICH M H, LONG D G. Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean - an overview of the NSCAT scatterometer system[J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(6): 850-866.
- [7] DONG Xiaolong, ZHU Di, LIN Wenming, et al. A Ku-band rotating fan-beam scatterometer: design and performance simulations[C]// IEEE. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2010: 1081-1084.
- [8] LIN Wenming, DONG Xiaolong, XU Xing-ou, et al. Performances of the rotating fan beam scatterometer on CFOSAT[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia, Spain: IEEE, 2018: 1489-1492.
- [9] 杨双宝. 基于合成孔径技术的高精度高度计技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
YANG Shuangbao. Research on high precision altimeter technology based on synthetic aperture technology[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [10] 储小青. 海浪波谱仪海浪遥感方法及应用基础研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
CHU Xiaoqing. Fundamental research on remote sensing method and application of ocean wave spectrometer[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [11] LIU Xihong, ZHOU Peng, ZHANG Xi, et al. The parameter design results of near space airship SAR system[C]//IEEE. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 1102-1105.
- [12] 吕伟强. 小卫星 SAR 系统参数设计方法与性能仿真平台研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
LV Weiqiang. Research on parameter design method and performance simulation platform of small satellite SAR system[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [13] CARAYON G, STEUNOU N, COURRIERE J L, et al. Poseidon 2 radar altimeter design and in flight preliminary performances[C]//IEEE. 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2002: 774-776.
- [14] DONG Xiaolong, XU Ke, LIU Huguang, et al. The radar altimeter and scatterometer of China's HY-2 satellite[C]//IEEE. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2004: 1703-1706.
- [15] HAUSER D, SOUSSI E, TOUVENOT E, et al. SWIMSAT: A real Aperture radar to measure directional spectra of ocean waves from space: Main characteristics and performance simulation[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(3): 421-437.
- [16] 鞠贵林. SAR 图像基础质量评估研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
JU Guilin. Basic quality assessment of SAR image[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronics and Technology, 2017.

Flight paths planning and radar parameters design of airborne flight test for multi-mode small satellite SARs

XUE Lian¹, ZHOU Peng¹, ZHANG Zhen-hua², WANG Ying², ZHANG Xi³,
HAN Qian-qian²

(1. China University of Petroleum, College of Oceanography and Space Informatics, Qingdao 266580, China; 2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China; 3. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Received: Nov. 6, 2020

Key words: multi-mode small satellite SARs; airborne flight test; flight path planning; radar parameter design; satellite networking

Abstract: Multi-mode small satellite SAR (synthetic aperture radar) is a new type of radar which can operate in SAR, altimeter, scatterometer and spectrometer modes in time-sharing manner. It can be used to measure both marine targets and marine dynamic environment with high precision. Because of many uncertain factors in satellite launch, in order to test the multi-mode Small Satellite SAR before satellite launch, this paper introduces the airborne flying test to be carried out. Firstly, the equivalence principle of the airborne flight test is introduced. Next, the flight paths planning of various operation mode tests, SAR/scatterometer joint inversion tests and multi direction SAR tests are introduced. Then, the design method of radar parameters for the airborne flight test is introduced. Finally, the radar parameter design results of various operation modes are given. The designed flight paths and calculated radar parameters provide an important basis for the airborne flight test. It realizes the quasi equivalent verification of spaceborne technical specifications. The shortage of low temporal resolution of SAR satellites can be solved by networking small satellite SARs.

(本文编辑: 丛培秀)