

SHI Yuelun, TANG Yueying, HAN Donghao. Key Performance Test Methods for Digital Subsystem of L-band One-dimensional Synthetic Aperture Radiometer for Ocean Salinity Satellite (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, 46(1): 110–120. CSTR:32142.14.cjss.2025-0014. DOI:10.11728/cjss2026.01.2025-0014

海洋盐度卫星 L 波段一维综合孔径辐射计 数字子系统关键性能测试方法*

石玥伦 唐月英 韩东浩

(中国科学院大学 北京 101408)

(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

摘要 针对中国首颗海洋盐度卫星主被动探测仪 (MICAP) L 波段一维综合孔径辐射计分布式数字子系统的高精度测试需求, 聚焦分布式架构下多节点同步、软硬件耦合误差分离等难题. 测试过程中, 利用多机同步触发和 FPGA 的 ILA (Integrated Logic Analyzer) 工具, 实现 24 路 AD 原始数据对齐, 解决了分布式架构下原始数据无汇聚点的难题; 同时提出硬件性能与整体性能双向印证的测试方法, 完成了软硬件解耦效果的评估. 实测结果显示, 幅度一致性 ≤ 0.4 dB, 相位一致性 $\leq 1^\circ$, 相关偏置 ≤ -38 dB, 各项指标均符合任务要求. 研究成果已应用于 MICAP 工程研制, 为星载分布式数字子系统的性能验证与优化提供了关键技术支撑.

关键词 综合孔径辐射计, 分布式数字子系统, 相位一致性, 幅度一致性, 相关偏置

中图分类号 P715

Key Performance Test Methods for Digital Subsystem of L-band One-dimensional Synthetic Aperture Radiometer for Ocean Salinity Satellite

SHI Yuelun TANG Yueying HAN Donghao

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408)

(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing Technology, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract The Microwave Imager Combined Active and Passive (MICAP), the first ocean salinity detection satellite in China, realizes the global scale measurement of key geophysical elements such as ocean salinity and soil moisture through multi-factor fusion inversion. The high-sensitivity L-band one-dimensional Synthetic Aperture Radiometer (SAR), serving as the primary detector for MICAP, features a digitally implemented subsystem with a distributed architecture that constitutes the core mod-

* 国家自然科学基金项目资助 (42206185)

2025-01-14 收到原稿, 2025-06-05 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ule of the radiometer's receiving chain. The subsystem's key performance indicators directly affect the measurement accuracy of both the radiometer and MICAP in detecting ocean salinity, thus the mission imposes stringent performance requirements. This study addresses the high-precision performance testing needs of the distributed digital subsystem, focusing on challenges such as synchronized multi-node data acquisition under a distributed framework and separation of hardware-software coupling performance. The testing method employs multi-device synchronous triggering and the Integrated Logic Analyzer (ILA) tool embedded in the FPGA of front-end data acquisition units to achieve synchronous capture of original AD sampling data from 24 channels across multiple individual units. This solution resolves the absence of original data aggregation points among multiple front-end data acquisition units in the distributed architecture. Furthermore, the study proposes a bidirectional verification framework for both hardware and system-level performance. The hardware performance is tested by analyzing raw acquired data, while the integrated hardware-software performance is evaluated by processing the end-to-end scientific data packets. This methodology achieves decoupled testing of the hardware and software performance of the distributed digital subsystem. The actual test results, including amplitude consistency ≤ 0.4 dB, phase consistency $\leq 1^\circ$, and correlation bias ≤ -38 dB, meet the mission's specified requirements. The research results have been applied to the MICAP engineering development, providing critical technical support for the performance verification and optimization of the distributed digital subsystem of ocean salinity satellite synthetic aperture radiometer.

Key words Synthetic Aperture Radiometer (SAR), Distributed digital subsystem, Phase consistency, Amplitude consistency, Correlation bias

0 引言

海面盐度是监测全球气候变化的关键参数,在全球水循环中起着重要作用.主被动微波探测仪(MICAP)作为中国海洋盐度卫星的两个主载荷之一,创新性地实现了L/C/K三个波段微波辐射计与L波段微波散射计的主被动联合.辐射计与散射计共用一个带有线性阵列馈电的大型抛物柱面反射天线^[1],全天候、全天时同步获取L/C/K三波段辐射亮温和L波段后向散射系数,经过多要素融合反演,实现海洋盐度和土壤湿度等关键地球物理要素的全球尺度测量^[2-4].

高灵敏度L波段一维综合孔径辐射计是MICAP的主探测仪,海洋盐度卫星研制任务对其灵敏度、测量精度提出了较高的技术指标要求.数字子系统是辐射计接收链路的核心模块,用于接收12台双极化接收单元输入的24路中频信号,进行AD采集及相关处理(原始数据率大于 20×10^9 bit·s⁻¹),同时需要具备射频干扰信号检测与抑制功能^[5].考虑到实时信号处理规模庞大、整体功耗较大,同时根据星载仪器电子元器件选用限制及优化电磁兼容性设计需要,L波段一维综合孔径辐射计数字子系统采用分布式架构,其功能如图1所示.

子系统由4台前置数采单机、综合数字单机和同步单机组成.每台前置数采单机对3台L波段双极化辐射计6路中频信号进行AD采集及预处理,处理结果以 3×10^9 bit·s⁻¹速率发送给综合数字单机,在综合数字单机进行全部24路数据的相关处理.处理结果打包发送给卫星数传,同步单机为各单机提供同步时钟.该分布式架构将数字子系统的功耗分散至5台单机上,降低了单机散热的难度,显著提升了工程可行性;各前置数采单机通过光纤将高速数据发送至综合数字单机,光纤链路的电磁干扰可忽略不计且传输距离远,综合数字单机可放置在远离前置数采单机和接收机的位置,改善了接收链路的电磁环境.

对传统的干涉式被动微波遥感设备的数字相关器的测试工作均是基于一体化的数字单机进行.2003年Ruf等^[6]提出了一种可编程数字噪声源-相关噪声校准标准(CNCS),用来表征微波辐射计干涉式接收链路的通道相关偏置和相位不平衡等非理想特性.该系统由一个商用任意波形发生器(AWG)、带积分校准参考源的射频上转换调制器及本地振荡器共同生成测试信号,对干涉式接收链路进行测试.2008年Peng等^[7]提出了一种改进式的L波段CNCS模型进行极化微波辐射计的相关接收链路测试.该

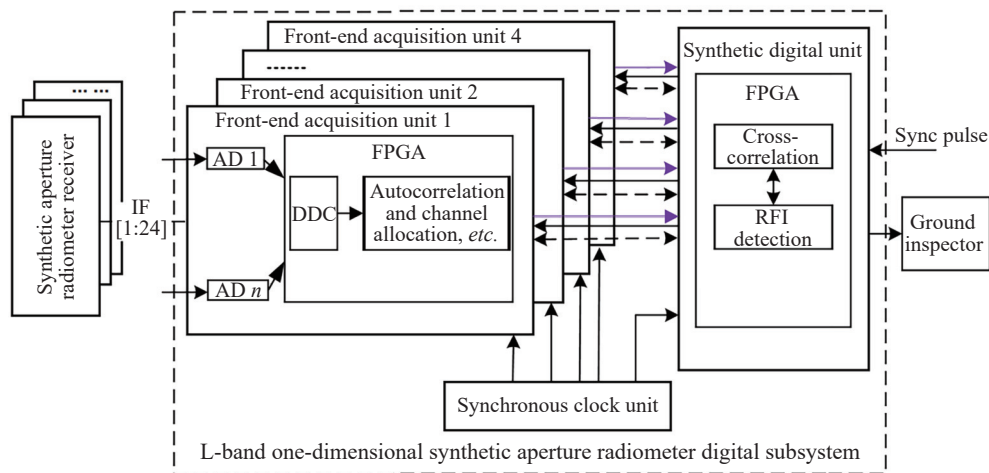


图1 L波段一维综合孔径辐射计数字子系统功能

Fig. 1 Functional block diagram of the digital subsystem of the L-band one-dimensional synthetic aperture radiometer

方法利用一台 AWG 与一对频率上转换模块,生成一系列已知参数的极化测试信号,将这些测试信号注入被测干涉接收链路后,通过分析信号的传输特性,即可完整表征被测链路接收部分的极化响应特性.该测试方法已在欧洲空间局的土壤湿度和海洋盐度卫星 Aquarius 载荷测试中成功应用.2015 年密歇根大学联合喷气推进实验室 (JPL) 提出一种针对 GeoSTAR 中低功耗专用集成电路结构的数字相关器芯片的测试方法^[8].文中对于由 4 片 ASIC 芯片构成的 128×128 规模的相关器进行了相关效率和隔离度等指标的测试.2017 年基于 AWG 生成相关噪声注入的测试方法,被应用于美国土壤湿度主被动探测卫星 SMAP 的载荷的极化校准测试^[9],其系统极化相关测量效率的测试结果为 0.999.2023 年中国科学院国家空间科学中心完成了中国海洋盐度卫星 MICAP 载荷 C/K 波段辐射计三阶量化数相关器的测试,建立了基于多重误差分析的数字相关器误差模型,并基于多路任意波形发生器生成任意相关度的测试激励信号^[10],完成了三阶量化数字相关器高精度测试实验平台的搭建.

L 波段辐射计分布式数字子系统架构设计对数字系统的测试提出了新的需求.数据量化采集在分布式数字子系统的多台前置数采单机上完成,这对各前置数采单机的一致性提出了较高的要求,其关键性能指标(幅度一致性 ≤ 0.5 dB,相位一致性 $\leq 1^\circ$,相关偏置 ≤ 35 dB)是保障辐射计测量精度的关键,因此在测

试中需要着重关注分布式多通道采集的一致性指标.同时,分布式数字子系统在正常工作模式下,通过光纤传输经前置数采单机预处理后的三阶重量化信号,无法直接用于分布式数字子系统性能评估.另外,分布式数字子系统信号处理软件复杂,软件风险给测试结果造成了额外的误差与不确定性,传统的测试方法难以实现软件与硬件的解耦测试.为解决上述问题,本文提出了综合孔径辐射计分布式数字子系统测试方法,具体特点如下.

(1) 提出了基于原始采集数据分析的分布式数字子系统硬件性能测试方法.利用高精度同步触发脉冲,通过 FPGA 开发工具逻辑分析仪 (ILA) 同步捕获 4 台前置数采单机的原始 AD 数据,实现了 24 通道 AD 原始采集数据对齐与汇聚,解决了分布式架构无原始采集数据汇聚点的困难.

(2) 实现了分布式数字子系统硬件性能测试与整体性能测试的相互印证测试.分别对原始采集数据和科学数据包进行分析处理,完成分布式数字子系统硬件性能测试及全链路软硬件的整体性能测试.硬件性能测试与整体性能测试结果相互支撑、印证,验证了软件功能的正确性及性能满足指标要求,实现了分布式数字子系统硬件和软件性能测试的解耦.

本文提出的测试方法已成功在中国海洋盐度卫星 MICAP 载荷 L 波段一维综合孔径辐射计分布式数字子系统测试中进行了实验,可为后续的测试工作提供参考.

1 分布式数字子系统硬件关键性能测试方法

1.1 测试环境

硬件测试环境如图 2 所示, 模拟信号源的输出经功分器分为多路, 输入至各前置数采单机的中频模拟输入端. 从各前置数采单机的调试接口, 通过 FPGA 开发工具逻辑分析仪 (ILA), 采用单次触发方式获取本单机 6 路 AD 采集通道原始采集序列; ILA 以 FPGA 的输入端口处的时钟作为采样时钟、以同步控制脉冲的上升沿作为触发、抓取 FPGA 入口处 6 路 AD 采集数据; 为便于手动单次触发, 将同步控制脉冲的周期调整为 10 s; 通过对获取的原始采集数据进行分析处理, 得到两台单机 12 路采集通道的相位一致性与幅度一致性. 性能测试方法以两台前置数采单机作为测试对象, 测试过程中调换前置数采单机端的 SMA 电缆插头并重复测试, 两次测试结果取平均值, 可以消除测试电缆和功分器非理想因素造成的测试相位差^[11].

根据任务要求, 输入信号需满足如下参数要求: 输入中心频率为 90 MHz, 带宽为 25 MHz, 采样率为 $120 \times 10^6 \text{ sample} \cdot \text{s}^{-1}$, ADC 量化位数 $\geq 8 \text{ bit}$, 原始采集数据经过快速傅里叶变换 (FFT) 处理后, 生成幅-频、相-频曲线. 为了避免频谱泄漏、简化后续数据处理, 输入信号源采用点频信号, 输入频率符合相干 FFT 采样条件^[12], 即

$$F_s \cdot M = f_{\text{in}} \cdot N. \quad (1)$$

其中, $F_s=120 \text{ MHz}$ 为采样频率; f_{in} 为输入信号频率;

N 为采样点数, FFT 要求 N 为 2 的整数次幂; M 为 N 个采样点包含的模拟输入信号整周期数. 对于中频欠采样, 式 (1) 中频欠采样输入信号频率 $f_{\text{in_IF}}$ 满足如下条件:

$$f_{\text{in}} = |f_{\text{in_IF}} - F_s| = \frac{F_s M}{2^h}. \quad (2)$$

其中, h 为正整数, $f_{\text{in_IF}}$ 为中频欠采样输入信号频率. 当 $h=14$, $M=256$ 时, 由式 (2) 可得 $f_{\text{in_IF}}=118.125 \text{ MHz}$, $f_{\text{in}}=1.875 \text{ MHz}$, 即每个周期采样 64 点, ILA 存储深度需设置为 16384. ADC 满量程 $V_{\text{pp}}=1 \text{ V}$, 对应输入功率为 4 dBm, 一般 AD 性能测试输入信号幅度取 0.8 倍满量程, 模拟信号发生器设置功率为 16 dBm, 通过 1:16 功分器输入至两台前置数采单机的 12 路端口. 通过对原始采集序列进行处理, 可得到子系统硬件的相位一致性和幅度一致性.

1.2 硬件幅度一致性测试方法

以两 AD 通道序列 $x(n)$, $y(n)$ 为例, 即

$$\begin{cases} x(n) = A \sin\left(\frac{\omega n}{F_s}\right) + r_1\left(\frac{n}{F_s}\right), \\ y(n) = B \sin\left(\frac{\omega n}{F_s}\right) + r_2\left(\frac{n}{F_s}\right). \end{cases} \quad (3)$$

其中, A 和 B 分别表示两通道模拟输入信号幅值, ω 为输入信号角频率, r_1 和 r_2 为非理想信号源及周围环境带来的白噪声. 通过对 $x(n)$ 和 $y(n)$ 进行 16384 点 FFT, 得到相应的幅-频特性曲线 $A_x(f)$, $A_y(f)$, 根据 $A_x(f_{\text{in}})$, $A_y(f_{\text{in}})$, 将 12 个通道的幅度最大值与最小值相减, 得到幅度一致性测试结果, 单位为 dB. 该方法是测试幅度一致性的经典通用方法.

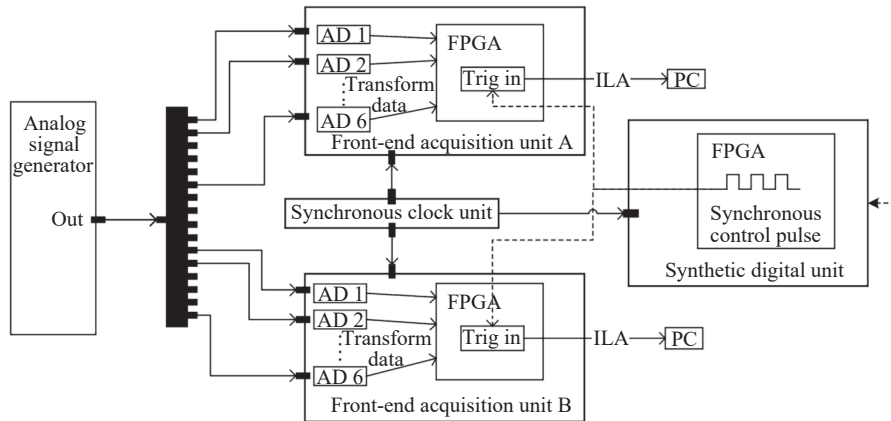


图 2 分布式数字子系统硬件相位一致性、幅度一致性测试环境

Fig. 2 Phase and amplitude consistency testing environment for distributed subsystem

1.3 硬件相位一致性测试方法

相位一致性分析方法采用互相关法与 FFT 初相位法^[11]. FFT 初相位法能够获得包含相位超前/滞后信息的相位差; 互相关法利用信号与白噪声的非相关特性, 分析结果受噪声影响较小, 可测得两通道不包含超前与滞后信息的相位差的绝对值. 互相关法和 FFT 初相位法各有优缺点, 两种数据分析方法所得结果可以相互印证.

1.3.1 FFT 初相位测试方法

FFT 初相位法获得通道相位差的超前/滞后信息, $x(n), y(n)$ 的幅-频曲线 $A_x(f), A_y(f)$ 的每个频点 f 对应的幅值是复数, 其虚部与实部之比的正切值表示该频点处的相位 $\varphi_x(f)$ ^[11]. 初相位 $\varphi_x(f_{in}), \varphi_y(f_{in})$ 的表达式为

$$\begin{cases} \varphi_x(f_{in}) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[A_x(f_{in})]}{\text{Re}[A_x(f_{in})]} \right\}, \\ \varphi_y(f_{in}) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[A_y(f_{in})]}{\text{Re}[A_y(f_{in})]} \right\}. \end{cases} \quad (4)$$

则 x, y 两通道的相位一致性为 $\varphi_x(f_{in}) - \varphi_y(f_{in})$.

1.3.2 互相关测试方法

$x(n), y(n)$ 的互相关函数可以表示为

$$R_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) y(n+m). \quad (5)$$

其中, m 取值范围为 $-N, -N+1, \dots, 1, 2, N-1, N$. 信号与噪声不相关且两噪声之间也不相关^[13], 因此式 (5) 可简化为

$$\begin{aligned} R_{xy}(m) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N AB \sin \left(\frac{\omega n}{F_s} \right) \cdot \\ &\quad \sin \left[\frac{\omega(n+m)}{F_s} + \varphi \right] = \\ &\quad \frac{AB}{2} \left\{ \cos \left(\frac{\omega m}{F_s} + \varphi \right) - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \cos \left[\frac{\omega(2n+m)}{F_s} + \varphi \right] \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

其中, φ 表示相位差. 当 $m=0$ 时, 测试中 N 取 16384, 使式中第二项远小于第一项, 因此该式可进一步简化为

$$R_{xy}(0) = \frac{AB}{2} \cos \varphi. \quad (7)$$

两个输入信号的自相关函数可分别表示为

$$\begin{cases} R_x(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) x(n+m), \\ R_y(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y(n) y(n+m). \end{cases} \quad (8)$$

其自相关函数在零点取值 $R_x(0)$ 和 $R_y(0)$, 可以求得 A 和 B 分别为

$$\begin{cases} A = \sqrt{2R_x(0)}, \\ B = \sqrt{2R_y(0)}. \end{cases} \quad (9)$$

进一步得到相位差

$$\Delta\varphi_{x,y} = \arccos \left[\frac{R_{xy}(0)}{\sqrt{R_x(0) R_y(0)}} \right]. \quad (10)$$

1.4 ADC 采集相位一致性测试方法验证

信号源选用任意波信号发生器 AWG70000, 最大采样率高达 $50 \times 10^9 \text{ sampel} \cdot \text{s}^{-1}$, 无杂散动态范围优于 -80 dBc , 垂直分辨率高达 10 bit, 输出信号可满足性能测试需求^[14]. AWG 两路 Out 1 和 Out 2 输出分别连接到待测两路 AD 采集通道, 线缆 1 和线缆 2 选用同批次、长度为等长. 两路 Out 1 和 Out 2 设置输出信号频率为 118.125 MHz, 如图 3 所示.

第 1 次测试初相位分别为 $\delta_0=0^\circ, \delta_1=3^\circ$, 通过 FFT 初相位法和互相关法分别处理得到两通道相位差 $\Delta\varphi$; 第 2 次测试再将 Out 2 初相位改为 $\delta'_1=4^\circ$, δ_0 保持不变, 同样的方法测得该两通道的相位差为 $\Delta\varphi'$, 测试结果列于表 1.

由表 1 可以看出, 当两路输入信号源相位差为 3° 时, FFT 初相位法与互相关法测得的相位差分别为 3.28° 和 3.29° , 即这两路 AD 采集通道包括线缆在内的相位差分别为 0.28° 和 0.29° ; 当输入两路信号源相位差为 4° 时, FFT 初相位法与互相关法测得的相位差分别为 4.29° 和 4.30° , 即这两路 AD 采集通道包括线缆在内的相位差分别为 0.29° 和 0.30° .

综合两次测试, δ_0 均为 $0^\circ, \delta'_1 - \delta_1 = 1^\circ$, 理论上 $\Delta\varphi' - \Delta\varphi = \delta'_1 - \delta_1 = 1^\circ$, 实测 $\Delta\varphi' - \Delta\varphi = 1.01^\circ$, 实测误差仅为 1%, 表明 FFT 初相位、互相关两种测试方法和测试结果均正确.

1.5 相关偏置测试方法

相关偏置是数字子系统性能指标之一, 对于单独的数字子系统, 相关偏置是各 AD 采集通道链路互耦、本振热噪声等引入的相关性误差, 反映了通道之间的耦合程度. 通过对待测对象输入完全不相关的噪声信号, 分析输出的科学数据包中相关内容, 得出相关偏置测试结果.

由于数字子系统两通道之间的相关偏置主要来自相互之间的串扰, 与通道之间距离有关, 一般通道间距离越近, 串扰越严重, 通常相邻通道的相关偏置

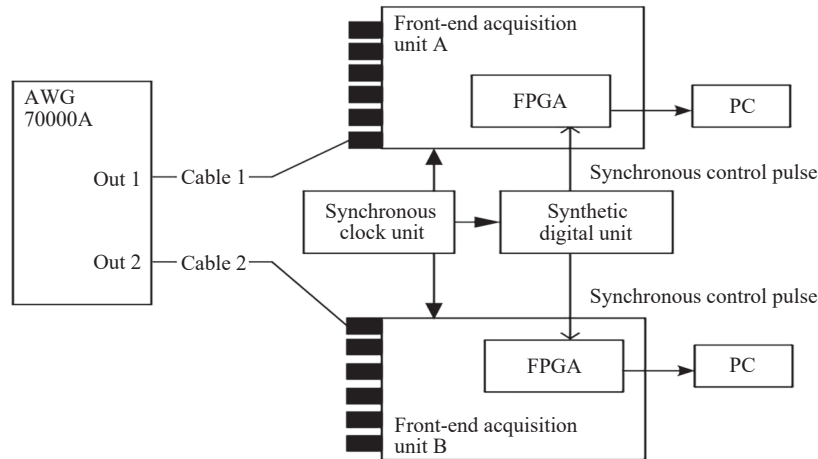


图 3 幅度、相位一致性测试方法验证测试环境

Fig. 3 Verification test environment of amplitude and phase consistency testing methods

表 1 相位一致性测试方法验证结果

Table 1 Verification results of phase consistency testing methods

	第1次测试	第2次测试
两路AD输入信号相位差	$\delta_1 = 3^\circ$	$\delta'_1 = 4^\circ$
FFT法测得的相位差	$\Delta\varphi = 3.28^\circ$	$\Delta\varphi' = 4.29^\circ$
互相关法测得的相位差	$\Delta\varphi = 3.29^\circ$	$\Delta\varphi' = 4.30^\circ$

远大于非相邻通道和不同单机的通道, 因此研究测试方法仅对一台前置数采单机的相邻通道进行测试。

2 数字子系统整体关键性能测试方法

2.1 测试环境设计

AWG 设置中心频率 90 MHz、带宽为 25 MHz 的白噪声信号, 由于其输出信号最大功率为 -2 dBm, 测试需要使用 1:16 等值分配的功分器, 将输入信号分成 12 路, 1:12 功分器的分配损耗为 $10 \times \lg 12 = 10.8$ dB. 因此需要在信号进入功分器之前, 先将信号进行放大^[15], 使到达前置数采 AD 端口的输入信号幅度约 3 dBm. 数字子系统幅相一致性测试环境如图 4 所示。

将理想的非相关信号输入数字子系统, 科学数据包的模拟互相关系数理论计算结果应为零, 实际测试中得到的互相关系数即为相关偏置。

测试环境如图 5 所示, 通过 MATLAB 将生成的两组中心频率为 90 MHz、带宽为 25 MHz、幅度为 $V_{pp} = 500$ mV 的非相关高斯白噪声导入到 AWG;

AWG 的 Out 1 和 Out 2 输出均通过 1:4 功分器分成 3 路, 交叉输入到前置数采单机的相邻的 AD 输入端。

从科学数据包中提取相关信息, 经分析处理, 得到数字子系统相位一致性、幅度一致性及相关偏置。

2.2 测试数据处理

2.2.1 科学数据包结构

数字子系统共有 24 路通道, 每台前置数采单机有 6 路通道. 科学数据包中包含互相关矩阵 $\mathbf{A}$ 和自相关矩阵 $\mathbf{B}$, 互相关矩阵 $\mathbf{A}$ 是一个 $4 \times 5 \times 13 \times 23 \times 23$ 的五维矩阵, 其中第一维度表示不同通道 I 路与 Q 路组成的 II, IQ, QI 和 QQ 互相关系数; 第二维度表示子系统 5 种工作模式 (天线、匹配负载、匹配负载+内部噪声、高公共噪声、低公共噪声); 第三维度表示工作频段平均划分成 13 个子带; 第四与第五维度表示参与互相关运算的 AD 通道编号. 自相关矩阵 $\mathbf{B}$ 是 $18 \times 5 \times 13 \times 4$ 的四维矩阵, 其中第一维度表示一台前置数采单机 6 路通道的 I 路与 Q 路组成的 II, IQ 和 QQ 共 18 个自相关结果; 第二维度表示子系统的 5 种工作模式; 第三维度表示 13 个子带; 第四维度表示 4 台前置数采单机. 由于测试过程将信号源直接输入到 AD 采集输入端, 无论是何种工作模式, AD 输入源均由标准仪器提供, 且软件处理与工作模式无关, 因此任意工作模式下, 科学数据包中的互相关矩阵 $\mathbf{A}$ 和自相关矩阵 $\mathbf{B}$ 相同. 科学数据包参数排列如图 6 所示。

以 II 相关为例, 其 23×23 互相关矩阵形式如下:

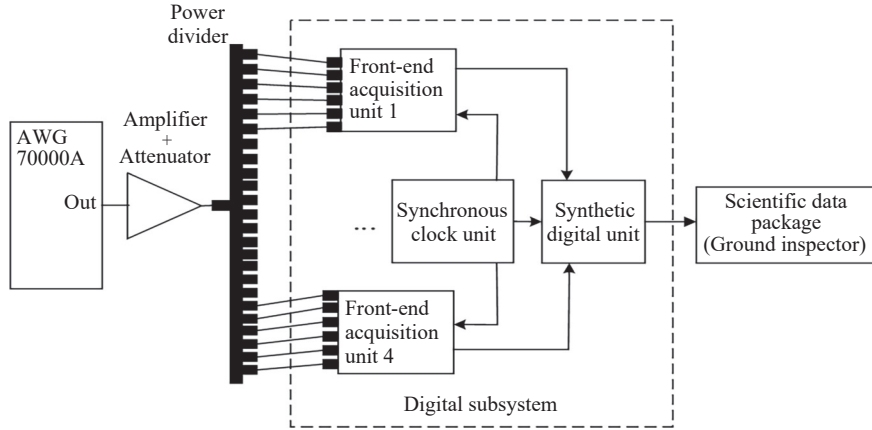


图 4 数字子系统幅度与相位一致性测试环境

Fig. 4 Amplitude and phase consistency test environment of the digital subsystem

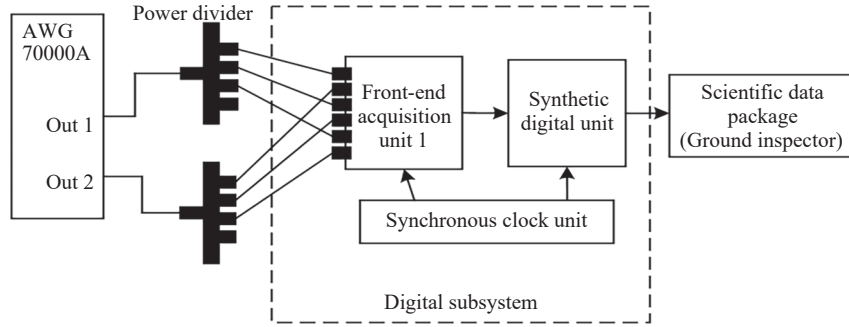


图 5 数字子系统通道相关偏置测试环境

Fig. 5 Correlation offset test environment of the digital subsystem

$$\mathbf{A}_{\Pi} = \begin{bmatrix} E_{1,2}^{\Pi} & E_{1,3}^{\Pi} & \cdots & E_{1,24}^{\Pi} \\ & E_{2,3}^{\Pi} & \cdots & E_{2,24}^{\Pi} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & E_{23,24}^{\Pi} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

其中, $E_{1,2}^{\Pi}$ 表示通道 1 的 I 分量与通道 2 的 I 分量的互相关系数, 以此类推; 每个互相关矩阵共包含 276 个相关系数, 在提取数据时, 需按照上述斜三角矩阵排列. 以子带 1、前置数采单机 1 为例, 其 18 个自相关结果分别为 $E_1^{\Pi}, \dots, E_6^{\Pi}, E_1^{QQ}, \dots, E_6^{QQ}, E_1^{IQ}, \dots, E_6^{IQ}$.

2.2.2 数字子系统通道幅相一致性处理方法

AD 通道采集序列 $s(n)$ 经过 DDC 处理后分成相互正交的 I 分量和 Q 分量, 其表达式分别为

$$\begin{cases} i(n) = s(n) \cos[\theta(n)], \\ q(n) = s(n) \sin[\theta(n)]. \end{cases} \quad (12)$$

通道 a, b 信号 $a(n)$ 与 $b(n)$ 的相关系数^[2,16] E_{ab} 的表达式为

$$E_{ab} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} a(n) b'(n)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} |a(n)|^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} |b(n)|^2}} = E_{ab}^R + jE_{ab}^I. \quad (13)$$

其中, E_{ab}^R 和 E_{ab}^I 分别为 E_{ab} 的实部和虚部.

将 a 通道信号 I 分量和 b 通道信号 I 分量相关系数、a 通道信号 I 分量和 b 通道信号 Q 分量相关系数、a 通道信号 Q 分量和 b 通道信号 I 分量相关系数、a 通道信号 Q 分量和 b 通道信号 Q 分量相关系数分别记为 $E_{a,b}^{\Pi}, E_{a,b}^{IQ}, E_{a,b}^{QI}, E_{a,b}^{QQ}$; 此时 E_{ab}^R 可以表示为 $E_{a,b}^{\Pi} + E_{a,b}^{QQ}$, 对应的虚部 E_{ab}^I 为 $E_{a,b}^{QI} - E_{a,b}^{IQ}$, 即

$$E_{ab} = E_{ab}^R + jE_{ab}^I = (E_{a,b}^{\Pi} + E_{a,b}^{QQ}) + j(E_{a,b}^{QI} - E_{a,b}^{IQ}). \quad (14)$$

进而能够推导出 a, b 通道的相位差^[16] 为

$$\theta = \arctan\left(\frac{E_{ab}^I}{E_{ab}^R}\right) = \arctan\left(\frac{E_{a,b}^{QI} - E_{a,b}^{IQ}}{E_{a,b}^{\Pi} + E_{a,b}^{QQ}}\right). \quad (15)$$

通道 a 的平均功率为

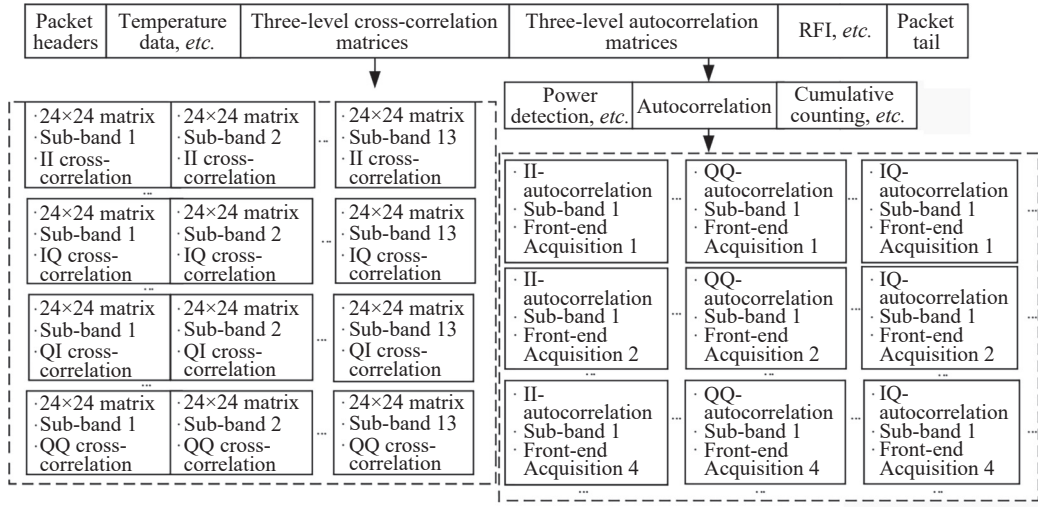


图 6 科学数据包参数排列

Fig. 6 Scientific packet parameter arrangement

$$A_a = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |a(n)|^2. \quad (16)$$

类似地, 也可得到通道 b 的平均功率为 A_b .

通道 a 的自相关分量 E_a^{II} , E_a^{QQ} 分别为

$$\begin{cases} E_a^{\text{II}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [a^{\text{I}}(n)]^2 = \\ \quad \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |a(n)|^2 \cos^2[\theta(n)], \\ E_a^{\text{QQ}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [a^{\text{Q}}(n)]^2 = \\ \quad \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |a(n)|^2 \sin^2[\theta(n)]. \end{cases} \quad (17)$$

类似地, 可得到通道 b 的自相关分量 E_b^{II} 与 E_b^{QQ} . 根据自相关结果, 可得两通道功率的关系为

$$\frac{A_a}{A_b} = \frac{E_a^{\text{II}} + E_a^{\text{QQ}}}{E_b^{\text{II}} + E_b^{\text{QQ}}}. \quad (18)$$

2.2.3 数字子系统相关偏置测试方法

从科学数据包提取出 6 路通道 a 和 b 的 II, IQ, QI 和 QQ 互相关系数 $E_{a,b}^{\text{II}}$, $E_{a,b}^{\text{IQ}}$, $E_{a,b}^{\text{QI}}$, $E_{a,b}^{\text{QQ}}$, 根据式 (14) 得到相关系数矩阵. 相关系数矩阵中相邻通道的两两互相关系数 E_{ab} 即为相关偏置测试结果.

3 测试结果与分析

3.1 分布式数字子系统硬件关键性能测试结果

测试环境按照 1.1 节所述, 先选择同批次、等长的 12 根电缆, 按照图 2 所示连接功分器和前置数采各通道, 测试得到一组原始采集数据, 利用 FFT 初相位法得到各通道初始相位并取平均值, 对于初始相位差

与平均初值相差较大的通道, 采用更换对应电缆或选用功分器多余的其他通道, 直至各通道之间最大初始相位差小于 1.4° ; 固定该组测试电缆和功分器通道, 开始正式性能测试.

初次测试得到原始采集数, 利用 1.2 节所述 FFT 初相位测试方法分析, 得到相频特性曲线 $\varphi(f)$, 横坐标为频率, 纵坐标为初始相位, 测试输入信号 $f_{\text{in_IF}} = 118.125 \text{ MHz}$, 即等效 $f_{\text{in}} = (120 - 118.125) \text{ MHz} = 1.875 \text{ MHz}$, f_{in} 对应处相位即为本次测试初相位值 $\varphi(f_{\text{in}})$. 图 7 为某次测试得到的单机 A 通道 1 的相频曲线, 初相位及与平均初相位之差列于表 2.

由表 2 可见, A2 通道的初相位与平均初相位之差最小, 对于本次测试, 与平均初相位之差大于 0.4° 的通道, 均与 A2 通道在前置数采一端调换电缆接口, 因此需依次调换 4 次, 对 5 次测试结果取平均值, 得到最终

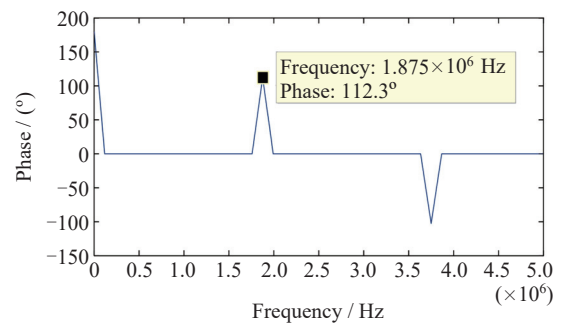


图 7 单机 A 通道 1 某次测试的相频曲线

Fig. 7 Phase-frequency curve of Channel 1 of Unit 1 in a test

表 2 各通道初相位及平均相位之差

Table 2 Initial phase of each channel and the difference between eask channel and the average phase

通道序号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	平均
初相位/(°)	112.31	111.92	112.43	112.17	111.81	112.30	111.44	112.37	111.68	111.19	111.76	112.13	111.96
与平均初相位之差/(°)	0.35	-0.04	0.47	0.21	-0.15	0.34	-0.52	0.41	-0.28	-0.77	-0.20	0.17	—

表 3 FFT 初相位法相位一致性测试结果

Table 3 Phase consistency test results by FFT initial phase method

通道序号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
5次测试结果平均值/(°)	0.33	-0.06	0.36	0.19	-0.17	0.31	-0.35	0.31	-0.30	-0.55	-0.22	0.15

表 4 互相关测试方法计算相位一致性结果 [单位: (°)]

Table 4 Phase consistency results by cross-correlation test method [unit: (°)]

通道序号	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
A1	0.39	0.03	0.13	0.51	0.02	0.68	0.02	0.64	0.88	0.55	0.19
A2	—	0.42	0.25	0.11	0.37	0.39	0.37	0.24	0.50	0.16	0.21
A3	—	—	0.17	0.53	0.05	0.71	0.05	0.66	0.91	0.59	0.21
A4	—	—	—	0.36	0.12	0.54	0.12	0.49	0.74	0.41	0.04
A5	—	—	—	—	0.48	0.18	0.49	0.13	0.38	0.05	0.33
A6	—	—	—	—	—	0.66	0.01	0.61	0.86	0.53	0.16
B1	—	—	—	—	—	—	0.67	0.05	0.20	0.13	0.51
B2	—	—	—	—	—	—	—	0.61	0.86	0.53	0.16
B3	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.08	0.46
B4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.33	0.70
B5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.38

测试结果见表 3, 其中最大值 (0.36°) 与最小值 (-0.55°) 之差为 0.91°, 即为通道相位差一致性测试结果。

对上述5组测试原始采集数据, 均采用互相关分析方法并取平均值, 得到相位一致性结果列于表 4, 两通道相位差最大值为 0.91°, 可见两种分析方法结果一致, 均小于指标要求 1°, 符合相位一致性指标。

对于上述5组原始采集数据, 利用 1.2 节所述幅度一致性测试方法, 图 8 为某次测试得到的单机A通道1的幅频曲线, $f = f_m$ 处的幅度列于表 5。

由表 5 可见, 原始采集数据的功率幅度最大值 3.70 dBm 和最小值 3.47 dBm 相差 0.23 dB, 小于指标要求 0.4 dB, 测试结果与设计相符。

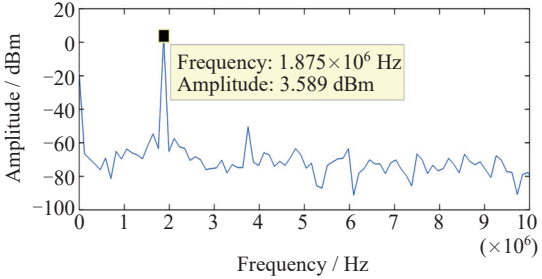


图 8 单机 A 通道 1 某次测试的幅频曲线
Fig. 8 Amplitude-frequency curve of Channel 1 of Unit 1 in a test

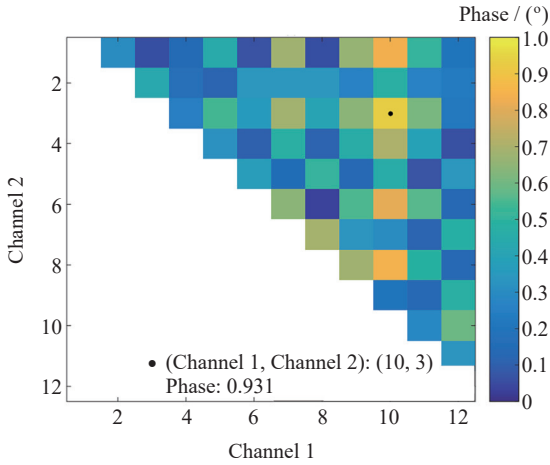


图 9 数字子系统通道相位一致性
Fig. 9 Phase consistency of digital subsystem channel

3.2 数字子系统整体关键性能测试结果

数字子系统整体性能测试按照 2.1 节幅相一致性测试环境得到科学数据包, 利用 2.2.2 节所述数字子系统通道幅相一致性处理方法, 从中提取相关信息并进行分析处理, 得到子系统整体的相位一致性和幅度一致性。

表 5 幅度一致性测试结果
Table 5 Test results of amplitude consistency

通道序号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
功率/dBm	3.59	3.56	3.58	3.54	3.47	3.65	3.52	3.67	3.70	3.47	3.60	3.67

表 6 数字子系统整体幅度一致性测试结果
Table 6 Test results of the overall amplitude consistency of digital subsystem

通道序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
幅度与平均值差/dB	0.05	0.14	0.00	0.17	0.07	0.30	0.01	0.03	0.04	0.13	0.13	0.18

前置数采单机A和B的12路通道的数字子系统通道相位一致性如图9所示, 其中最大相位差如图中标记数据点. 可见12路通道的相位一致性 $\leq 0.93^\circ$, 数字子系统相位一致性与3.1节中分布式数字子系统硬件相位一致性测试结果相近, 并且符合小于 1° 的指标要求, 测试结果与设计相符.

各序列幅度与平均值之差, 表示数字子系统整体幅度一致性测试, 结果列于表6. 各通道幅值与平均值相比较最多相差0.3 dB, 与设计要求相符.

利用2.2.3节所述数字子系统相关偏置获取方法, 从2.1节相关偏置测试环境下得到的科学数据包中提取有用信息, 得到数字子系统相关偏置列于表7. 由表7可以看出, 相关偏置 ≤ -38 dB, 满足指标要求.

3.3 测试结果汇总

测试结果汇总情况列于表8, 可以看出, 相位一致性、幅度一致性和相关偏置的硬件性能测试结果均略优于整体性能, 且均满足仪器指标要求. 分布式子系统硬件性能优于整体性能的原因在于: 硬件性能是通过对12 bit量化的原始采集数据进行分析得到的, 而整体性能是通过经过三阶重量化等一系列信号处理后的科学数据包分析得出的, 因而性能略有下降.

4 结论

针对中国首颗海洋盐度探测卫星主被动探测仪(MICAP) L波段一维综合孔径辐射计分布式数字子系统关键性能测试需求, 结合子系统的具体设计, 提出利用子系统单机之间的同步脉冲和FPGA开发工具逻辑分析仪, 实现24路AD采集原始数据的汇聚与对齐. 分别对原始采集数据与科学数据包进行信息

表 7 数字子系统相关偏置测试结果 (单位: dB)
Table 7 Correlation offset test results of digital subsystem (unit: dB)

通道序号	1	2	3	4	5	6
1	—	-39.56	—	—	—	—
2	—	—	-39.5	—	—	—
3	—	—	—	-39.15	—	—
4	—	—	—	—	-38.77	—
5	—	—	—	—	—	-39.29
6	—	—	—	—	—	—

表 8 测试结果汇总
Table 8 Summary of test results

性能项	相位一致性/(°)			幅度一致性/dB			相关偏置/dB	
	指标要求	硬件性能	整体性能	指标要求	硬件性能	整体性能	指标要求	整体性能
测试结果	≤ 0.91	≤ 0.91	≤ 0.93	≤ 0.4	0.23	0.30	≤ -35	-38

分析, 完成分布式数字子系统硬件性能测试与全链路软硬件整体性能测试, 实现软件与硬件的测试解耦. 本文提出的测试方法在海洋盐度卫星主被动探测仪L波段一维综合孔径辐射计分布式数字系统研制过程中完成了工程验证, 测得幅度一致性 ≤ 0.4 dB、相位一致性 $\leq 1^\circ$ 、相关偏置 ≤ -38 dB, 符合仪器指标要求. 本研究可为后续大规模干涉阵列综合孔径辐射计分布式数字子系统的测试工作提供参考.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] LIU H, ZHU D, NIU L J, et al. MICAP (Microwave Ima-

- ger Combined Active and Passive): a new instrument for Chinese ocean salinity satellite[C] // 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Milan, Italy: IEEE, 2015: 184-187
- [2] NIU Lijie, LIU Hao, WU Lin, *et al.* Development and experimental study on L-band synthetic aperture radiometer prototype for ocean salinity measurement[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, **39**(8): 1841-1847 (牛立杰, 刘浩, 武林, 等. 面向星载海洋盐度探测应用的 L 波段综合孔径辐射计原理样机研制与试验研究 [J]. *电子与信息学报*, 2017, **39**(8): 1841-1847)
- [3] ZHANG L J, YIN X B, WANG Z Z, *et al.* Preliminary analysis of the potential and limitations of MICAP for the retrieval of sea surface salinity[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, **11**(9): 2979-2990
- [4] TONG Xing, NIU Lijie, HAN Donghao, *et al.* Amplitude calibration method for synthetic aperture radiometer based on cold-sky observation unit[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(5): 832-845 (仝星, 牛立杰, 韩东浩, 等. 基于冷空观测单元的综合孔径微波辐射计幅度定标方法 [J]. *空间科学学报*, 2024, **44**(5): 832-845)
- [5] GUO T S, GUO X, LIU H, *et al.* Study of the real-time onboard radio frequency interference detection and mitigation strategy for MICAP L-band radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 5304914
- [6] RUF C S, LI J K. A correlated noise calibration standard for interferometric, polarimetric, and autocorrelation microwave radiometers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(10): 2187-2196
- [7] PENG J Z, RUF C S. Calibration method for fully polarimetric microwave radiometers using the correlated noise calibration standard[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(10): 3087-3097
- [8] AUSTERBERRY D, GAIER T, KANGASLAHTI P, *et al.* Test methodology for the Geostar correlator[C] // 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Milan, Italy: IEEE, 2015: 3473-3476
- [9] PIEPMEIER J R, FOCARDI P, HORGAN K A, *et al.* SMAP L-band microwave radiometer: instrument design and first year on orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, **55**(4): 1954-1966
- [10] LIU J Y, HAN D H, GUO X, *et al.* Characterization method for digital correlator of interferometric radiometers based on correlated noise source[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2023, **20**: 4500905
- [11] LIU Kai, WU Qiongzhi, SUN Lin, *et al.* A high-precision measure method of multi-channel ADC consistency[J]. *Electronic Design Engineering*, 2014, **22**(19): 86-88,92 (刘楷, 吴琼之, 孙林, 等. 多通道 ADC 一致性的高精度测量方法 [J]. *电子设计工程*, 2014, **22**(19): 86-88,92)
- [12] TANG Yueying, XU Ke, LIU Peng, *et al.* Design and realization of an IF digital receiving module for space-borne double-frequency radar altimeter[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2017, **40**(4): 15-21 (唐月英, 许可, 刘鹏, 等. 星载双频雷达高度计中频数字接收模块设计及性能测试 [J]. *电子测量技术*, 2017, **40**(4): 15-21)
- [13] ZHENG Shengfeng, CHEN Suming, DI Jinhai, *et al.* Phase difference measurement of sinusoidal signal based on multi-layer cross-correlation[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2012, **32**(1): 34-40 (郑胜峰, 陈素明, 狄金海, 等. 一种基于多重互相关的相位差测量新方法 [J]. *宇航计测技术*, 2012, **32**(1): 34-40)
- [14] Tektronix. Arbitrary Waveform Generators AWG70000B Series Datasheet[EB/OL]. [2025-03-30]. <https://www.tek.com/en/products/arbitrary-waveform-generators/awg70000>
- [15] DONG Xiaolong, WU Ji, JIANG Jingshan. Analysis and calibration of effects on complex correlations from mutual coupling and imbalance between channels[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, **29**(7): 947-949 (董晓龙, 吴季, 姜景山. 信道互耦和不平衡度对综合孔径微波辐射计复相关干涉测量的影响分析及其校准 [J]. *电子学报*, 2001, **29**(7): 947-949)
- [16] YU Zhe, LIU Hao, NIU Lijie, *et al.* A System and Method for Performance Testing of Third-order Digital Correl: China, 113125883B[P]. 2024-07-09 (于哲, 刘浩, 牛立杰, 等. 一种用于三阶数字相关器性能测试系统及方法: 中国, 113125883B[P]. 2024-07-09)

作者简介



石玥伦 女, 1999 年 10 月出生于北京市, 现为中国科学院大学硕士研究生. 研究专业为电子与通信工程, 主要研究领域为微波辐射计系统测试等.
E-mail: syl991018@126.com



唐月英 (通信作者) 女, 1966 年 7 月生于湖南省怀化市, 现为中国科学院国家空间科学中心正高级工程师, 硕士生导师. 主要研究方向为复杂航天电子技术, FPGA 软件技术, 系统控制与信号处理.
E-mail: tangyueying@mirslab.cn