

文章编号: 2095-4980(2025)08-0784-09

基于低慢小平台的高精确度干涉 MiniSAR 系统设计

胡 伟, 闻 诚

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 为满足条件恶劣、环境危险的陆地和海洋观测需求, 提出一种面对低慢小平台的小型化、经济化的高精确度干涉微型合成孔径雷达(MiniSAR)系统设计方案。根据低慢小平台的特点及优势, 对 MiniSAR 系统中的成像模式、参数设计、系统组成等进行了论述。同时, 针对 MiniSAR 系统存在的关键技术问题进行了分析、梳理和论证。本文研究成果为系统研制提供一定的理论基础和技术支持, 同时为轻量化、低功耗 MiniSAR 设计提供有益参考。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 低慢小平台; 高精确度; 系统设计

中图分类号: TN958.94

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025029

High-precision interferometric MiniSAR system design for low-slow-small platform

HU Wei, WEN Cheng

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: To meet the demanding requirements of land and ocean observation under harsh and hazardous conditions, a compact, cost-effective, high-precision interferometric miniature Synthetic Aperture Radar(MiniSAR) system tailored for low, slow and small(LSS) platforms is proposed. Leveraging the unique characteristics and advantages of LSS platforms, the imaging modes, parameter design, and system architecture of the MiniSAR are discussed. In addition, the key technical challenges inherent to the MiniSAR system are analyzed, classified, and thoroughly evaluated. The findings provide both a theoretical foundation and technical support for system development, while offering valuable guidance for the design of lightweight, low-power MiniSAR solutions.

Keywords: Synthetic Aperture Radar; low-slow-small platform; high precision; systematic design

合成孔径雷达(SAR)具有观测范围广、干扰少、探测隐蔽^[1-2]等优点, 广泛用于地形测绘、资源勘探等国民经济领域和情报搜集、战场侦察监视、精确武器制导等军事应用领域^[3-4]。2023年, 中国低空经济规模已超过5 000亿元, 2030年有望达到2万亿元^[5]。因此, 适用于低空、低速、小平台的小型化和经济化^[6-7]雷达需求越来越多, 微型合成孔径雷达(MiniSAR)正逐步成为低空经济领域的研究热点。

MiniSAR系统需体积小、重量轻、集成度高, 这对于系统整体方案的设计提出了更高的要求。其中, 信号体制和天线体制是系统方案设计时首先需要考虑的问题。传统的脉冲体制雷达系统复杂, 体积、重量较大, 成本高, 并需要以卫星、飞机或大中型无人机作为平台。而调频连续波合成孔径雷达(Frequency-Modulated Continuous Wave SAR, FMCW SAR)^[8-9]发射窗长期接近调频信号重复间隔, 系统的占空比接近100%, 系统的峰值功率接近于平均功率, 避免了传统脉冲体制下产生高功率窄脉冲对雷达发射机设计的压力, 因此, 该雷达系统可做到结构简单, 体积小, 重量轻, 成本低。天线一般分为反射面天线和平板天线, 从扫描角度、指向调整

收稿日期: 2025-02-06; 修回日期: 2025-04-16

基金项目: 航天科技集团公司先进载荷专项资助项目(YY000286)

引用格式: 胡伟, 闻诚. 基于低慢小平台的高精确度干涉 MiniSAR 系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(8): 784-792. DOI: 10.11805/TKYDA2025029.

Citation format: HU Wei, WEN Cheng. High-precision interferometric MiniSAR system design for low-slow-small platform[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(8): 784-792. DOI: 10.11805/TKYDA2025029.

灵活性、重量等方面考虑, 平板天线具有更广泛的应用前景。同时, 结合合成孔径技术, 对系统进行可靠性设计^[10], 既能满足简洁、紧凑、低功率以及低成本的优势, 又能满足高分辨力要求, 该方案是用于低慢小平台的理想选择。本文针对低慢小平台 MiniSAR 的应用优势, 对 MiniSAR 系统的特点、方案选择、工作模式、参数设计、关键技术、系统组成等开展论证, 为 MiniSAR 系统的实现提供设计依据。

1 系统总体方案

1.1 总体设计思路

针对目标特点和地物分类等方面需求, 雷达系统天线采用全极化设计, 信号体制采用调频连续波, 实现 SAR 系统的微小型化和低功耗。同时, 分析系统特点、工作模式、系统参数和系统组成等, 进行详细仿真及设计。此外, 针对小型化-经济化与高性能的综合优化和非线性误差校正等关键技术, 提出工程实现总体方案。

1.2 总体设计方案

MiniSAR 系统方案由全极化天线、雷达主机、电源、微型定位定向系统(Mini Positioning and Orientation System, MiniPOS)、地面数据处理中心和地面差分基站构成。其中全极化天线、雷达主机、供电设备、MiniPOS 安装在低慢小平台上, 具有集成密度高、重量轻的特点。系统组成如图 1 所示。

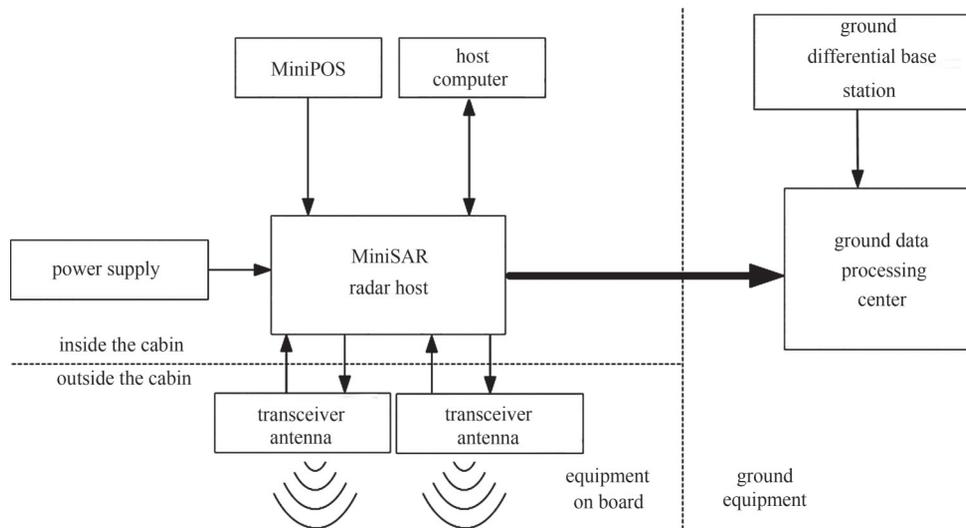


Fig.1 Composition diagram of high-precision MiniSAR system based on low-slow-small platform
图 1 基于低慢小平台高精确度 MiniSAR 系统组成图

全极化天线包含两副双极化微带天线, 每副微带天线均采用收发分置, 并 H 和 V 极化共面设计, 因此可实现对外发射 H 极化和 V 极化的空间电磁辐射信号, 以及接收天线完成 H 极化和 V 极化雷达空间电磁波的接收。

雷达主机由射频模块、数字模块和电源模块组成。其中射频模块的主要功能是线性调频信号变频和功率放大, 完成雷达单通道或多通道回波接收信号的放大、变频、滤波、幅度调整, 最后输出信号给数据采集。数字模块主要完成激励信号的产生, 雷达回波信号的采集、记录, 定时与授时等功能。电源模块对输入电源进行稳压和整流, 为各模块提供统一的二次电源。

电源提供雷达系统全部用电, 并保持有效的稳定长续航能力。

MiniPOS 由惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)和定位定向计算系统(Positioning Computing System, PCS)组成, 为 MiniSAR 运动补偿处理提供高精确度位置和姿态信息。

地面数据处理中心由高性能移动工作站和转录模块组成。机上设备记录回波数据后将存储体取回至地面, 通过转录模块进行转录。移动工作站完成对原始回波数据、定位定向数据、辅助数据的处理。

地面差分基站布设在距飞行区 30 km 范围内, 用于获取 GPS 数据, 利用差分算法进行后处理。飞行任务完成后, 将 MiniSAR 原始数据、MiniPOS 数据和地面差分基站数据回放至地面数据处理中心, 完成数据处理任务。

1.3 总体指标设计

对于基于低慢小平台高分辨力 MiniSAR 系统, 由于平台和性能的约束, 如紧凑的系统组成、高效的成像模式、与平台和性能相匹配的参数指标等, 系统设计更为复杂。因此在设计时, 需要考虑更多维的影响因素。在

本文的系统设计过程中,低慢小平台参数与目标需求参数都作为既定参数,主要针对技术指标进行设计与论证,确定输入参数的值,从而提高系统设计的可行性。具体参数如表 1 所示。

表1 总体指标设计

Table1 Overall index design

parameter	interference mode	maximum swath pattern	
maximum flight height/m	1 400	1 900	2 000
center frequency/GHz	14.5	14.5	14.5
maximum signal bandwidth/MHz	600	600	600
mode of polarization	HH, VV	HH, VV, HV, VH	HH, VV
the rail interference baseline/m	1	-	-
accuracy of elevation/m	>0.5	-	-
rate accuracy/(m/s)	0.2	-	-
range beam/(°)	20	20	20
center of beam/(°)	45	45	59
maximum mapping bandwidth/km	1	1.4	3.1
maximum power consumption/W	70	70	70
maximum weight/kg	5	5	5

2 系统工作模式设计

2.1 单极化成像模式

针对不同目标特点以及陆地海洋特性,设置天线 H 或 V 极化控制,具体单极化成像工作模式的的天线设计如图 2 所示。在实际工作中,可通过时序控制极化开关的状态,设置 HH 或 VV 单极化成像工作模式。

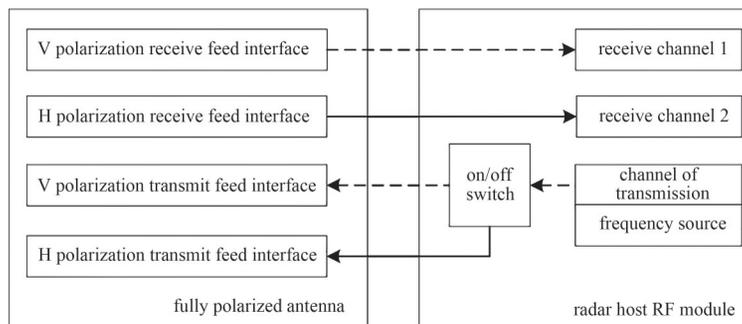


Fig.2 Schematic of the antenna configuration for the single polarization imaging operation mode

图2 单极化成像工作模式的的天线配置示意图

2.2 全极化成像模式

全极化成像工作模式的的天线配置情况与单极化相同。但在实际工作中,可通过时序控制信号控制极化开关保持 H 或 V 极化发射馈电接口为交替连通状态,同时保持 H 或 V 极化接收馈电接口的回波信号接收,获得 HH、HV、VH 或 VV 全极化成像工作模式。

2.3 交轨干涉工作模式

交轨干涉工作模式是获取数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)信息的有效手段。目前,分布式交轨干涉模式能实现较高分辨力的测高需求。交轨干涉工作模式的的天线配置如图 3 所示,在实际工作中,可通过时序控制 H 极化发射馈电信号,在接收时控制双天线的 H 极化接收状态,同时保持接收天线的固定基线状态,获得 H 极化交轨干涉成像工作模式。同理也可获得 V 极化交轨干涉工作模式。

2.4 顺轨干涉模式

顺轨干涉工作模式的的天线沿飞机顺轨方向布置,配置情况与交轨模式相同,如图 4 所示。在实际工作中,可通过时序控制 V 极化发射馈电信号,在接收时控制双天线的 V 极化接收状态,同时保持接收天线的固定基线状态,获得 V 极化顺轨干涉成像工作模式。同理也可获得 V 极化顺轨干涉工作模式。

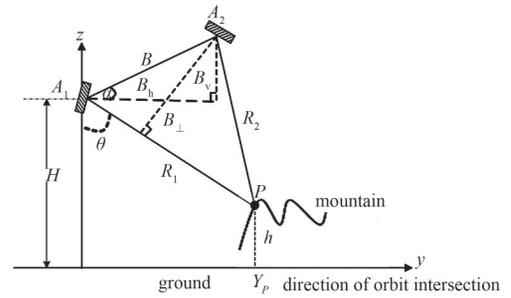
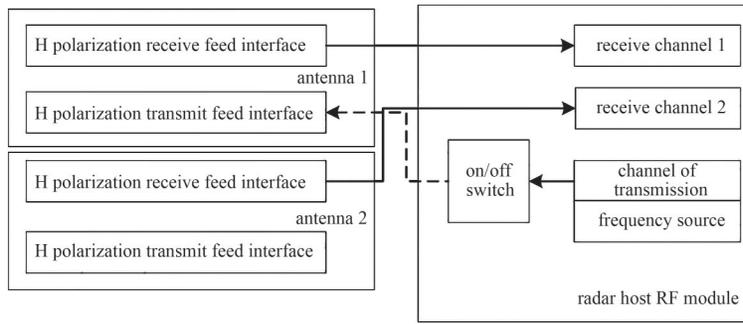


Fig.3 Schematic diagram of the antenna configuration for the H-polarized cross-orbit interference operating mode

图 3 H 极化交轨干涉工作模式的天线配置示意图

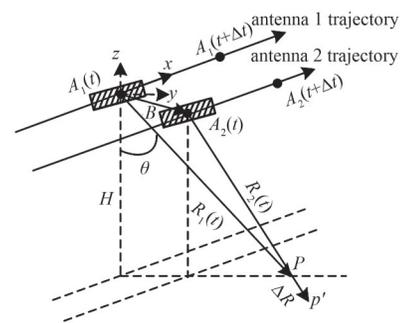
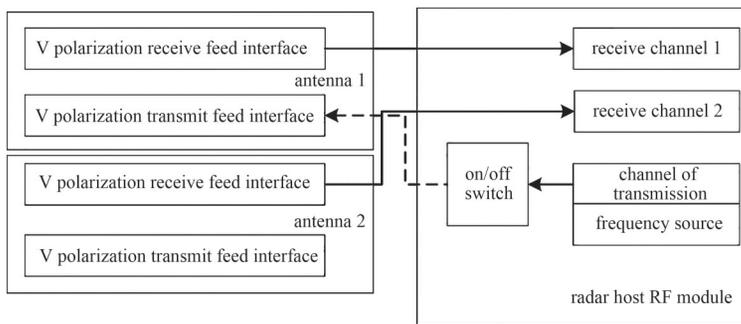


Fig.4 Schematic diagram of the antenna configuration for the V-polarized along-rail interference operating mode

图 4 V 极化顺轨干涉工作模式的天线配置示意图

3 参数指标设计

3.1 信号带宽和分辨力

FMCW SAR 通过频率分析完成距离向压缩, 距离向分辨力由发射信号带宽、差频信号的有效时宽以及天线的下视角 θ 决定:

$$\rho_{rg} = \alpha_r \times \frac{c}{2k_e(T_p - \tau_R)\sin\theta} = \alpha_r \times \frac{c}{2B\left(1 - \frac{\tau_R}{T_p}\right)\sin\theta} \quad (1)$$

式中: ρ_{rg} 为地距距离分辨力; B 为线性调频信号带宽; τ_R 为目标回波信号延时; T_p 为信号持续时间; c 为光速; α_r 为加权系数, 一般取 1.1~1.2。

由式(1)可知, 不同的斜距对应的回波延时不同。随着观测幅宽的增加, 观测边缘目标的分辨力损失也越严重。如图 5 所示, 在信号带宽为 600 MHz, 信号扫频时间为 0.5 ms, 加窗后视角大于 50° 时, 满足地距分辨力优于 0.35 m, 斜距分辨力优于 0.25 m。

3.2 作用距离与等效后向散射系数

调频连续波合成孔径雷达信噪比计算公式为:

$$R_{SN} = \frac{P_{av}G_tG_r\lambda^3k_ak_r\sigma_0\rho_{rg}}{2 \times (4\pi)^3 kTFLV_aR^3} \quad (2)$$

式中: P_{av} 为发射平均功率; G_t 、 G_r 分别为天线的发射、接收增益; k_a 、 k_r 分别为方位压缩和距离损失系数; σ_0 为平均地物后向散射系数; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对室温; F 为噪声系数; L 为系统损耗; V_a 为飞行速度; R 为作用距离。则等效后向散射系数为:

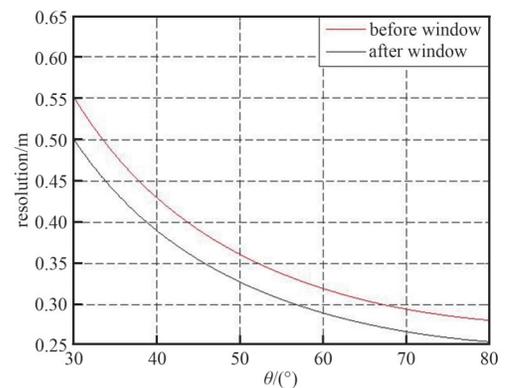


Fig.5 Relation between target ground range resolution and the downward-looking angle

图 5 目标地距分辨力与天线下视角的关系

$$\sigma_{0,NE} = \frac{\sigma_0}{R_{SN}} = \frac{2 \times (4\pi)^3 k T F L V_a R^3}{P_t G_t G_r \lambda^3 k_a k_r \rho_{rg}} \quad (3)$$

以 Ku 频段, 天线增益 $G_t = G_r = 22$ dB、距离和方位向压缩损失系数 $k_r = k_a = 0.85$ 、噪声系数 $F = 4$ dB、系统损耗 $L = 4$ dB 为例, 等效后向散射系数 $\sigma_{0,NE}$ 与下视角之间的关系如图 6 所示。图 6 表明, 在斜距分辨力为 0.3 m, 飞行高度为 2 000 m, 天线下视角为 59° 时, $\sigma_{0,NE}$ 可达到 -27 dB, 雷达最远作用距离可达到 4 000 m。

3.3 观测幅宽

雷达观测幅宽与波束宽度的关系如图 7 所示。在距离向波束宽度为 20° 时, 雷达观测幅宽可达到 3 100 m。在天线波束下视角为 59° 和 45° , 距离向波束宽度为 20° 条件下, 雷达观测幅宽与飞行高度的关系如图 8 所示。在下视角为 45° , 飞行高度为 2 000 m 时, 观测幅宽为 1 400 m; 当航高 3 000 m 时, 观测幅宽为 2 200 m。

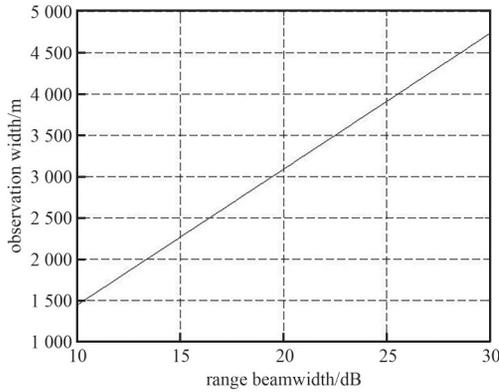


Fig.7 Relationship between the radar observation width and the range beamwidth

图 7 雷达观测幅宽与距离向波束宽度的关系曲线

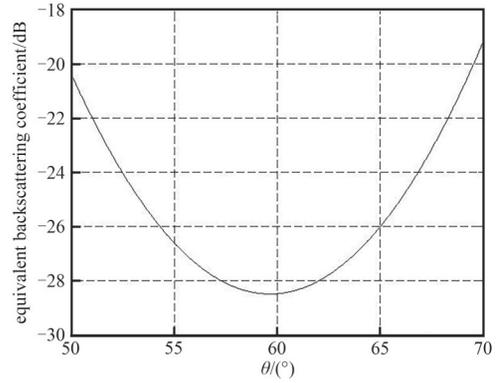


Fig.6 Relationship between the equivalent backscattering coefficient and the downward-looking angle
图 6 等效后向散射系数与下视角之间的关系

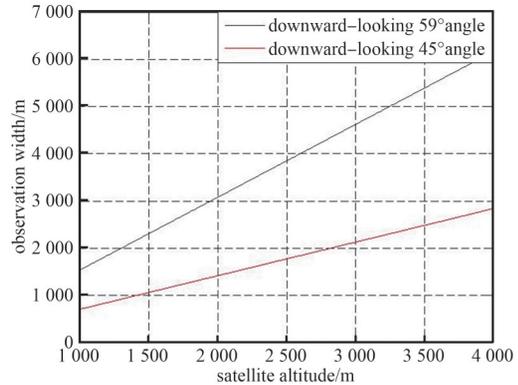


Fig.8 Relationship between the radar observation width and the satellite altitude at 59° and 45° downward-looking angle

图 8 59° 和 45° 下视角时, 雷达观测幅宽与飞行高度的关系曲线

3.4 信号重复频率

一般地, 平台运动引起的方位向多普勒带宽与方位波束角之间的关系为:

$$\Delta f_d = \alpha_a \times \frac{2\theta_a V_a}{\lambda} \quad (4)$$

式中: α_a 为方位向展宽因子, 通常取 $\alpha_a = 1.2$; θ_a 为方位波束角; λ 为射频信号波长。为避免距离和方位模糊, 脉冲重复频率 (Pulse Repetition Frequency, PRF, 公式中用 F_{PR} 表示) 的选择必须满足:

$$1.2 \times \Delta f_d \leq F_{PR} \leq \frac{c}{2R_{max}} \quad (5)$$

式中 R_{max} 为目标作用距离。根据上述设计准则, 考虑低慢小平台 35 m/s 的速度, 即可推导出合理的信号重复频率。

3.5 系统增益

系统接收机接收到的回波信号幅度和初相为随机变量, 分别呈现瑞利分布和均匀分布。因此, 接收机接收的总的回波信号可以写成离散形式:

$$S(i, k) = n_{i,k} + \sum_{p=-N/2}^{N/2} \sum_{q=-M/2}^{M/2} U_{i+p, k+q} e^{j[2\pi f_c (p-2R/c) + \pi k p^2 + \phi_{i+p, k+q}]} \quad (6)$$

式中: $n_{i,k}$ 为二维离散噪声; $U_{i+p, k+q}$ 和 $\phi_{i+p, k+q}$ 分别为回波幅度和初相; M 、 N 分别代表距离维和方位维散射点数

目; p 、 q 分别代表距离维和方位维第 p 和第 q 个散射点; $n_{i,k}$ 、 $U_{i+p,k+q}$ 、 $\phi_{i+p,k+q}$ 相互独立, 则信号功率为:

$$P_s = E\{|S(i,k)|^2\} \quad (7)$$

若平台飞行高度在 2 000 m 时, 场景回波信号强度与地物后向散射系数的关系如图 9 所示。当场景地物后向散射系数为 10 dB 时, 3 dB 波束宽度内回波强度为 -73 dBm。考虑余量, 因此, 接收天线回波信号强度在 -70 dB 左右。同时, 若回波数据采集电平在 0 dB 左右, 则要求系统增益在 70 dB 左右。至此, 系统增益设计为 70 dB。

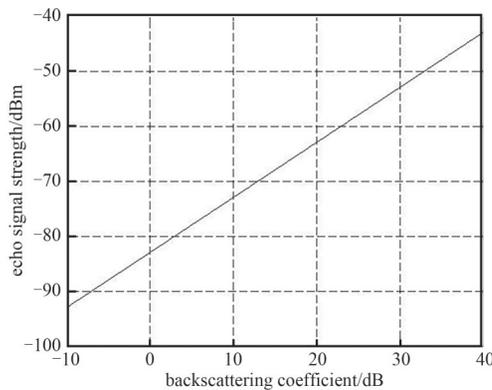


Fig.9 Relationship between scene echo signal strength and average backscattering coefficient within 3 dB beamwidth

图 9 3 dB 波束宽度内场景回波信号强度与平均后向散射系数的关系

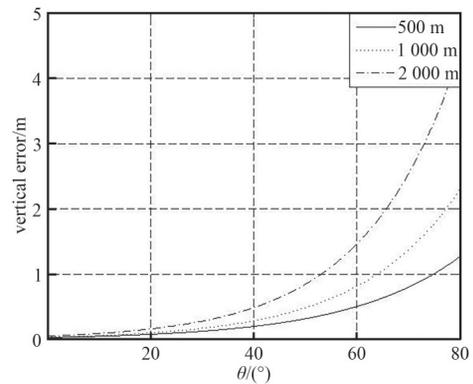


Fig.10 Relationship between elevation accuracy and viewing angle at different flight heights

图 10 不同航高时高程精度和视角的关系曲线

3.6 交轨干涉测高精度

对于星载或机载交轨干涉测高模式, 采用的精度分析方法相同, 并且与雷达系统参数波长 λ 、基线长度 L 、基线倾角 α 、飞行高度 H 、作用距离 R 以及干涉相位 ϕ 的测量精度密切相关。地/海面某点 P 的高程解算公式为:

$$h = H - R_1 \cos \theta = H - R_1 \cos \left[\alpha - \arcsin \left(\frac{\lambda \phi}{2\pi n L} \right) \right] \quad (8)$$

式中每个因素的随机误差都会以一定的传递系数影响到最终高程测量 h 的精度。如图 10 所示, 波束中心下视角为 45° , 平台飞行高度为 2 000 m 时, 可实现 0.7 m 的高程精度; 随着波束中心下视角增加至 59° , 此时高程精度下降至 1.5 m。交轨干涉仿真计算主要参数如表 2 所示。

3.7 顺轨干涉测速精度

对于顺轨干涉测速, 星载与机载测速精度分析方法完全相同, 速度解算公式为:

$$V_r = \frac{\phi \lambda V}{2\pi d \sin \phi} \quad (9)$$

式中: V 为平台速度; d 为等效孔径间距; ϕ 为雷达天线视角。

若顺轨基线长度为 0.22 m, 平台速度为 35 m/s, 雷达天线视角取 60° , 则测速精度与干涉相位的关系如图 11 所示。当干涉相位 ϕ 小于 25° 时, 可以满足 0.25 m/s 的测速精度。

海洋洋面的后向散射系数在不同的风速下有较大差异, 船载无人机海洋观测系统的工作风速条件不超过 6 级, 在此情况下, Ku 波段的后向散射系数可按 -25 dB 考虑。当飞行高度为 1 000 m 时, 能够获得的信噪比平均在 6 dB 左右。6 dB 信噪比在四视情况下能够获得的干涉相位精度为 20° , 如图 12 所示, 对应的测速精度为 0.2 m/s, 可以满足项目 0.5 m/s 的测速精度指标要求。

表 2 交轨干涉 SAR 参数设置

Table 2 Parameter setting of cross-orbit interferometric SAR

parameter	index
horizontal baseline/m	1
beam center perspective/ $^\circ$	45
altitude of flight/m	500/1 000/2 000
R_{SN} /dB	20
number of multiple views	4

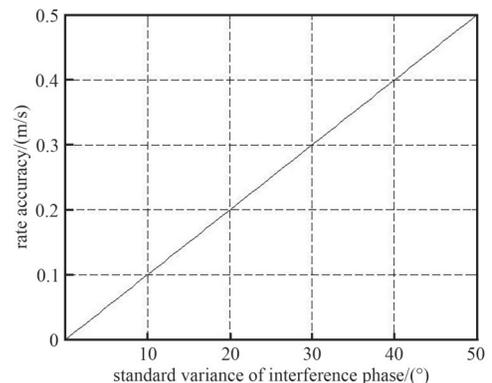


Fig.11 Relation diagram between velocity phase measurement accuracy and interferometric phase

图 11 测速精度与干涉相位关系图

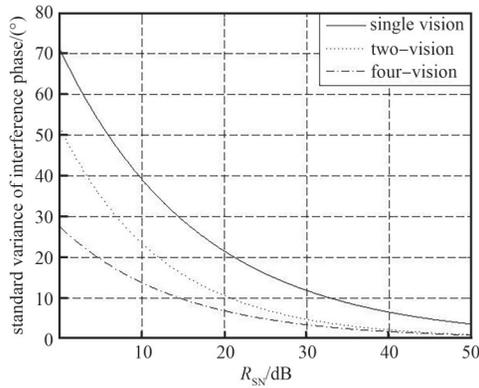


Fig.12 Relationship between interferometric phase and SNR
图12 干涉相位与信噪比之间的关系

表3 功耗与重量分配表

Table3 Power consumption and weight distribution table

number	name	power/W	weight/kg
1	radio frequency module	21	0.8
2	digital module	15	0.5
3	POS module	12	0.9
4	power module	12	0.4
5	antenna	-	0.7
6	cable	-	0.2
total	-	60	3.4

3.8 功耗与重量

MiniSAR系统中射频模块电压为28 V，电流为0.75 A，功耗约为21 W。数字模块选用K7的现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)和DDR3的缓存，考虑DDR3功耗为3 W，其他电路为2 W，则选用K7系列的FPGA功耗约为10 W，另外实时处理需额外增加5 W功耗，数字模块功耗约15 W。最后结合85%的电源效率，电源模块预计功耗12 W。总功耗以及各部分对应重量如表3所示。总功耗和总重量分别为60 W、3.4 kg，满足表1中对于功耗和重量的指标要求。

4 关键技术设计

与传统的轻小型雷达不同，本方案在既满足高分辨力成像的同时，又可做到小型化和经济化，具备简洁、紧凑、低功耗的优势。因此，本系统实现的关键技术主要集中在小型化-经济化与高性能的综合优化技术和非线性误差校正技术两方面。

4.1 小型化-经济化与高性能的综合优化技术

实现雷达系统的小型化、经济化和高性能是其在低慢小平台中得以应用的先决条件，同时又是一个综合性的系统设计问题。基于低慢小平台的干涉MiniSAR系统设计，首先需要选择合适的总体设计思路 and 方案，其次要采用成熟的制造及装配工艺，最终达到小型化-经济化与高性能之间的最优化平衡。

1) 重点研究FMCW体制的MiniSAR相关技术。对该体制下的系统指标、工作模式等进行充分论证和仿真，开展适合FMCW体制的微型高性能天线的设计仿真，既满足高增益、低副瓣、大幅宽的需求，同时也保证不同极化间的隔离度以及重量的轻量化。

2) 重点研究射频先进微组装工艺和高集成度的数字系统一体化技术。在射频模块中，对频率源、TR组件采用多芯片组件(Multichip Module, MCM)和低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)相结合的技术。MCM技术集先进印刷电路板技术、先进混合集成电路技术、先进表面安装技术、半导体集成电路技术于一体^[11-13]；LTCC工艺技术能够在系统的体积小型化以及高可靠性上提供有效支撑^[14-16]，这两项技术能大幅度降低射频部分的重量、功耗和体积。采用高效并行算法和高集成度一体化设计，实现波形产生、采集、记录和雷达监控等高度集成、轻量化、低功耗的数字模块；开展系统接口、系统电性能、散热、电磁兼容和结构安装的高密度一体化综合设计，实现MiniSAR系统的小型化和轻量化。

4.2 非线性误差校正技术

在实际雷达系统中，系统各部件非理想特性引入了幅相失真，不仅影响雷达回波信号性能的获取，并对成像造成影响，更严重的是在调频连续波体制雷达下，该幅相误差会跟信号本身的频率非线性误差混叠在一起，将给系统频率非线性误差的估计以及优化校正带来严重影响，甚至导致系统非线性误差估计的严重失真。因此在成像处理过程中必须对频率非线性误差予以认真考虑，分析系统误差形式以及对成像处理的影响，提取系统非线性误差，并优化误差校正方法。频率非线性误差补偿效果如图13所示。

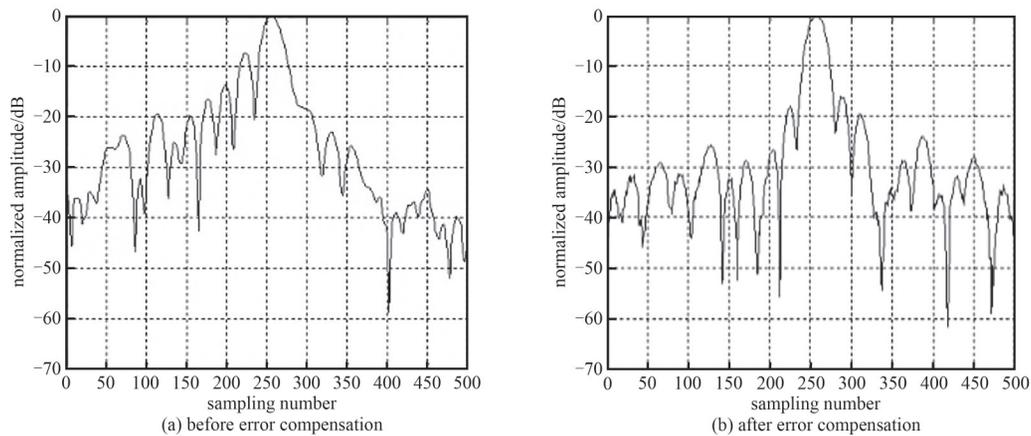


Fig.13 Comparison of range-wise target compression results before and after error compensation

图 13 误差补偿前后距离向目标压缩结果比较

5 结论

本文通过合理的系统组成、成像模式、参数指标和关键技术等设计, 实现了基于低慢小平台的干涉合成孔径雷达系统的高分辨率成像。提出的基于低慢小平台的干涉合成孔径雷达具备小型化、经济化、高性能的特点, 为后续低慢小平台的工程化设计提供了有益参考。

参考文献:

- [1] 陈粤,禹卫东. 星载 SAR 方位多通道 TOPS 成像模式参数设计[J]. 雷达科学与技术, 2022,20(2):142-149,156. (CHEN Yue, YU Weidong. Parameter design of spaceborne TOPSAR based on azimuth multichannel[J]. Radar Science and Technology, 2022, 20(2):142-149,156.) DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2022.02.004.
- [2] MENG Lingsheng, YAN Chi, LYU Suna, et al. Synthetic Aperture Radar for Geosciences[J]. Reviews of Geophysics, 2024,62(3): e2023RG000821. DOI:10.1029/2023RG000821.
- [3] SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. 3rd Edition. Columbus, Ohio: McGraw-Hill, 2008.
- [4] 谢辉,赵强,曾祥能. 合成孔径雷达技术应用于星载平台的现状与发展[J]. 舰船电子对抗, 2019,42(1):6-9. (XIE Hui, ZHAO Qiang, ZENG Xiangneng. Present situation and development of SAR technology for satellite-borne platform[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019,42(1):6-9.) DOI:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2019.01.002.
- [5] 中国政府网. 首次写入政府工作报告——“低空经济”加速起飞[EB/OL]. (2024-04-02)[2024-11-25]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202404/content_6943071.htm. (Chinese government website. The low-altitude economy was first included in the Government Work Report[EB/OL]. (2024-04-02)[2024-11-25]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202404/content_6943071.htm.)
- [6] 徐辉,刘爱芳,王帆. 轻小型星载 SAR 系统发展探讨[J]. 现代雷达, 2017,39(7):1-6. ((XU Hui, LIU Aifang, WANG Fan. Exploration into the development of light and small spaceborne SAR systems[J]. Modern Radar, 2017,39(7):1-6.) DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.07.001.
- [7] 姜秀鹏,常新亚,姚芳,等. 合成孔径雷达小型卫星进展[J]. 空间电子技术, 2016,13(1):77-82. (JIANG Xiupeng, CHANG Xinya, YAO Fang, et al. Progress of small satellite of synthetic aperture radar[J]. Space Electronic Technology, 2016,13(1):77-82.) DOI: 10.3969/j.issn.1674-7135.2016.01.017.
- [8] 彭新智,梁步阁,杨德贵,等. 基于旋翼无人机的 FMCW SAR 系统设计与实现[J]. 现代雷达, 2022,44(11):10-17. (PENG Xinzhi, LIANG Buge, YANG Degui, et al. Design and realization of rotor UAV FMCW SAR[J]. Modern Radar, 2022,44(11):10-17.) DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2022.11.002.
- [9] 左伟华,李东涛,李财品,等. 基于高分三号卫星的星载无人机双基前视 SAR 系统设计[J]. 空间电子技术, 2019,16(2):26-32. (ZUO Weihua, LI Dongtao, LI Caipin, et al. System design for bistatic forward-looking SAR based on GaoFen-3 satellite as transmitter and unmanned aerial vehicle as receiver[J]. Space Electronic Technology, 2019,16(2):26-32.) DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2019.02.006.
- [10] 肖文光,金东勇. 星载 SAR 波控系统设计与验证[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(4):666-671. (XIAO Wenguang, JIN Dongyong. Design and verification of beam-steering system in space-borne SAR[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(4):666-671.) DOI: 10.11805/TKYDA2019484.

- [11] 鲜飞. 多芯片组件(MCM)技术的发展及应用[J]. 电子制作, 2006(11):6-8. (XIAN Fei. Development and application for MCM packaging technologies[J]. Practical Electronics, 2006(11):6-8.) DOI:10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2006.11.001.
- [12] 唐万军, 庞佑兵. 一种基于 MCM 工艺的微波组件设计[J]. 微电子学, 2013,43(5):667-670. (TANG Wanjun, PANG Youbing. Design of microwave module based on MCM technology[J]. Microelectronics, 2013,43(5):667-670.) DOI:10.3969/j.issn.1004-3365.2013.05.018.
- [13] 赵炜, 李岩, 张磊, 等. 多芯片组件(MCM)用金锡焊带材料电阻率及热导率温度特性研究[J]. 宇航材料工艺, 2023,53(2):30-36. (ZHAO Wei, LI Yan, ZHANG Lei, et al. Study on temperature characteristics of resistivity and thermal conductivity of gold Tin solder strip used in MCM[J]. Aerospace Materials & Technology, 2023, 53(2): 30-36.) DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.005.
- [14] 侯旒璐, 汪洋, 刘清超. LTCC 技术简介及其发展现状[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017,35(1):50-55. (HOU Nilu, WANG Yang, LIU Qingchao. The brief introduction to LTCC technology and its development[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2017,35(1):50-55.) DOI:10.3969/j.issn.1672-5468.2017.01.011.
- [15] 白珂, 魏巍. 基于 LTCC 技术的雷达接收前端设计[J]. 电子技术与软件工程, 2018(24):70. (BAI Ke, WEI Wei. Design of radar reception front end based on LTCC technology[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(24):70.)
- [16] 刘红, 叶强. 基于 LTCC 技术的微型化巴伦设计[J]. 电子技术应用, 2017, 43(7): 43-46, 54. (LIU Hong, YE Qiang. Miniaturization balun design based on LTCC technology[J]. Application of Electronic Technique, 2017,43(7):43-46,54.) DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.2017.07.011.

作者简介:

胡伟(1988-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为合成孔径雷达总体设计. email:624930996@qq.com.

闻诚(1998-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为载荷系统研发.

(上接第 783 页)

作者简介:

朱嘉运(2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为目标检测、参数估计. email:a1107zjy@163.com.

魏法(1996-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、干扰抑制.

马润龙(2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为目标定位、参数估计.

张翔(1999-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为波形分集阵抗干扰、强化学习.

李坤坤(2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为分布式频率分集阵列雷达参数优化.

兰岚(1993-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为波形分集阵列雷达系统与信号处理、雷达智能化抗干扰技术、目标检测与参数估计理论.