

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107807

基于 ASAAC 标准的星载功率分配器研制^{*}

郭永刚 王世伟 石福成 王 宽 王剑祥 李文新

(兰州空间技术物理研究所 兰州 730000)

摘要: 为了解决原子钟输出高品质频率标准路数单一的问题,同时针对空间电子系统对高品质频率标准的多路需求,基于欧洲联合标准航空电子结构委员会(ASAAC)标准,完成了一款新型星载功率分配器的设计。采用先功分后隔离的设计思路,不仅具备频率基准信号的分发功能,可输出 12 路高隔离度的频率标准。并且通过增加控制单元并设计机内自测试系统,实现了故障检测及通信功能。通过采用主、备份设计,提高了该产品的可靠性,主备份切换通过 OC 指令完成。通过采用 LRM 连接器,实现了模块的快速插拔替换,增强了模块的可维修性。通过理论分析及测量结果,隔离度优于 72 dB,输出功率大于 6 dBm,谐波优于 -62 dBc,杂波优于 -90 dBc(200 MHz 以内),验证了该功率分配器的可行性和有效性。

关键词: ASAAC 标准;星载;BIT 设计;功率分配;高可靠性

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

Design and implementation of the space power dividers based on ASAAC standard

Guo Yonggang Wang Shiwei Shi Fucheng Wang Kuan Wang Jianxiang Li Wenxin

(Lanzhou Institute of Physics, China Academy of Space Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the number of high-quality frequency standard for atomic clock output is too few, and in view of the demand for high-quality frequency standards for space electronic systems, this paper designed a novel space power divider based on the Allied Standard Avionics Architecture Council (ASAAC) standard. The design idea of power division first and then isolation is adopted, it not only has the distribution function of frequency reference signals, which can output 12 frequency standards with high isolation, but also the fault detection and communication functions can be realized by adding the control module and design of the built-in test system. In addition, the module adopts the main and backup design, which improves the reliability of the product. The switch of main and backup is completed by the output compare (OC) instruction. The LRM connector is used to realize the rapid plug-and-pull replacement of the module and enhance the maintainability of the module. Finally, through theoretical analysis and measurement results, the isolation is better than 72 dB, the output power is greater than 6 dBm, the harmonic is better than -62 dBc, and the clutter is better than -90 dBc (within 200 MHz), which verifies the feasibility and effectiveness of the product.

Keywords: ASAAC standard; space; BIT design; power divided; high reliability

0 引 言

近年来,原子钟广泛应用于航空航天、仪器仪表、国防军工、天文和通信等领域,但原子钟输出的频率标准路数较少。同时随着时间统一系统、航空电子系统等设计复杂度的提高,均需要高品质的频率标准信号作为时钟源。在这种情形下,功率分配器就变得尤为重要,并且要求路与路间

具有很高的隔离度,以防止各支路间的信号相互串扰而带来不必要的麻烦。功率分配器作为通信系统中最重要的模块之一^[1-3],广泛应用于相控阵雷达、卫星等领域。近年来人们设计了任意功率比、多路、滤波功分、高隔离等多种性能要求的功分器。文献[4]中提出了一种具有宽隔离的改进型功分器,工作带宽在 1.8~6.4 GHz,隔离度为 20 dB。文献[5]中提出的功分器在频率范围 DC-5.7 GHz 过程中,

收稿日期:2021-09-07

^{*} 基金项目:真空技术与物理重点实验室基金项目(6142207200101)资助

隔离度指标优于 19.5 dB;文献[6]提出了一种宽带双节 Wilkinson 功率分配器的研制,其中隔离度达到了 27 dB。相比于上述文献,本文提出的功率分配器的隔离度高达 72 dB。此外,此外本文设计的功分器中还增加了 MCU,实现了功分器的智能化监控。

隔离度^[7]是功率分配器的重要指标之一,一般的功率分配器的路间隔离度是 15~20 dB^[8],而航天电子系统中一般要求路间隔离度大于 40~60 dB,目前已知的提高隔离度的方法是在各输出端口串接隔离器和采用腔体隔离结构,但是这两种方法都会直接增加整个产品的体积和重量。并且目前已知的功率分配器路间隔离度最高的是 56.7 dB^[9]。本文通过采用高隔离功放电路,同时在 PCB 设计中采用隔离和阻抗匹配思路,最终本文设计的功率分配器任意两路输出信号间的隔离度优于 72 dB。

小型化是近年来发展的主要趋势。为了满足产品可插拔和可替换的要求,本文提出了一种基于欧洲联合标准航空电子委员会(ASAAC)标准^[10]的小型化高指标智能功率分配器,中心频率为 100 MHz,不仅实现了对原子钟输出高质量频率标准的功率分配功能,而且输出功率是可调节的。此外,考虑到 BIT 设计能够大大提高复杂的电子系统故障诊断、定位和恢复的能力。因此,通过 BIT 系统设计^[11],利用系统自身资源进行模块自检测试,监控模块的运行状态^[12],继而实现故障诊断和隔离等功能,提高了模块的测试性和可维修性。

1 系统设计

系统设计,即对整个全局问题进行分析,基于 ASAAC 标准的小型化高隔离度功率分配器系统原理如图 1 所示。

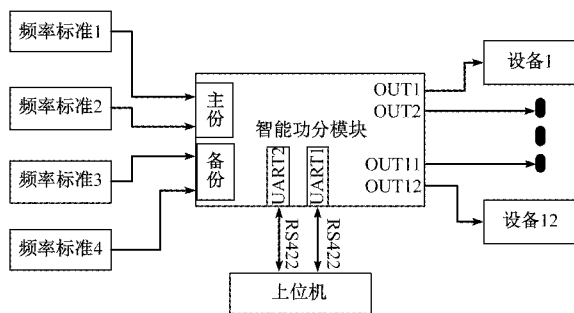


图1 功率分配器系统原理

该模块实现的功能主要包括:1)具有频率分发功能,输入 1 路高质量频率标准,最终可输出 12 路高质量频率标准;2)模块内部具有备份设计,确保了该模块的高可靠性;3)通过 BIT 设计,对模块进行健康管理和故障处理;4)采用标准化 ASAAC 结构,具备快速安装、更换的能力,信号输出采用 LRM 连接器,便于快速插拔和接口通用化;5)通过 ANSYS 有限元分析法对整个模块进行了热学仿真,仿真结果满足设计要求。

2 硬件设计

功率分配器采用自顶向下设计思路,并充分考虑模块的可靠性、安全性、维修性、测试性、电磁兼容性、抗辐射等性能,主要功能是将输入的频率标准信号进行合路、放大、滤波,最终输出 12 路频率标准信号。整机分为电源模块、功放模块和控制模块。模块整机硬件原理如图 2 所示。

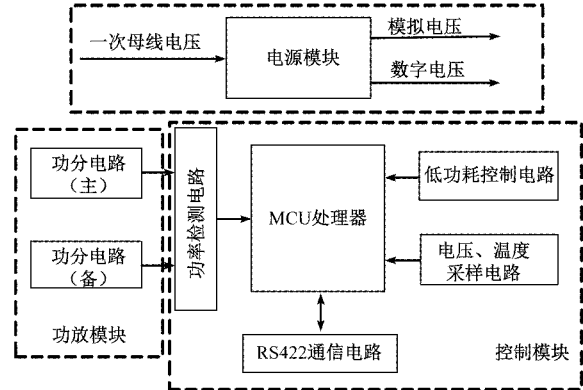


图2 硬件原理

硬件部分的创新点有:1)功分模块采用了主备份设计,增强了整个模块的可靠性;2)功放电路部分采用了“先功放后滤波”设计思路,提升了输出信号的品质;3)通过采用“滤波器+PCB 布板设计”思路,代替了原来的腔体隔离技术,不仅减少了体积,同时还增加了输出信号的隔离度指标;4)采用了 ASAAC 标准结构及模块化设计思路,增加了模块的可维修性。

2.1 电源模块

电源模块主要功能是将一次母线电压/功率转换为模块内部所需的电压/功率,主要由输入保护电路、浪涌抑制电路、EMI 滤波电路、指令控制电路、功率变换电路、二次稳压电路、输出滤波电路等组成。浪涌抑制电路主要消除输入滤波电容在开机瞬间产生的较大的充电浪涌电流,从而保护整个电源电路。EMI 滤波电路的作用是防止模块电源本身产生的电磁干扰进入一、二次母线,同时防止电源母线上的干扰进入模块电源内部,影响电源的正常工作。功率变换电路是将一次母线电压/功率转换为模块内部所需的电压/功率,并实现输入和输出的隔离。指令切换电路包含两部分,一部分实现模块的加去电功能,一部分实现功放电路的主备份切换。

2.2 功放模块

作为整个模块的核心部分,高隔离度关键技术采用“二级功放+滤波隔离”的设计方案,替代了传统的腔体隔离技术。不仅实现了多路信号输出,并且路间隔离度也得到了有效提高。功放模块由主、备份功放电路组成,主备份功放电路原理完全相同。主备切换是通过 OC 指令切换继电器来实现,功放电路主要实现输入频率信号的分发功能,也就是输入 1 路信号,输出 12 路信号,功放电路原理如图 3 所示。

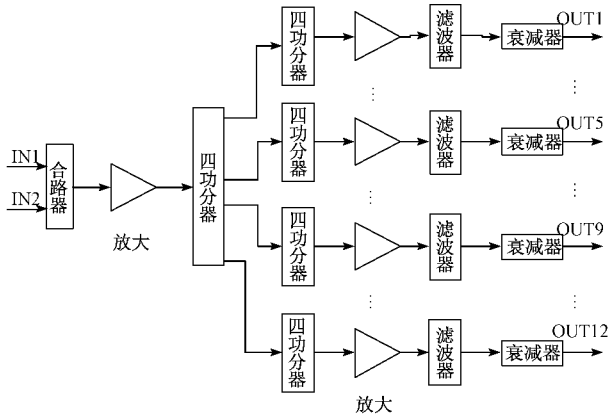


图 3 功放电路原理

工作流程为:首先利用合路器将 IN1 和 IN2 在用输入频率信号选出,通过放大器将信号放大,接着经过第 1 级四功分芯片将 1 路信号功分为 4 路信号,这 4 路信号分别输入第 2 级四功分芯片,从而将 4 路信号分发给 16 路频率信号,同时从第 2 级每个四功分器后面引出一路信号用于检测功率大小,最后先经过放大器对信号功率进行放大,再经过滤波器对放大后信号进行频谱提纯,对信号谐波进行有效抑制,最终通过电阻衰减器对信号进行功率衰减和阻抗匹配,整个输出信号的大小可以通过功率衰减器进行调节,最终输出 12 路高品质频率信号。

2.3 控制模块

针对本模块的需求,同时兼顾硬件和软件的需求,控制模块中选择了基于 ARM 内核的微处理器芯片。作为整个模块的控制核心,控制模块主要实现状态采集及通信功能,主要由状态采集电路、通信电路、故障检测电路、电平转换电路和最小系统电路组成。状态采集电路对模块内部各个工作电压及机壳温度进行采集;通信电路主要通过 RS422 实现和上位机的通信功能;故障检测电路实现输出信号的大小检测,当输出低于设定阈值时,发出告警;最小系统电路实现 MCU 供电的滤波,时钟电路,启动方式选择,程序下载、看门狗等功能。

3 软件设计

本文系统中,软件运行基于 ARM 内核的微处理器上,软件设计时参考了 Free RTOS^[13]架构,在此架构基础上采用 BIT 设计思路^[14],完成了各类信息采集、上传测试信息等功能。并且,通过设计了两组 RS422 通信,实现了通信故障处理功能,增加了软件的可靠性。此外,通过预留测试维护接口,并可根据用户要求进行简单的故障处理,如故障告警等。主程序流程如图 4 所示,系统上电后,首先进行硬件接口初始化,包括 UART、IO 口等相关设备的初始化配置,接着进行定时器初始化,创建了定时器任务,本系统共有两个定时器任务,任务 1 每隔 1 ms 执行一次定时器任务,进行 AD 口数据的读取;任务 2 每隔 10 ms 执行一次数

据处理,判断数据的合法性。最后在主任务中创建串口解析任务和数据处理任务两个用户任务。

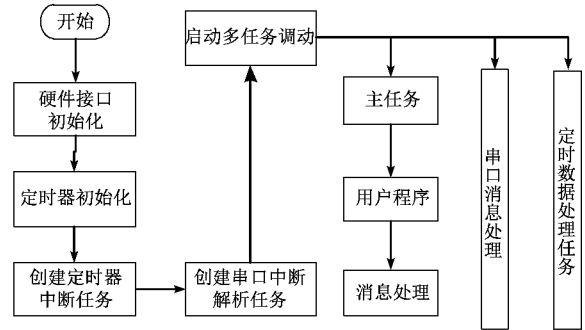


图 4 主程序流程

本文系统设计的 BIT 系统测试功能^[15]主要完成如下 4 个功能:加电自测试、周期自测试、维护自测试、待机自测试。模块上电后首先进行加电自测试,主要包括上电时电源状态检测、内部供电电压检测、MCU 工作状态检测、温度检测等。模块正常启动后,根据接收到的上级管控系统的指令进行周期自测试、维护自测试或者待机自测试,模块 BIT 测试流程如图 5 所示。

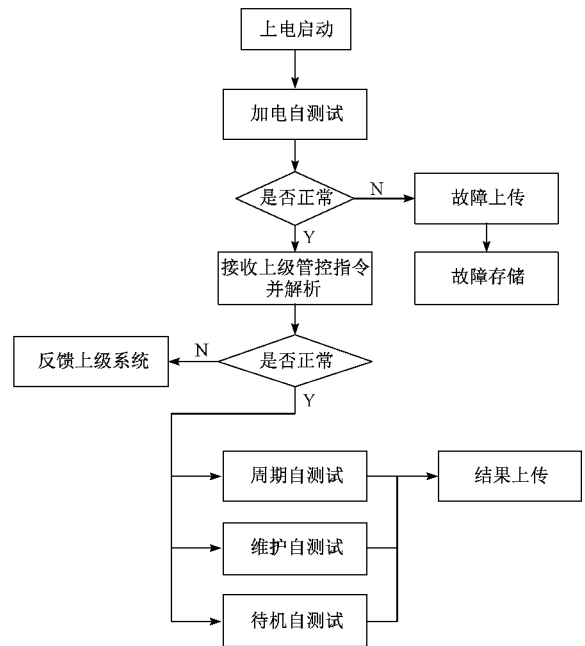


图 5 BIT 测试流程

4 结构与热设计

4.1 结构设计

模块采用标准的 ASAAC 结构要求,包括机箱、上盖板、两侧锁紧条、起拔器和 LRM 连接器组成。模块通过两侧导热肋片将模块内部元器件产生的热量传导至模块的安装机架上,起拔器提供了模块在机架上的插入与拔出手段,整机结构如图 6 所示。

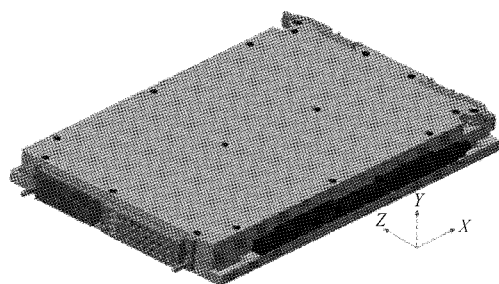


图6 模块结构

模块通过LRM连接器对插到机架里面的背板上,LRM连接器是一款基于ASAAC模块需求而开发的高密度、高速率、高可靠的通用化金属矩形连接器^[16],作为航空电子模块标准连接器,可实现射频、差分、光纤、电源等多种信号混合传输;采用法拉第电笼结构,可实现静电放电保护功能;具有防差错标识,可满足盲插及防误差。广泛应用于航天、航空领域。

4.2 热设计

为了得到模块在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下工作时的热特性,基于热传学的基本理论,采用有限单元法对模块进行稳态热仿真分析^[17],利用Ansys mesh^[18]功能模块得到模块的有限元网格模型如图7所示。模块热仿真边界条件为 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。环境温度为 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,模块稳态温度场分布如图8所示,环境温度为 $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,模块稳态温度场分布如图9所示。

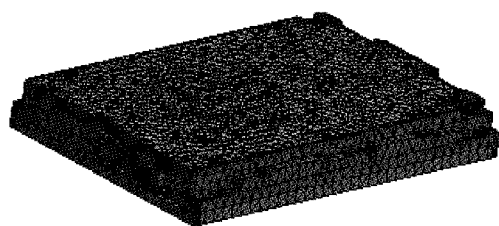
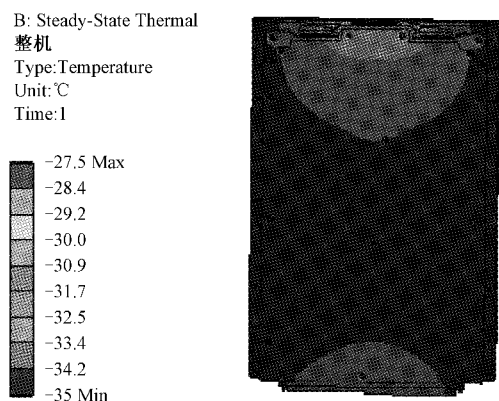
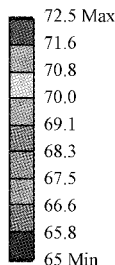


图7 模块热仿真有限元网格模型

图8 环境 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时模块热分布

通过图8可以看出,整个模块在环境为 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,模块内部温度最低为 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$,而其中用到的电子器件的最

B: Steady-State Thermal
整机
Type: Temperature
Unit: $^{\circ}\text{C}$
Time: 1

图9 环境 $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时模块热分布

低工作温度为 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此可以满足 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的使用条件。通过图9可以看出,整个模块在环境为 $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,模块内部最高温度为 $+67.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而其中用到的电子器件的最高工作温度为 $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以满足使用条件。此外,通过地面模拟实验对仿真模型进行了验证,仿真结果与试验结果基本吻合,结果表明整个模块热设计合理,可以满足散热要求。

5 测试

最后对整机输出信号的主要指标进行了测试,主要是常温常压环境下,通过频谱仪对输出信号路间隔离度、谐波进行了测试,通过相噪分析仪对输入、输出信号相位噪声恶化情况进行了测试。

5.1 路间隔离度

支路端口的隔离度是功率分配器的一个重要指标。路间隔离度指的是主路和其他支路都接匹配负载的情况下,其他各支路的衰减量。测试时,所有输入接 $50\ \Omega$ 的匹配负载,依次在每一路输出输入 $0\ \text{dBm}$ 信号,测试其他各路输出的功率大小。表1为在第1路输出输入信号,其他路输出的测试情况。

表1 路间隔离度测试数据

输出	第1路	第2路	第3路	第4路	第5路	第6路
隔离度	—	72	76	80	82	80
输出	第7路	第8路	第9路	第10路	第11路	第12路
隔离度	83	82	81	83	84	85

5.2 谐波测试

谐波频率是输入频率的整数倍,通常以分贝(dBc)表示其相对于基频的信号强度,谐波太大时,会对整个射频系统产生噪声,从而影响系统的性能。一般的射频系统中,为了保证射频系统稳定可靠的工作,通常需要将谐波控制在 $40\sim 50\ \text{dBc}$ 以下。本功分器详细的谐波测试情况如表2所示。

表 2 谐波测试数据

频点	200 MHz	300 MHz	400 MHz	500 MHz
谐波/dBc	-76.93	-74.01	-87.60	-94.86
频点	600 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz
谐波/dBc	-92.71	-87.98	-80.84	-78.88

从表 2 可以看出,本文所设计的功率分配器输出信号的谐波均优于 70 dBc,满足系统的需求。

5.3 相噪测试

相位噪声指单位 Hz 的噪声密度与信号总功率之比,表现为载波相位的随机漂移,通常定义为在某一给定偏移频率处的 dBc/Hz 值,是衡量频率标准源频稳质量和频谱纯度的重要指标。相位噪声恶化的大小可以反映出功率分配器的优劣,因此在设计产品时,需要尽可能的对相位噪声进行抑制,相位噪声恶化越小,功率分配器性能越好。

本文设计的功率分配器,对输入、输出信号相位噪声恶化情况测试如表 3 所示。

表 3 相位噪声恶化情况

频点/ Hz	输入频率信号/ dBc	输出频率信号/ dBc	恶化/ dB
10	-103.50	-100.44	3.06
100	-131.12	-131.12	0
1 k	-151.44	-147.99	3.45
10 k	-152.92	-150.47	2.45
100 k	-159.72	-159.04	0.68

从表 3 可以看出,本文设计的功率分配器,对于输入信号的相噪恶化情况有限,在 1 kHz 频点出恶化最大,为 3.45 dB,在 100 Hz 频点处几乎没有恶化。因此,该功率分配器可以很好地保持输入信号的相位噪声,可以满足系统的应用。

5.4 性能分析

本文论述了一种小型化星载高隔离度功率分配器的原理及其内部功能模块的设计,整个模块均按照航天产品设计研制技术流程完成,所有选择元器件和原材料均满足航天器单机选用要求,具有高可靠性,小体积的特点,在满足整机小型化需求的基础上,采用了具有高隔离度的功率放大器,使得整个模块输出具有高隔离度,整机可满足 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作温度。可应用于微波功率放大器,相控阵雷达,卫星等领域,详细技术指标如表 4 所示。小型化星载功率分配器已经经过系统联试,所有指标均满足系统要求,实物照片如图 10 所示。

表 4 小型化星载功率分配器主要性能指标

项目	指标
中心频率/MHz	100
输入信号功率/dBm	6 ± 2
输出信号功率/dBm	6 ± 2
输出信号路数	12 路
功耗/W	5.6
谐波/dBc	≤ -74
杂波/dBc	≤ -90
路间隔离度/dB	≥ 72
工作温度	$-35\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+65\text{ }^{\circ}\text{C}$
重量/kg	0.9
尺寸	160 mm \times 233.4 mm \times 24 mm

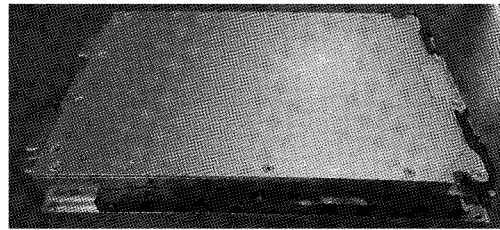


图 10 小型化星载功率分配器产品

6 结 论

针对目前星载原子钟输出高品质频率标准路数少的现状,以及针对星载产品小型化和标准化的要求,本文通过了解 ASAAC 标准体系和 BIT 系统的特点,提出了一款基于 ASAAC 标准的小型化星载高隔离功分器,并详细介绍了功率分配器内部电路设计。此外,该功率分配器通过采用 LRM 连接器,使得该模块具有可快速插拔和可替换的优点,并通过 BIT 设计提高了模块的可靠性、可测试性,有效降低了模块的测试与维修成本。最后通过 ANSYS 有限元分析软件对整个模块进行了热仿真与分析。最终对整机进行了相关试验,所有性能均符合预期指标,满足项目的应用需求。后续将在输出更多路数和更加智能方面开展研究。

参考文献

- [1] 邹喆,孟令琴,吕丹丹. 半模基片集成波导双频滤波功分器的设计[J]. 电子测量技术, 2020(11):29-33.
- [2] 祝君豪,孟令琴,任龙,等. 基于共面波导的 1/4 波长 SIR 带通滤波器[J]. 电子测量技术 2013, 36(6): 109-112.
- [3] WANG X, MA Z, XIE T, et al. Synthesis theory of ultrawideband bandpass transformer and its Wilkinson power divider application with perfect in-band reflection/isolation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2019, 67(8): 3377-3390.

- [4] KAO J C, TSAI Z M, LIN K Y, et al. A modified wilkinson power divider with isolation bandwidth improvement[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2012, 60(9):2768-2780.
- [5] ZHU C, XU J, KANG W, et al. Four-way microstrip lumped element reconfigurable dual-mode filtering power divider [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2018, 65(3): 2590-2597.
- [6] 吕高庆, 冯皓, 方建洪, 等. 宽带双节 Wilkinson 功率分配器的研制[J]. 电子测量技术, 2011, 34(2):102-106.
- [7] YADAV A N, BHATTACHARJEE R. Balanced to unbalanced power divider with arbitrary power ratio[J]. IEEE Microwave Wireless Components Letter, 2016, 26(11): 885-887.
- [8] 潘永吉. 高隔离度平面电对称六路混合功率分配器[J]. 系统工程与电子技术, 1992(11):15-21.
- [9] AHN H R, NAM S. 3-dB power dividers with equal complex termination impedances and design methods for controlling isolation circuits[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2013, 61(11): 3872-3883.
- [10] 丁全心. 综合模块化航空电子系统标准述评[J]. 电光与控制, 2013, 20(6):1-3.
- [11] 李向东, 张晓红, 戴小氏, 等. 机载嵌入式系统中多种机内自测试的软件设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(4):1310-1313.
- [12] 黄贤浪. 基于 ASAAC 标准穿通风冷模块结构设计[J]. 科技与创新, 2019(11):150-151.
- [13] IBRAHIM D. Introduction to FreeRTOS[J]. Arm-Based Microcontroller Multitasking Projects, 2021: 109-116.
- [14] REN G P, CAI X L, JIANG Q M. Design of BIT based on ASAAC standard[J]. Computer Engineering, 2012, 38(12):227-228.
- [15] 王香, 汪远银, 徐忠锦. 机载电子设备 BIT 技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(8):57-60.
- [16] 王鹏, 张日飞, 朱元武, 等. LRM 结构技术研究及应用[J]. 火力与指挥控制, 2014(S1):198-199.
- [17] 张风军, 唐骁, 陈坚, 等. 基于 Ansys 热仿真的航天光模块的热设计[J]. 光通信技术, 2018, 42(3):36-38.
- [18] 宋晓. 基于 ANSYS 混凝土箱梁水化热温度场仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(27):6760-6762.

作者简介

郭永刚, 工程师, 主要研究方向为原子频标电路、嵌入式软件设计。

E-mail:meike24@126.com

王世伟, 高级工程师, 主要研究方向为铷原子钟研究。

E-mail:wswcxq.wzh@163.com

石福成, 工程师, 主要研究方向为力设计、热设计。

E-mail:601989168@qq.com

王宽, 工程师, 主要研究方向为原子频标电路。

E-mail:he27020@163.com

王剑祥, 高级工程师, 主要研究方向为铷原子钟研究。

E-mail:gabriel_wangjx@163.com

李文新, 研究员, 主要研究方向为空间电子技术。

E-mail:lwxcast@163.com