Ka 波段机载双模式干涉 SAR 系统设计及测量精度分析

郑世超[1]，王　辉[2]，孙志强[1]，孔令振[1]
（1. 上海航天技术研究院 毫米波遥感技术重点实验室，北京 100086；
2. 上海航天技术研究院 毫米波遥感技术重点实验室，上海 201109）

摘　要：为解决传统干涉合成孔径雷达（SAR）系统只能顺轨干涉或交轨干涉，无法兼顾高精度高程测量和速度测量的问题，开展了 Ka 波段机载双模式干涉 SAR 系统设计与干涉测量精度分析。基于 Ka 波段电磁波波长短、干涉相位敏感度好的特点，利用较短的干涉基线在同一干涉 SAR 系统中实现高精度干涉测高与测速，并介绍了所设计的 Ka 波段机载双模式干涉 SAR 验证系统。仿真结果表明：该系统具备高效率、高精度干涉测量能力，可获得亚米级的绝对测高精度和 0.1 m/s 的测速精度。

关键词：合成孔径雷达（SAR）；Ka 波段；顺轨干涉；交轨干涉
中图分类号：TN958　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.06.001

Ka-Band Airborne Dual-Mode InSAR System and Interferometric Accuracy Analysis

ZHENG Shichao[1], WANG Hui[2], SUN Zhiqiang[1], KONG Lingzhen[1]
(1. Key Laboratory of Millimeter Wave Romote Sensing Technology, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Beijing 100086, China;
2. Key Laboratory of Millimeter Wave Romote Sensing Technology, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: To solve the problem that the conventional interferometric synthetic aperture radar (InSAR) can only realize along-track interferometry (ATI) or cross-track interferometry (XTI), Ka-band dual-mode InSAR system design is carried out and analysis on interferometric measurement accuracy is made. Compared with low-band electromagnetic wave such as L-band or C-band, Ka-band electromagnetic wave has shorter wavelength. Therefore, high interferometric accuracy can be obtained by use of shorter interferometric baseline, and the realization of both ATI and XTI with the same system is proposed. In this paper, Ka-band airborne dual-mode digital beam forming (DBF) interferometric SAR system design is introduced and its interferometic accuracy is analyzed based on system parameters. The simulation results validate the performance of the system. The height measurement accuracy is better than 1 m and the velocity measurement accuracy is better than 0.1 m/s.

Keywords: synthetic aperture radar(SAR); Ka-band; along-track interferometry; cross-track interferometry

0　引言

与传统低频段合成孔径雷达（SAR）相比，Ka 波段 SAR 系统具有以下优点：一是分辨率更高。Ka 波段可用的带宽更大，相同波束宽度下天线尺寸更小，因此 Ka 波段 SAR 比低频段 SAR 容易获得更高的距离向和方位向分辨率。二是体积更小、重量更轻。Ka 波段天线和射频模块的尺寸更小，具有体积小的特点。三是目标轮廓效应更加明显。雷达工作频段越高，目标轮

收稿日期：2018-09-15；**修回日期**：2018-10-26
作者简介：郑世超（1986—），男，博士，主要研究方向为 SAR 系统设计与信号处理。

廓效应越明显,因此 Ka 波段目标几何外形的轮廓能产生更强的回波,有利于获取清晰的目标细节。

近几年,随着核心功率器件水平的不断提升,美国、欧洲开始研究 Ka 波段在 SAR 领域尤其在干涉 SAR 领域的应用[1]。与低波段 SAR 系统相比,Ka 波段干涉 SAR 能以较短的干涉基线获得相同的干涉测量精度,大幅降低了高精度干涉测量的实现难度[2-3],能够在同一系统中实现高精度的顺轨干涉与交轨干涉。基于以上特点,本文提出了 1 套 Ka 波段双模式干涉 SAR 系统,可用于验证双模式干涉 SAR 的可行性。

该系统在交轨干涉模式下,针对 Ka 波段电磁波穿透性较弱的特点,重点验证对水面高度、水流速度的测量能力。考虑到 Ka 波段 SAR 系统的损耗较大,该验证系统选取较小的工作视角。在小入射角条件下,水面较强的后向散射系数可大幅降低系统所需的发射功率与天线增益,且根据干涉测高原理,小视角更有利于实现更高的干涉测高精度[4-6]。

在顺轨干涉模式下,为保证测量精度,该验证系统选取较大的工作视角[7-8]。采用数字波束合成扫描接收技术(DBF-SCORE)满足在较大工作视角下系统所需的功率增益积[9-10]。

本文对 Ka 波段双模式干涉 SAR 验证系统进行介绍,并给出该系统的参数设计与仿真结果。在此基础上,对该系统在双模式下的干涉测量精度进行了仿真分析,为后续的飞行试验干涉测量性能提供了理论分析依据。

1 Ka 波段双模式干涉 SAR 系统

Ka 波段双模式干涉 SAR 系统主要由三部分组成:天线子系统、雷达数字子系统和稳定平台。系统的组成架构如图 1 所示。

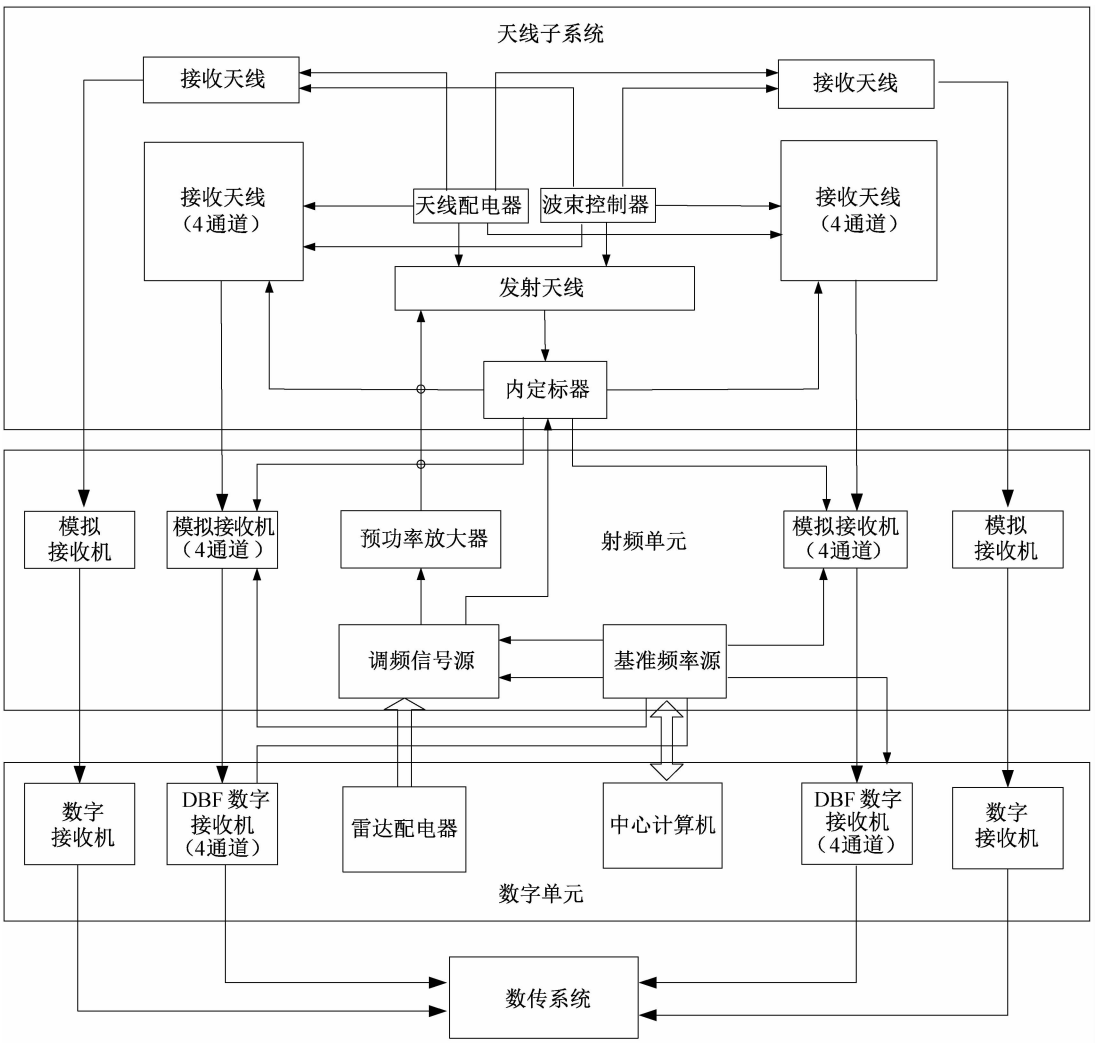


图 1 系统组成框图

Fig. 1 System structure

1.1　天线子系统

天线子系统由天线、频综接收机、内定标器、预功放组成。为了降低天线设计难度，提高天线工作效率，该系统采用天线收发分置设计。发射天线尺寸为 450.0 mm × 33.6 mm，峰值发射功率为 315 W。根据系统工作模式，接收天线可分为交轨天线和顺轨天线两部分。单副交轨天线阵列口径为 44.8 mm×450.0 mm，2 副交轨天线沿距离向间隔排布，形成224 mm的交轨基线；单副顺轨天线阵列口径为 89.6 mm×225.0 mm，2 副顺轨天线沿方位向间隔排布，形成 225 mm 的顺轨基线。其中单副顺轨阵列沿距离向由 4 个接收子阵构成，每个子阵口径为 22.4 mm×225.0 mm。整个天线的布局如图 2 所示。

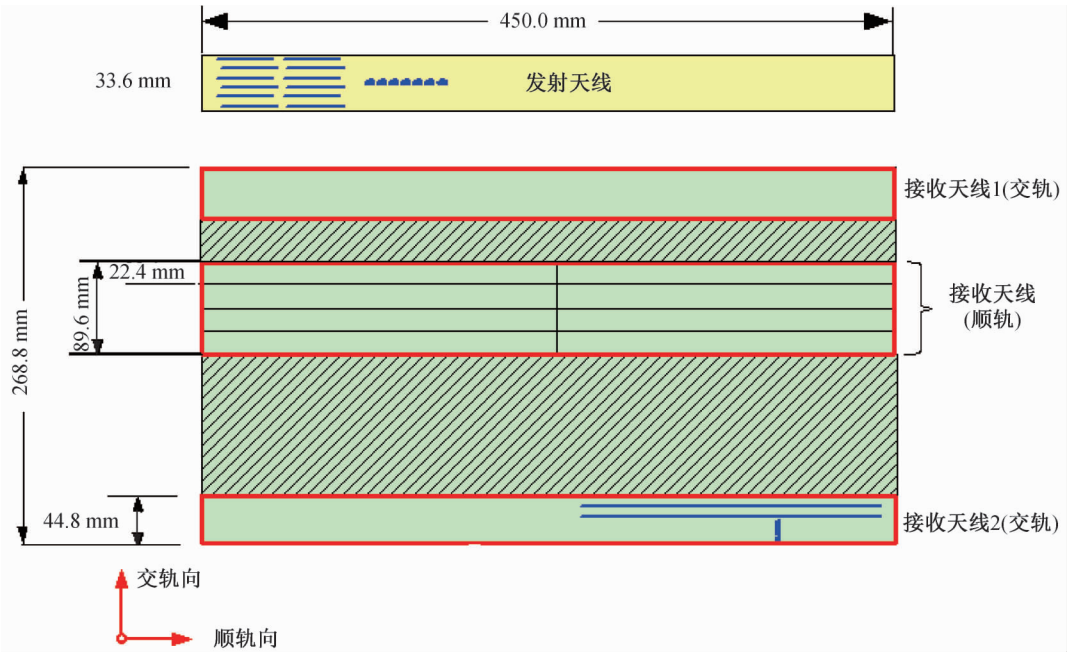


图 2　天线布局示意图

Fig. 2　Antenna architecture

发射天线仿真的天线方向如图 3 所示。

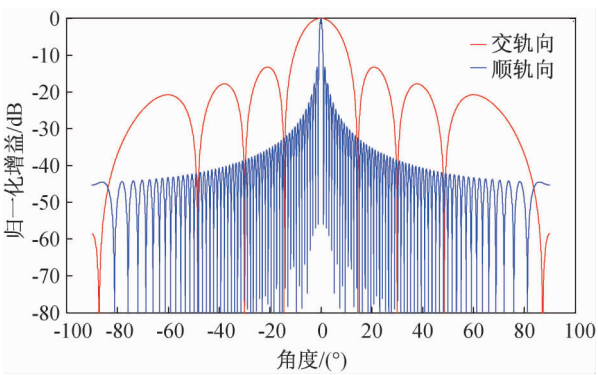


图 3　发射天线方向图

Fig. 3　Transmitting antenna pattern

交轨接收天线仿真得到的天线方向如图 4 所示。

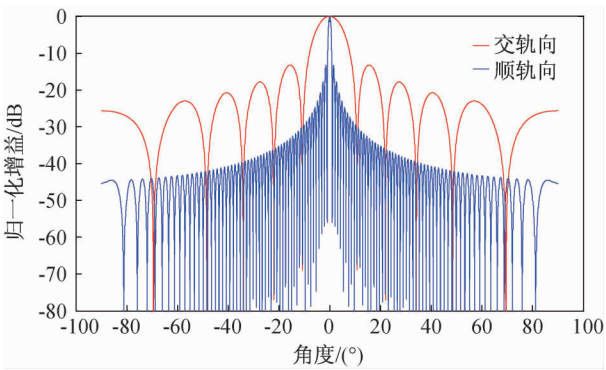


图 4　交轨接收天线方向图

Fig. 4　Cross-track receiving antenna pattern

顺轨接收天线单个子阵仿真得到的方向如图 5 所示。

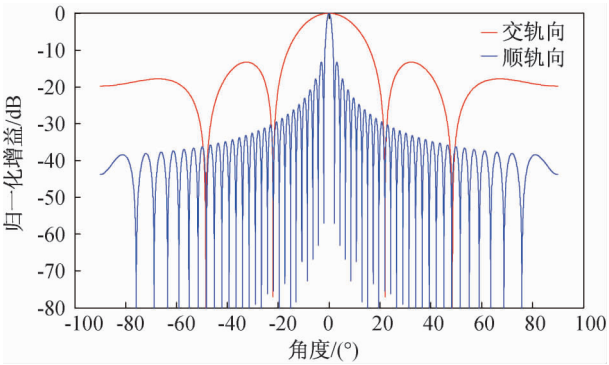


图 5 顺轨接收天线方向图

Fig. 5 Along-track receiving antenna pattern

1.2 雷达数字子系统

雷达数字子系统由监控定时器、DBF 数字接收机、雷达配电器组成。其中：DBF 数字接收机主要实现数据采集、预处理、DBF 实时处理及存储等功能，由采集处理模块、数据存储模块、通信接口模块、主机模块和电源模块组成。

该验证系统在顺轨干涉模式下采用 4 通道 DBF-SCORE 技术。为了降低输出的数据率，需要实时进行 DBF 处理。为满足该需求，数字接收机选用 Xilinx Virtex-6 系列 FPGA，将所有的功能模块集中在单片 FPGA 中实现，完成所有高速数据I/O接口和外部芯片的控制，配合 PCIE 接口及主机平台协同完成高达 3.2 GBit/s 的持续数据传输，并完成数据实时信号处理。

1.3 稳定平台

根据系统干涉测量性能仿真要求，稳定平台及导航系统应满足姿态测量精度 0.01°、位置精度 0.05 m 的要求。

高质量的 SAR 成像是高精度干涉测量的前提，该验证系统选用徕卡 PAV80 陀螺稳定座架，以保证天线波束指向的稳定性，减小波束指向不稳定对成像质量的影响，其垂直于偏流方向的稳定精度均优于 0.02°(RMS)，可以很好地实现雷达波束的高稳定度控制。同时，为了降低系统误差对干涉测量结果的影响，稳定平台集成了 POS AV610 高精度惯性导航系统，实时记录定位定向数据并经过高效率软件处理后，获得了高精度的定位定向数据，后处理定位精度为 0.05 m，姿态精度为 0.008°。

2 系统参数及干涉测量精度仿真分析

为了验证该系统设计及信号处理方法，开展双模式干涉测量的机载飞行试验，系统的基本工作模式为条带模式。飞行试验的主要参数见表 1。对于机载飞行试验，模糊度指标很容易满足要求。因此，在 SAR 系统参数设计时重点针对分辨率和等效噪声系数(NESZ)指标开展分析。其中：分辨率主要影响干涉测量数据的网格大小；NESZ 指标主要影响系统信噪比，进而影响干涉处理 2 幅图像之间的相干性。

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

系统参数	值
载频/GHz	35
脉冲重复频率/kHz	1～2
极化方式	HH
天线形式	波导缝隙天线
输出功率/W	315
工作模式	顺轨/交轨干涉

2.1 交轨干涉模式

根据法国太空研究中心的近底视 Ka 波段数据采集实验结果可得：当入射角≤15°时，Ka 波段的水面后向散射系数优于 0 dB。该系统交轨干涉模式下的最大工作视角为 13.3°，因此对应的目标后向散射系数优于 0 dB，当系统 NESZ 优于 −10 dB时，可保证系统获得足够高的信噪比和较好的干涉测量结果。交轨干涉模式工作视角范围内的 NESZ 仿真结果如图 6(a)所示。该系统在交轨干涉模式下的方位分辨率优于 0.3 m。地距分辨率取决于发射信号带宽和系统工作视角，该系统在工作视角范围内的地距分辨率仿真结果如图 6(b)所示。

根据干涉测高原理，直接影响干涉高程测量精度的因素有 5 个：飞行高度 H、雷达至目标点的作用距离 R、基线长度 B、基线倾角 α 和干涉相位 φ[5]。在机载飞行试验中，H 由 GPS 测量信息得到；R 通过雷达回波延时测得；B，α 通过基线测量系统或间接估计所得；φ 由 2 幅 SAR 图像干涉处理获取。假设各因素不相关，InSAR 测高的总均方根误差(高程测量的绝对精度)可表示为

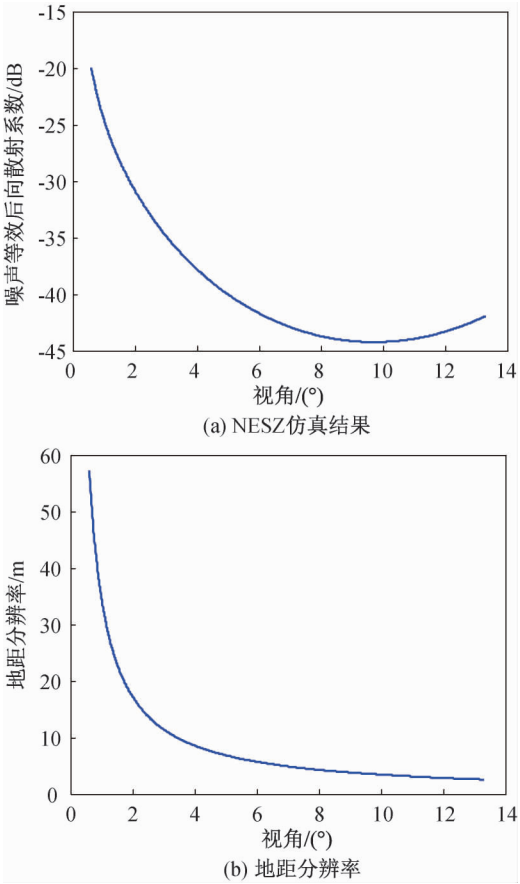


图 6　系统参数仿真结果

Fig. 6　System parameter simulation results

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_H^2 + \cos^2\theta\sigma_{R_1}^2 + \left(\frac{R_1\sin\theta\tan(\theta-\alpha)}{B}\right)^2\sigma_B^2 + \sqrt{(R_1\sin\theta)^2\sigma_\alpha^2 + \left(\frac{R_1\lambda\sin\theta}{2n\pi B\cos(\theta-\alpha)}\right)^2\sigma_\varphi^2}} \quad (1)$$

式中：σ_H，σ_R，σ_B，σ_α，σ_φ 分别为飞行高度误差、斜距误差、基线长度误差、基线倾角误差、干涉相位误差。其中，前 4 项误差可根据系统所采用的导航系统及稳定平台精度初步确定，基于相应参数分析其对应的高程测量误差，并可在处理过程中进行校正，以进一步降低其对最终高程测量结果的影响。σ_φ 主要取决于主辅图像的相干系数和处理过程中选取的多视数，影响主辅图像相干系数的因素主要包括体散射去相干、时间去相干、多普勒去相干、基线去相干、模糊去相干和信噪比去相干。由于该系统采用单次航过单平台干涉测量，因此体散射去相干和时间去相干的影响可以忽略不计。

基于以上分析，结合该系统相应工作参数，对各项误差导致的高程测量误差和绝对高程测量精度进行了仿真分析，结果如图 7 所示。在 100 m 网格条件下，绝对高程测量精度可达到 0.5 m。分析各误差因素的测高误差贡献量，结果发现：干涉相位误差和基线误差是影响高程测量精度的主要因素。

基于以上仿真分析，表 2 给出了交轨干涉模式下的系统参数及性能。

2.2　顺轨干涉模式

根据顺轨测速原理，目标距离向速度与干涉相位之间的关系为

$$v_r = \frac{\lambda \cdot \phi \cdot v_p}{4\pi \cdot B \cdot \sin\theta} \quad (2)$$

式中：λ 为波长；ϕ 为干涉相位；v_p 为平台速度；B 为顺轨干涉基线；θ 为入射角。由式(2)可见，θ 越大，目标距离向速度的测量精度越高。综合考虑系统代

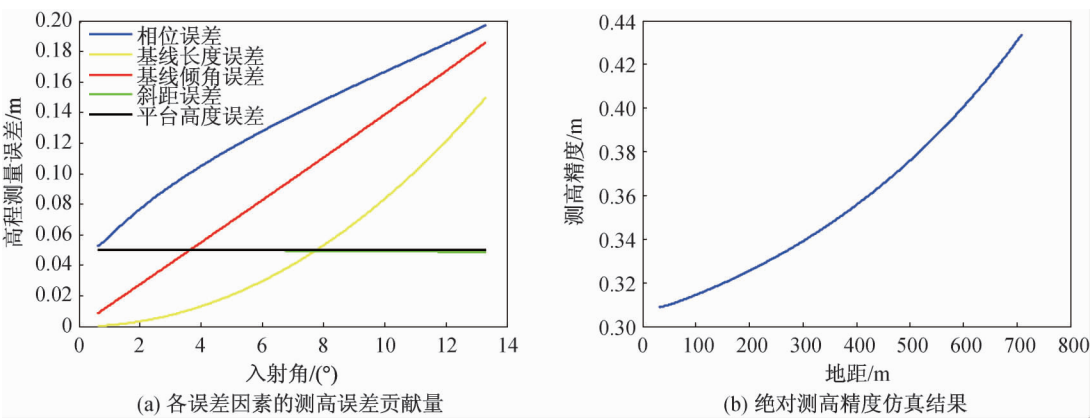


图 7　测高误差贡献量与绝对测高精度的仿真结果

Fig. 7　Simulation results of height error contribution and absolute height error

表 2 交轨干涉模式系统性能参数

Tab. 2 System performance of XTI mode

参数	值
飞行高度/km	3
工作视角/(°)	0.6～13.3
幅宽/m	≥600
方位分辨率/m	≤0.3
地距分辨率/m	2.5～61.0
等效噪声系数(NESZ)/dB	≤－36
基线长度/m	0.224
相对测高精度/m	≤0.2(100 m 网格)
绝对测高精度/m	≤0.5(100 m 网格)

价与测速精度，该验证系统选取的工作视角为 15.6°～28.3°。

由雷达后向散射统计数据可得：当 $\theta \leqslant 30°$ 时，Ka 波段水面后向散射系数优于－26 dB。为保证系统信噪比，该系统在顺轨干涉模式下的 NESZ 需优于－34 dB[11]。

经过天线设计，该系统在顺轨干涉模式下的方位分辨率优于 0.2 m，系统参数仿真结果如图 8 所示。地距分辨率仿真结果如图 8(a)所示。根据系统参数仿真得到的 NESZ 如图 8(b)所示。

根据系统天线设计，顺轨干涉模式下的基线长度为 0.225 m，据此仿真得到 10 m 网格条件下的目标速度测量精度，如图 9 所示。由仿真结果可以发现，由于 Ka 波段的波长短，系统在基线较短、工作视角较小的情况下仍能获得 0.1 m/s 的测速精度。

基于以上仿真分析，给出了顺轨干涉模式下的系统参数及性能，见表 3。

表 3 顺轨干涉模式系统性能参数

Tab. 3 System performance of ATI mode

参数	值
飞行高度/km	3
工作视角/(°)	15.6～28.3
天线长度/m	发射：0.45；接收：0.225
天线高度/m	发射：0.033 6；接收：0.224×4
幅宽/m	≥700
方位分辨率/m	≤0.3
地距分辨率/m	1.25～2.25
等效噪声系数(NESZ)/dB	≤－34
基线长度/m	0.225
测速精度/(m·s^{-1})	≤0.1(10 m 网格)

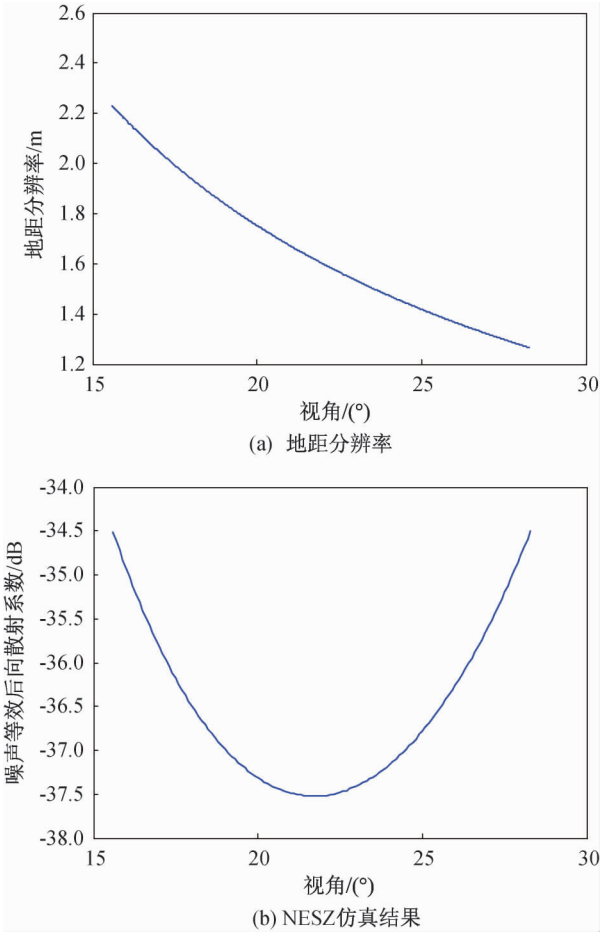


图 8 系统参数仿真结果

Fig. 8 System parameter simulation results

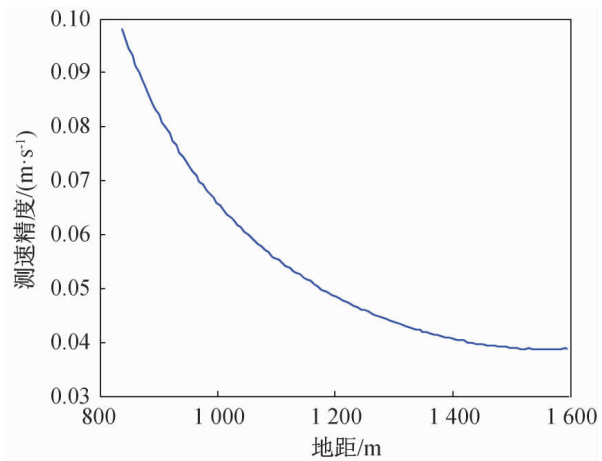


图 9 测速精度仿真结果

Fig. 9 Simulation results of velocity measurement accuracy

4　结束语

高精度、高效率测量已成为现代遥感的重要发展方向。传统低波段干涉 SAR 系统所需基线长，难以同时实现交轨干涉测高和顺轨干涉测速，不利于高效率干涉测量。Ka 波段波长较短，对干涉相位敏感，能以较短的基线获得高精度的干涉测量结果。为此，对机载 Ka 波段双模式干涉 SAR 系统开展了研究，对该验证系统进行了介绍，仿真分析了系统参数与干涉测量精度，验证了 Ka 波段双模式干涉 SAR 系统的可行性，为后续的飞行试验干涉测量性能提供了理论分析依据。

由于目前研究主要基于干涉理论，缺乏相应实测数据的支撑，因此后续将根据飞行试验获取的实测数据对系统仿真与设计进行进一步验证。

参考文献

[1] 陈筠力，李威. 国外 SAR 卫星最新进展与趋势展望[J]. 上海航天，2016，33(6)：1-19.

[2] FJØRTOFT R，GAUDIN J，POURTHIÉ N，et al. KaRIn on SWOT：characteristics of near-nadir Ka-band interferometric SAR imagery[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens，2014，52(4)：2172-2185.

[3] LUDWIG M，ADDIO D，ENGEL S，et al. A space-borne，Ka-band SAR interferometer concept based on scan-on-receive techniques[C]// EUSAR. 2010，1-4.

[4] MRISTIK V，VANBLARICUM G，CARDILLO G，et al. Terrain height measurement accuracy of interferometric synthetic aperture radars[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens，1996，34(1)：219-228.

[5] ZEBKER H A. Decorrelation in interferometric radar echoes[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens，1992，30(5)：950-959.

[6] RODRIGUEZ E. Theory and design of interferometric SAR[J]. IEE Proc Part F，1992，139(2)：147-159.

[7] GREIDANUS H，HUISING E，PLATSCHORRE Y，et al. Coastal currents with along track interferometry[C]//IGARSS. 1999，2607-2609.

[8] ROMEISER R，THOMPSON D. Numerical study on the along track interferometric radar imaging mechanism of oceanic surface currents[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.，2000，38(3)：446-458.

[9] GEBERT N，KRIEGER G，MOREIRA A. Digital beamforming on receive：techniques and optimization strategies for high-resolution and wide-swath SAR imaging[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst，2009，45(2)：564-592.

[10] PATYUCHENKO A，ROMMEL T，LASKOWSKI P，et al. Digital beamforming reconfigurable radar system demonstrator[C]//IGARSS. 2012. 1541-1544.

[11] 黄培康，殷红成，许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京：电子工业出版社，2004：79-82.

（本文编辑：应振华）