

# 一种星载多功能可重构终端设计

范占春, 董世林, 鲁帆, 智国平, 马超, 韩运忠

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 为满足卫星多功能可重构的应用需求, 提出了一种适合于星载应用的多功能可重构终端设计方案; 可重构终端方案与常规方案相比, 采用了可重构的天线单元, 可根据任务需求进行在轨极化重构; 数字基带采用双 FPGA 设计, 可根据需求对基带功能进行在轨动态重构; 对射频系统进行了优化, 将部分天线功能集成至射频前端中; 基于以上三点设计, 可重构终端实现了极化、方向图、功率分配、调制方式等功能的在轨重构; 通过重构, 终端可支持测控、通信、电子侦察等多种应用场景; 对终端的原理样机设计、在轨重构流程进行了介绍, 并阐述了硬件实现和实际测试结果; 经实测, 极化重构后的交叉极化隔离度达 19 dB 以上; 终端可适配 8 kbps 的低速测控通信和 2 Mbps 的高速数传通信; 发射功率动态分配范围达 3 dB 以上; 实现和测试结果表明, 产品功能实现正确, 性能良好, 终端架构简单, 系统设计灵活, 可扩展性强, 具有较强的工程参考价值。

**关键词:** 在轨可重构; 多功能; 数字波束形成; 通信; FPGA

## Design of a Multifunctional Reconfigurable Terminal for Spacecraft

FAN Zhanchun, DONG Shilin, LU Fan, ZHI Guoping, MA Chao, HAN Yunzhong

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to satisfy application requirements for multifunctional reconfigurable satellites, a multifunctional reconfigurable terminal design scheme is proposed. Compared with the conventional solution, the reconfigurable terminal solution uses a reconfigurable antenna unit. Its polarization can be reconfigured on-orbit according to mission requirements; the digital baseband board adopts the dual FPGA design, and its function can be dynamically reconfigured on-orbit according to requirements; the radio frequency system is optimized, the partial function of antenna is integrated into the radio frequency front end. Based on the above designs, the reconfigurable terminal realizes the on-orbit reconstruction of functions such as antenna polarization, antenna pattern, power distribution, and communication modulation mode. Through the reconfiguration, the terminal can support multiple application scenarios such as measurement and control, data transmission, electronic reconnaissance, etc. The design of prototype and on-orbit reconfigurable process are introduced. Hardware implementation and actual test results are elaborated. The actual tests show that antenna polarization can be reconstructed and cross-polarization isolation can reach 19 dB; through the reconfiguration, the product can support 8 kbps of low rate mode or 2 Mbps of high rate. It can dynamically distribute the transmit power according to the communication rate, the dynamic allocation range up to 3 dB or more. The implementation and test results show that the product functions such as correct completion, good performance, simple terminal architecture, flexible design and strong scalability, and it has strong engineering reference value.

**Keywords:** in-orbit reconfiguration; multifunction; digital array; telecommunication; FPGA

## 0 引言

随着航天技术的发展和用户需求的更新, 对卫星的多功能多任务的要求越来越高<sup>[1-3]</sup>。为满足上述需求, 单个卫星往往配备多个天线和收发信机来实现特定功能, 这种方式系统构架复杂, 体积大, 给卫星应用带来了诸多不便。星载多功能可重构终端可以有效解决上述问题, 它可以根据任务需求对系统功能进行在轨重构, 单台设备完成多种任务。

目前, 星载可重构终端研究主要集中在星载天线的重构<sup>[4-6]</sup>。(ASYRIO, antenna system reconfiguration in orbit) 是 ESA 资助的一个研发项目<sup>[7]</sup>, 该反射面天线可以通过调整馈电网络实现对天线方向图的重构, 单个天线集成了两

个天线的功能。Astrium 公司制造了 Inmarsat-4 卫星多波束反射面天线<sup>[8]</sup>, 可以根据用户需求, 实现对通信带宽和信号功率的重构。上海微小卫星工程中心研制了一套可重构相控阵天线<sup>[9]</sup>, 通过对上注天线阵面部分关键参数的实现了天线指向的重构功能, 但系统未设计通信体制等重构功能。

本文给出了一种星载多功能可重构终端设计方案, 将天线、射频和收发信机集成设计为一个终端, 实现了天线极化、方向图、通信调制等在轨重构, 大大降低了系统复杂性并提高了系统多任务能力。

以下章节的内容为: 第 2 节介绍了星载多功能可重构终端的系统方案和设计思路; 第 3 节介绍了终端设计和实

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-17。

作者简介: 范占春(1984-), 男, 山西吕梁人, 硕士, 高级工程师, 主要从事星载相控阵天线、数字相控阵系统开发与研制工作方向的研究。

引用格式: 范占春, 董世林, 鲁帆, 等. 一种星载多功能可重构终端设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 149-154.

现情况；第 4 节对在轨重构实验验证情况进行了描述，给出实验结果。最后一节对本文内容进行了总结，并给出了一些结论。

## 1 系统方案和架构

星载多功能可重构终端基于数字相控阵架构<sup>[10-14]</sup>，但本方案与常规的数字相控阵主要有三点不同：

- 1) 设计采用了可重构天线单元，可以根据任务需求在轨进行极化重构；
- 2) 数字基带采用双 FPGA 设计，实现了数字基带在轨动态重构功能；
- 3) 对射频系统进行了优化，将部分天线功能集成至射频前端电路中。

星载多功能可重构终端系统框架如图 1 所示，整个系统由天线阵列，多通道射频收发前端和数字收发信息处理单元构成。

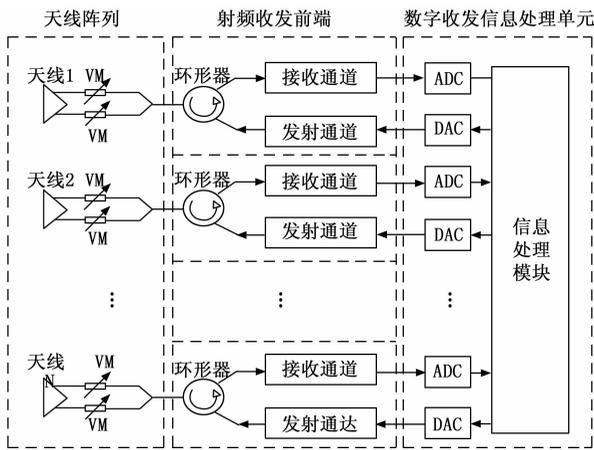


图 1 星载多功能可重构终端系统框图

天线阵列由多个收发共用的可重构天线单元构成。每个天线双点馈电，采用 VM 矢量调制器，调整两个馈电间的幅度相位，进而实现天线极化的调整。

多通道射频收发前端包括多个射频收发通道，主要实现中频信号与射频信号间的变频功能。每个通道包含 1 个收通道和 1 个发通道，通过环形器实现收发通道的隔离。

数字收发信息处理单元主要包括 AD 模块、DA 模块、信息处理模块，其中信息处理模块是多功能可重构终端的核心，通过信息处理模块的在轨重构，可实现整个终端的重构。

本文所述的数字收发信息处理单元提供两种灵活的重构模式。一种为参数重设模式，根据综合电子指令调整系统中部分关键参数，从而实现终端功能的重构。这种方式星地通信数据量小，可靠性高，但是仅能实现终端部分功能重构，终端实现天线极化、方向图重构主要采用这种方式。另一种为软件在轨重加载模式，通过综合电子向数字收发处理单元中上注新的软件，实现星载终端的功能升级。

这种方式缺点是需要大量的传输数据，对星地通信稳定性要求高，优点是可实现整个终端的功能重构。

## 2 设计与实现

为验证上述方案，本文设计研制一个多功能可重构通信终端，终端工作在 C 频段，射频带宽 50 MHz，包括 8 个天线单元和 8 个射频收发通道，数字收发信息处理单元包括 8 路 AD、8 路 DA 和 2 片 FPGA，中频工作频率 150 MHz。为优化系统设计，在实际产品实现中可重构天线单元中 VM 调制器、功分器等电控部分集成至射频前端中，通过多芯片组件技术 (MCM) 实现，这种方式可以降低设备间接口复杂程度，使得系统集成度更高。

### 2.1 天线阵面设计

为了展宽天线的工作带宽，本文的天线单元采用了辐射贴片、空气腔和馈电贴片的微带天线结构形式，空气腔使得天线的工作带宽得到了有效展宽。辐射单元介质基板选用介电常数为 2.94 的 ROGERS6002，介质厚度为 1.524 mm，馈电部分采用同轴馈电形式，上层为辐射贴片，下层为馈电贴片，中间为空气腔，使得天线的工作带宽得到了有效展宽。天线单元包含两个馈电点，馈电 1 工作时天线形成水平极化，馈电 2 工作时天线形成垂直极化。

HFSS 仿真结果表明，天线两个线极化方向图增益均优于 5 dB，8 个天线单元组阵后，天线增益优于 14 dB。图 2 为天线单元驻波实测结果，实测结果表明，天线在 3.3~3.4 GHz 带宽内，驻波优于 1.5。

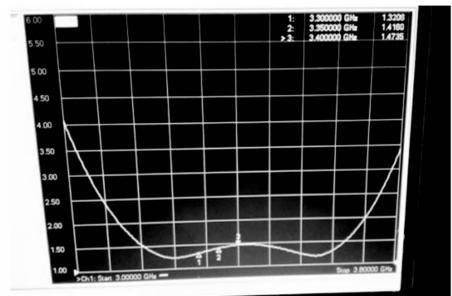


图 2 单元天线测试结果

### 2.2 多通道射频收发前端设计

射频收发模块主要包括射频收发通道和本振模块。射频收发通道包括 8 路收发通道，每个收发通道同时集成了对应天线单元的极化重构电路。

射频前端天线极化重构电路如下所示，天线极化重构前端利用 Lange 耦合桥替代了两路 VM 调制器，通过射频开关选择 Lange 耦合器的输入端，可以控制两个输出端口的幅度相位，进而控制天线工作于左旋圆极化或右旋圆极化。这种方式虽然损失了天线单元线极化重构能力，但是简化了系统设计，一方面，双圆极化重构已经可以满足大部分星载通信的需求，另一方面对于星载线极化通信，也可直接使用圆极化进行通信。

射频收发通道包括发通道和收通道,为提升产品星载适应性抗辐照能力,射频通道中绝大部分芯片均采用砷化镓工艺的芯片。其中 Rx 电路首先通过一个低噪放,压制整个接收通道的噪声并且增加系统增益;同时利用可变增益芯片,以补偿信道变化并增加中频输出的动态范围,确保了 A/D 转换器的最佳驱动。整个 Rx 电路系统增益 70 dB,噪声系数优于 2.4。

发射通道主要针对射频功率稳定性进行了优化。射频功率稳定性能主要受输入功率和环境温度的影响,因此在发射通道中采用了可变增益芯片和温补衰减器。可变增益芯片根据 DA 输出情况进行增益调整,确保末级功放输入功率稳定;温补衰减器低温时衰减量增大,高温时衰减量减小,在两级功放间串入温补衰减器,可以使通道增益维持在一个极小的范围内变化。整个发射电路系统输出功率优于 23 dBm,在  $-20\sim+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  内功率稳定度优于  $\pm 0.5\text{ dB}$ 。

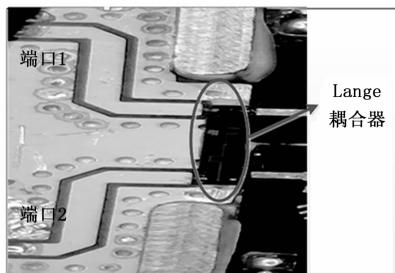


图3 天线极化重构电路

### 2.3 数字收发信息处理单元设计

数字收发信息处理单元由 8 路 AD、8 路 DA 和 2 片 FPGA 构成。

1) 中频接收电路设计: DBF 中频接收电路接收中心频率 150 MHz 的中频模拟信号,经过带通滤波、功率调整和模数转换后,输出数字信号。A/D 采用差分输入方式,利用变压器将单端信号转换为差分信号。A/D 采样时钟来源于时钟管理电路,数字输出采用 LVDS 差分信号形式,输出至处理器电路中的 FPGA。

2) 中频发射电路设计: 中频发射电路发射中心频率 150 MHz 中频模拟信号,经过数模转换、带通滤波和功率调整后,输出模拟中频信号。D/A 采用差分输出,利用变压器将差分信号转换为单端信号。D/A 转换时钟来源于时钟管理电路,数字输入采用 LVDS 差分信号形式,由处理器电路中的 FPGA 提供。

3) 时钟管理电路设计: 时钟管理电路负责各个模块所使用的时钟的产生。时钟管理模块产生的所有时钟均相参,由本地的 TCXO 产生,时钟都是由参考时钟锁相倍频产生。TCXO 提供 10 MHz 参考时钟信号。

4) 处理器电路设计: 信号处理模块的处理器电路采用 FPGA1+FPGA2 的架构,其中 FPGA1 完成与 AD、DA 通信,数字波束形成、信号调制和解调等功能,为满足功能

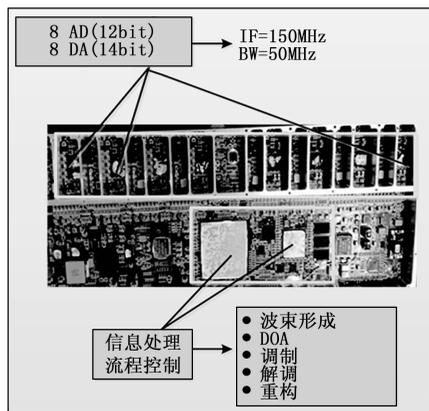


图4 数字基带实物照片

需求, FPGA1 选用了 SRAM 型的 FPGA, 具有更多的逻辑资源, 可以实现复杂的信号的处理和控制逻辑; FPGA2 主要负责对外接口通信和 FPGA2 重加载控制等功能, 选用了反绒丝型的 FPGA, 确保系统工作流程稳定。

FPGA2 连接到 FPGA1 的 SelectMap 接口上, 同时连接到数字收发信息处理模块程序存储芯片上控制 FPGA1 的加载内容。正常上电时 FPGA2 向 FPGA1 的 SelectMap 写入正常程序; 重构时, FPGA2 向 FPGA1 的 SelectMap 加载综合电子分系统上注的程序, 从而实现功能动态重构。另一方面, FPGA2 能够将存储程序中的内容和 FPGA1 中当前的配置情况进行比较, 判断二者是否发生单粒子翻转, 如果出现配置不正常的情况, FPGA2 就会自动刷新二者出现异常的配置区, 使得 FPGA2 能够监视单粒子翻转和阻塞的发生, 并自动恢复。

5) 电源管理电路设计: 电源管理电路将外部输入电源转换为电路所需的各路电源。外部输入 +5 V 电源, 电路所需电源分为模拟电源和数字电源。中频接收电路、中频发射电路和时钟管理电路使用模拟电源, 信号处理电路使用数字电源。考虑到降低功率损耗, 首先由外部输入的 +5 V 电源经过开关电源产生 +4 VA 和 +2.5 VA 两路电源, 再由 +4 VA 和 +2.5 VA 电源通过线性电源组 LDOs 产生各部分电路的电源, 中频接收电路、中频发射电路和时钟管理电路采用独立的 LDOs。

### 2.4 重构流程设计

可重构终端的重构模式有两种, 模式一为参数重构模式, 地面可通过遥控指令, 实现终端极化方式等功能的重构; 模式二为软件在轨重加载, 可通过在轨上注的方式更新基带软件, 可实现整个终端的功能重构。模式一的重构实现较成熟, 现主要介绍模式二的重构流程, 其实现流程如图 5 所示。

1) 空闲状态: 可重构终端在上电后, 如未收到地面的重构请求指令, 则保持在空闲状态。

2) 接收地面上注数据: 收到重构请求指令后, 可重构

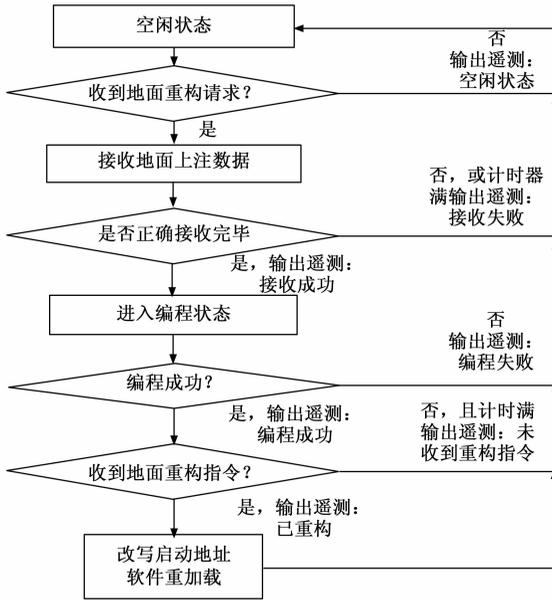


图 5 重构流程图

终端进入接收地面上注数据的状态。

3) 当上注数据未能全部正确接收, 或者等待计时器已满, 则重新进入空闲状态, 并通过下行遥测告知地面站此时终端的状态; 如果上注数据全部正确接收, 则进入编程状态, 并通过下行遥测返回终端状态。

4) 在编程状态下, 终端将新上注的程序写入重构区。

5) 如果编程失败, 则终端返回空闲状态并通过遥测反馈状态; 如果编程成功, 则通过遥测反馈状态, 并等待地面站的重构指令。

6) 如果在等待时间内未收到地面站的重构指令, 则放弃此次重构, 重新进入空闲状态, 并遥测反馈; 如果收到地面站的重构指令, 则改写软件启动地址, 进行软件重新加载, 并遥测反馈。

7) 在软件重新加载后, 终端再次进入空闲状态等待指令。

## 2.5 结构热控设计

多功能可重构终端采用了瓦片式分层架构, 以实现星载产品的低剖面。终端从上到下分为天线层、射频层、射频热控层、数字基带层、数字基带热控层和结构框架。其中天线层与射频层间的射频信号采用了 SMP 进行连接; 射频层与数字基带层中频信号采用了 SMP 穿过射频热控层进行了垂直互联。

为保证终端热设计, 射频通道中大热耗器件均通过金属过孔灌注金属浆料的方式将热量传输至射频通道底部; 射频通道底部通过导热硅脂与射频热控层向连。数字基带大热耗器件采用芯片顶部加装散热片的方式, 将热量传递至数字基带模块壳体, 数字基带模块壳体底部通过导热硅脂与数字基带热控层相连。最终将所有热量均传递至设备壳体, 统一进行热控处理。

## 3 测试结果及分析

为验证星载多功能可重构相控阵天线设计正确性, 搭建地面原理验证系统如图 6 所示。采用计算机模拟地面站和星载综合电子系统, 地面站模拟计算机安装于测试间, 星载综合电子系统模拟计算机安装于微波暗室, 通过网线相连。星载综合电子系统采用 422 接口向多功能可重构相控阵天线发出控制指令, 控制天线进行各种功能重构。为满足星载相控阵天线幅相一致性要求, 采用虚拟 REV 方法对终端进行了校正<sup>[15-17]</sup>。

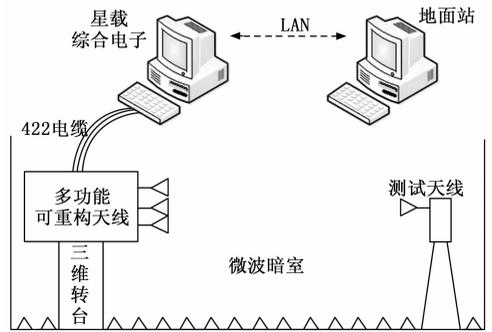


图 6 重构实验

### 3.1 极化重构验证测试

利用参数重构模式实现终端的极化重构, 并在微波暗室进行了天线方向图和极化测试。测试结果如表 1 所示。

表 1 极化重构测试结果

序号	状态	左旋电平/dBm	右旋电平/dBm
1	重构前	-18.7	-38.2
2	重构后	-39.3	-18.3

极化重构前天线工作为左旋圆极化, 极化重构后天线工作为右旋圆极化。由表 1 可知, 终端具备左右旋极化重构功能, 可以在轨实时重构。

### 3.2 方向图重构验证测试

方向图重构测试结果如图 7 所示, 由图可知, 天线初始状态为传统宽波束模式, 天线覆盖  $\pm 60^\circ$ , 增益优于 0.3 dB, 经重构后天线进入高增益状态, 天线峰值增益 13.9 dB。测试结果表明, 可重构天线可以实现天线方向图重构功能。终端工作在宽波束模式时, 可以应用于星载测控模式, 支持 8 kbps 的通信速率; 终端工作在窄波束模式时, 可以应用于话音、图像等数据传输模式, 支持 2 Mbps 的通信速率。随着可重构天线阵面的扩展, 可以支持通信速率可以更高。

### 3.3 动态功率分配重构验证测试

功率分配重构是星载通信终端的重要技术之一, 该技术根据实际的通信需求来合理的调整空间功率分布, 使得卫星运行更具有经济性。功率分配重构实验结果如图 8 所示。

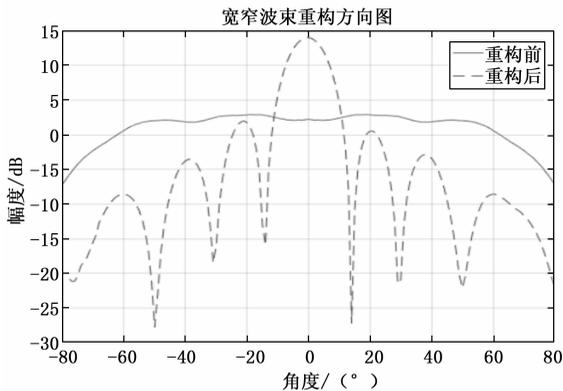


图 7 宽窄波束重构方向图

目标 1 通信区域为 +20° 方向, 目标 2 通信区域为 -60°。由图 8 可以看出重构后目标 1 区域功率下降 3.4 dB, 目标 2 区域功率上升 2.8 dB, 通信终端具备根据通信速率等需求动态分配发射功率的能力。

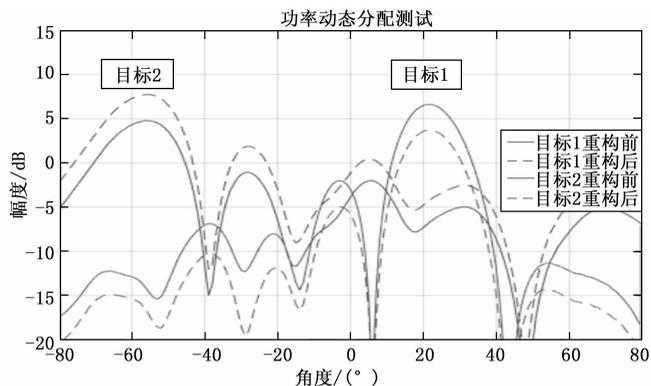


图 8 通信天线动态功率重构测试结果

### 3.4 通信体制重构验证测试

通信体制重构需对整个 FPGA1 的程序进行更新, 试验中将地面站模拟器将新程序传输至综合电子模拟器, 综合电子模拟器通过 RS422 总线向可重构终端传输新程序。

FPGA2 收到新程序后对其进行校验, 存储。程序传输结束后, FPGA2 将新程序数据加载至 FPGA1 实现程序的更新。整个更新过程中传输数据采取非常严格的校验和纠错措施, 若出错则需要数据进行重传确保新程序的正确性。为验证波形重构功能, 我们在暗室接收天线端设计了解调设备, 解调后数据波形如图 9 所示, 测试结果表明: 重构前, 终端通信体制为 BPSK, 通信速率为 8 kbps; 重构后, 终端通信体制为 QPSK, 通信速率 64 kbps。

### 3.5 系统多功能验证测试

上述分析可以看出, 终端已实现了 BPSK 和 QPSK 通信功能, 可以满足卫星测控、通信等需求, 本小节重点对终端 DOA 功能进行测试验证。DOA 可以根据接收信号计算信号来波方向, 一方面可以用来跟踪移动通信目标, 实现星间自主跟踪通信; 另一方面, 可以用于电子侦察领域,

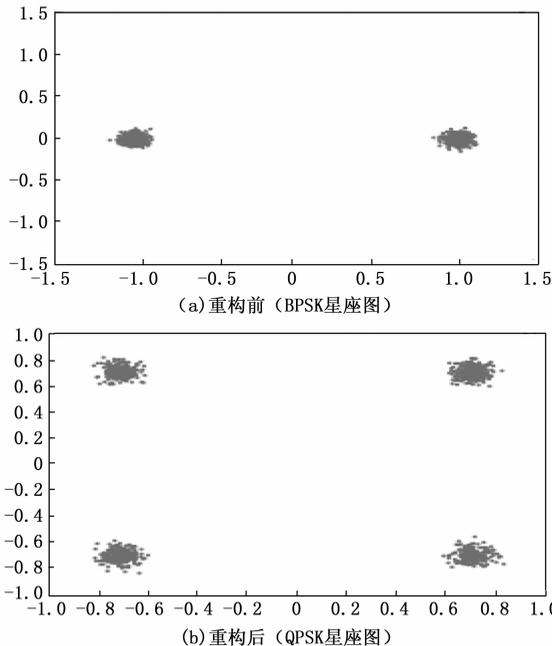


图 9 重构前后解调后数据

定位干扰目标方向。为满足星载定位的实时性, 减少卫星运动对定位精度的影响, DOA 采用了多波束比幅测向的方式<sup>[18-20]</sup>, 测向结果如图 10 所示。经过实测结果分析发现, 终端在 ±30° 范围内, 测向精度优于 0.2° (标准差), 在更大范围内, 测向精度变差, 达到了 1.2°。这是因为随着扫描角度增大, 算法中所用的理想方向图与实际方向图差别较大, 后续可以通过方向图修正的方式, 提升测向精度。

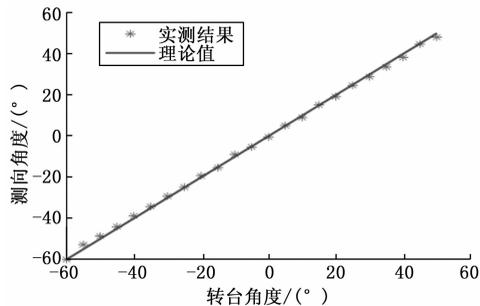


图 10 DOA 测试结果 (信号源功率 -5 dBm)

综合上述分析, 星载多功能可重构终端可以同时实现了通信和电子侦察多种功能。

## 4 结束语

本文给出了一种星载多功能可重构终端的设计方案并进行了实验验证。该终端以数字可重构天线为基础, 综合采用了数字处理器动态重构、智能优化、空间谱估计等先进技术, 设计并实现了一种星载多功能可重构终端。实现了单付天线通过重构技术兼具测控、通信、侦察 3 种天线的功能。同时, 还可实现在轨后的终端功能重构, 为星载多功能可重构终端提供了一种有效的解决方案, 具有架构

简单, 系统灵活, 可扩展性强等特点。

多功能可重构终端测控模式具备在轨宽窄波束重构能力, 能够支持卫星低速保底测控和高速应急测控两种测控需求。通信模式具备在轨动态功率重构能力, 能够支持卫星对降雨、通信业务量大等重点区域的局部动态增强功能, 针对不同应用场景配置不同天线工作模式, 可以有效提升卫星资源利用合理性和通信链路可靠性。在结构设计上, 本方案采用了瓦片式结构, 综合考虑 DBF 相控阵各模块互联和散热需求, 利用 SMP、微型接插件等小型化垂直互联方式, 设计了一种适用于 DBF 相控阵的瓦片式分层架构, 实现了星载多功能可重构天线的低剖面和高集成度设计。在系统架构设计上, 通过软硬件资源合理优化, 将侦察天线、射频通道与侦察载荷在多功能可重构终端中一体化集成, 实现了天线、射频通道、有效载荷的一体化, 为星载天线和载荷一体化设计提供了一种技术途径。

本方案在设计的基础上进行了原理样机的实现, 通过实测验证, 证明了产品设计的正确性, 后续我们将围绕可重构终端的宽带化和星载雷达应用开展下一步工作。

参考文献:

[1] 王 博, 叶 东, 孙兆伟, 等. 模块化可重构卫星在轨自重构的分层规划 [J]. 航空学报, 2019, 40 (9): 276-288.

[2] WANG C. Study of key technology for reconfigurable satellite platform supporting network interconnection [J]. Journal on Communications, 2017, 38: 1-5.

[3] 马传干. 卫星电子载荷可重构信号处理系统设计 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (14): 35-39.

[4] 南敬昌, 王加冕, 赵久阳, 等. 具有可重构特性的陷波超宽带天线设计与研究 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38 (10): 102-105.

[5] LIU W, WONG H. Wideband polarization and pattern reconfigurable antennas [J]. Chinese journal of radio science, 2018, 33: 293-300.

[6] 张若娇, 于志强, 周健义. 一种基于电调移相器的可重构天线 [J]. 微波学报, 2019, 35 (3): 7-10, 15.

[7] MARTIN, MONTESANO M. ASYRIO; antenna system recon-

figuration in orbit [J]. IEEETrans on Antennas and Propagation, 1995, 37 (3): 7-14.

[8] STRILAND. Mobile antenna developments in EADS Astrium [C] //Proceedings of the European Conference on Antennas and Propagation, 2006: 5-7.

[9] LIANG G. Design of reconfigurable multi-beam phased array antenna on satellite [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25: 184-188.

[10] MIR H S, ALBSHA L. A low-cost high-performance digital radar test bed [J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 2013: 221-229.

[11] QIAN L, WANG X G. A new wideband digital array radar (WB-DAR) experiment system [C] //IEEE Region 10 Symposium, 2014: 440-445.

[12] RAO D G. Digital beam former architecture for sixteen elements planar phased array radar [C] //International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering, 2013: 532-537.

[13] 韩国栋, 齐宏业, 高 冲, 等. 一种宽带多模式卫星通信相控阵天线 [P]. 河北: CN109037970A, 2018-12-18.

[14] 高卫斌, 党锐锐, 杨李杰. 基于图着色理论的阵列天线校正方法 [J]. 遥测遥控, 2019, 40 (3): 1-10.

[15] ZHAN C F. Design and experimental verification of the digital array calibration [C] //2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology, 2018: 26-29.

[16] 高卫斌, 党锐锐, 杨李杰. 基于图着色理论的阵列天线校正方法 [J]. 遥测遥控, 2019, 40 (3): 1-10.

[17] 谭焯州, 周昌杰, 王茂泽. 平面近场反演技术 [J]. 电子信息对抗技术, 2019, 34 (3): 61-64.

[18] PELLETIER M. Angle-of-arrival estimation for a rotating digital beamforming radar [C] //2013 IEEE Radar Conference, 2013: 1-6.

[19] 陈 旭, 糜坤年. 多波束比幅测向系统测向误差分析 [J]. 舰船电子对抗, 2019, 42 (2): 35-38.

[20] 何山红, 解良玉, 纪茜茜, 等. FAST 宽带双极化多波束馈源设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41 (7): 1474-1481.

(上接第 133 页)

[23] 刘培坤, 杨广坤, 杨兴华, 等. 具有溢流帽结构的旋流器流场特征及分离性能研究 [J]. 流体机械, 2021, 49 (1): 1-6.

[24] 常晓巍, 李永业, 李锦涛, 等. 基于 2 D-2 C PIV 的旋流器内部流场测量方法及优化设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2020 (3): 17-20.

[25] 夏宏泽, 赵立新, 郑国兴, 等. 含聚合物工况下旋流器分离特性的 CFD-PBM 数值模拟 [J]. 化工机械, 2020, 47 (6): 765-772.

[26] 丁发军, 刘义平, 闫 锋, 等. 正交验证和流场仿真的变截面直流孔旋流器 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (22):

9620-9627.

[27] 周嘉钰, 鄢曙光. 具有中心插入物结构水力旋流器流场特性及分离性能研究 [J]. 矿产综合利用, 2020 (1): 199-202.

[28] 马佳伟, 崔广文. 三锥角水介旋流器锥体结构优化及数值模拟 [J]. 煤炭工程, 2020, 52 (9): 147-151.

[29] 丛龙斐, 王霄鹏, 周长春, 等. 双涡耦合一导向平底旋流器在锡矿分选中的应用 [J]. 矿产综合利用, 2020 (2): 177-181.

[30] 包 娜, 赵立新, 张津铭, 等. 内锥式水力旋流器分离性能的数值模拟分析 [J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49 (7): 64-69.