

高精度微波引导设备角度数据检测 系统设计与实现

谢洪森¹, 王鼎¹, 刘云飞¹, 张建明²

(1. 海军航空大学 青岛校区, 山东 青岛 266041;

2. 中国电子科技集团公司 第二十研究所, 西安 710068)

摘要: 针对当前某高精度微波引导设备的角度制导性能精准检测难度大的问题, 基于 ARM+DSP+FPGA 的总体架构, 研究并搭建了高精度角度数据检测系统的硬件电路结构, 基于 C/C++、VHDL 和 Verilog 开发了角度数据测试软硬件程序, 实现了对微波引导设备空间角度、数据信号的接收、处理、解算和测量; 并进行试验验证, 结果表明该系统实现了设计功能、达到了指标要求, 对高精度微波引导设备角度测量方位角优于 0.16° , 仰角优于 0.18° , 数据字与设备预置信息一致, 满足高精度角度、数据的检测要求, 对有效提高该微波引导设备的可靠性具有重要意义。

关键词: 微波引导设备; 方位角; 仰角; 信号处理

Design and Implementation of Angle Data Detection System for High Precision Microwave Guidance Equipment

XIE Hongsen¹, WANG Ding¹, Liu Yunfei², Zhang Jianming²

(1. Qingdao Campus, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China;

2. The 20th Research Institute of CETC, Xi'an 710068, China)

Abstract: In order to solve the problem, it is difficult to accurately detect the angle guidance performance of a high-precision microwave guidance equipment. Based on the ARM+DSP+FPGA overall architecture, the hardware circuit structure of the high-precision angle data detection system is studied and built. Based on C/C++, VHDL and Verilog language, the software and hardware programs of angle data testing are developed under different operating environments. The receiving, processing, calculating and measuring of the spatial angle data signal transmitted by the microwave guidance equipment are realized. The results show that the system meets the design function and index requirements, and the azimuth angle precision of microwave guidance equipment is better than 0.16° , and the elevation angle precision is better than 0.18° . The data status is consistent with the preset information of the equipment, which meets the requirements of high-precision angle data detection, and is of great significance to effectively improve the reliability of the microwave guidance equipment.

Keywords: microwave guidance equipment; azimuth; elevation; signal processing

收稿日期: 2021-05-23; 修回日期: 2021-08-10。

作者简介: 谢洪森(1966-), 男, 山东龙口人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事航空无线电导航理论与技术应用、航空通信导航信息检测、获取与处理方向的研究。

通讯作者: 王鼎(1988-), 男, 山东泰安人, 硕士, 讲师, 主要从事航空无线电通信与导航方向的研究。

引用格式: 谢洪森, 王鼎, 刘云飞, 等. 高精度微波引导设备角度数据检测系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(2): 11-16, 50.

0 引言

微波引导设备主要是用于机场或移动平台实施全天候引导飞机安全起降重要的精密导航设备^[1]。设备主要为飞机提供方位、仰角及距离引导信息，机载设备通过接收、处理和数据解算地面台站发射的角度（方位和仰角）引导信息，直观显示出飞机实时偏离规定的下滑航道画面，飞行员操纵飞机按照正确下滑道降落^[2]。当前，保障特种飞机起降的高精度微波引导设备通常安装在固定机场或海上移动平台，安装位置、环境条件以及周边电磁干扰等多种因素会影响设备技术性能，对飞行安全造成严重影响制约，对设备发射的角度数据信息定期检测是非常必要的。国内早期研发的微波引导设备专用测角检测设备，采用的技术相对落后，体积重量大，角度测量精度低（精度劣于 0.50° ），无法满足特种飞机对高精度微波引导设备的角度数据检测需求^[3]。

高精度微波引导设备角度数据检测系统主要基于 ARM+DSP+FPGA 的硬件架构设计，综合运用了高精度角度测量、嵌入式微处理器显示控制、costas 数字锁相环载波跟踪与恢复等技术方法^[4]，设计实现了数字信号处理、模块控制和基于 ARM_Linux 的显示控制功能；软件设计主要基于 C/C++ 语言编程、VHDL 或 Verilog 硬件描述语言方式，在不同要求的运行环境下进行开发测试，实现了显示控制、信号处理、数据解算等软件设计功能^[6]。通过综合调试实验以及与实装设备对接测试，试验结果表明，检测系统可以实现对高精度微波引导设备角度数据信息的检测要求，为保障特种飞机飞行起降安全发挥重要作用。

1 系统结构

系统设计主要包括主机、射频馈线以及喇叭口接收天线，其中主机由 C 波段接收模块、信号处理模块、显控组件、电源模块、电池组成，系统基本构成如图 1 所示。

喇叭口天线^[7]接收 C 波段微波引导信号，通过二次变频输出两路信号，一路为对数视频，用于幅度解调，与数据通道配合，完成角度数据等参数测量；另一路为 70 MHz 中频信号，用于数据信号的解调。信号处理模块输出 30 MHz 的微波引导中频信号，经 C 波段接收模块完成检测系统自检；输出波道和衰减控制信号对 C 波段接收模块的接收通道实施有效选

取与控制。显控组件采用防护玻璃表面镀高透低反膜（AR）的 LCD 液晶显示器对接收机测试数据进行显示。供电方式采取交流 220 V / 50 Hz 或电池或外接直流电供电。系统主机对外接口设计了天线 RF 输入接口完成喇叭口天线接收微波引导空间信号；同步输出接口完成角度同步和数据同步信号输出^[8]；对数视频输出接口用于输入信号监测；USB 口完成外接鼠标及测试数据的导出；LAN 口完成对检测系统的在线调试；电源接口用于 220 VAC 交流电源和直流电的输入。

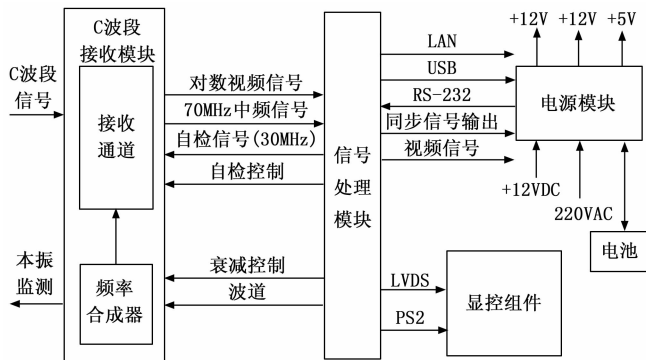


图 1 角度数据检测系统主机组成框图

2 系统硬件设计

系统硬件电路设计主要包括信号处理模块、C 波段接收模块、显示控制组件、系统电源与天线共 5 部分。

2.1 信号处理模块

信号处理模块基于 ARM+DSP+FPGA 的架构设计^[9]，实现角度数据数字信号处理、模块控制和基于 ARM_Linux 显示控制功能，提供 LVDS、PS2、USB、网口、RS232 等对外接口，电路设计为 ADC、DAC、FPGA、DSP、ARM、电源、时钟 7 个工作单元，其组成如图 2 所示。模块主要完成视频信号和中频信号采样、输出中频自检信号、为外电路提供控制信号、输出同步信号和 LVTTTL 电平标准、具备 LAN 口、RS-232 接口与上位机通信等功能^[10]。

模数转换器 AD9625 将输入的 70 MHz 中频信号转换为数字信号，并传送到 FPGA 单元进行处理^[11]。数模转换器 AD9779 将 FPGA 输出的数字基带信号转换为模拟中频信号，并通过放大器放大到 0 dBm 输出，输出设计采用一个 1:1 的巴伦来完成。FPGA 选用 XC7K325T-2FFG900I，采用 Master SPI

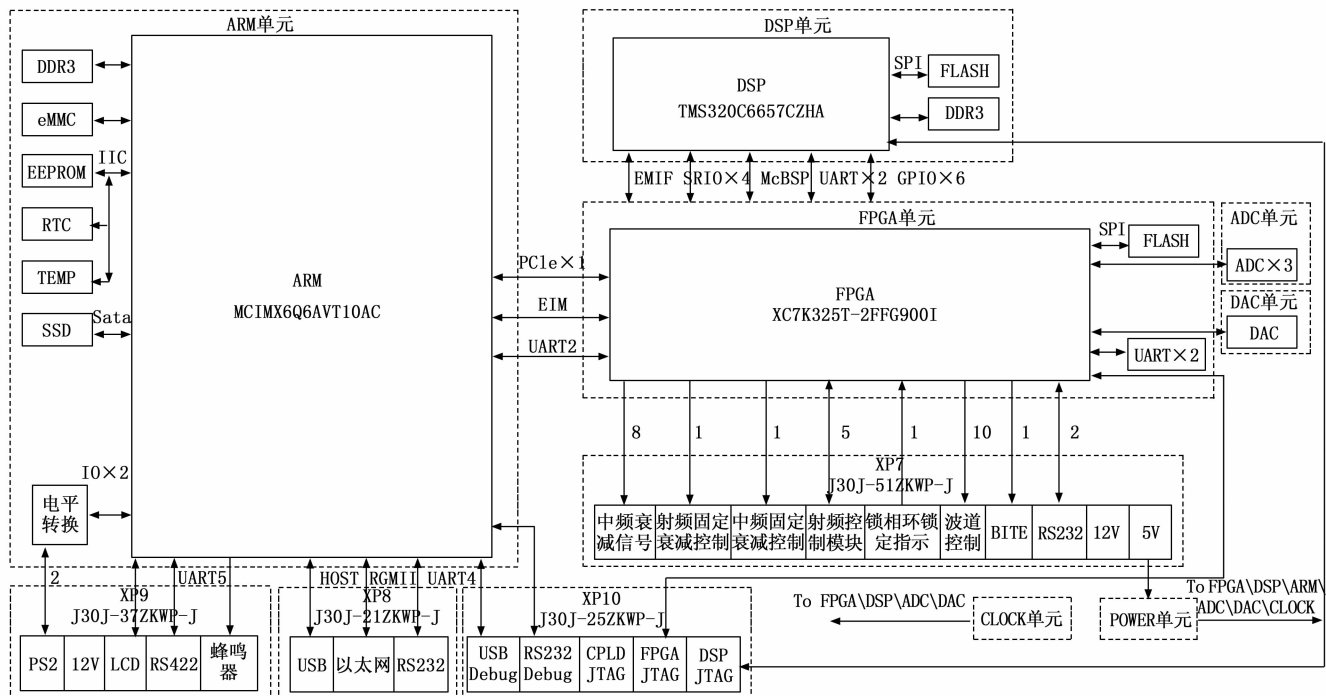


图 2 信号处理模块总体框图

配置模式, $M[2:0] = 001$, 按照 x4 总线宽度进行设计, 产生控制逻辑, 发送基带信号, 接收预处理中频信号、视频信号。同步信号由 FPGA 产生, 经驱动器隔离后输出, 电平标准为 LVTTTL3.3 V。

DSP 为信号处理算法主体, 选用定浮点 DSP TMS320C6657, 对 FPGA 预处理的数据进行分析、计算^[12]。DSP 上电后至输入时钟及 PLL 稳定, 释放复位管脚, DSP 在复位管脚的上升沿时采集模式管脚 BOOTMODE [2: 0] 的状态, 采用 SPI BOOT 模式, 当 DSP 采样 BOOTMODE [2: 0] = 110 时, 读取外部 SPI FLASH 的数据进行加载启动, DSP 时钟设计为 1 000 MHz。

ARM 选用 NXP 的 iMX6Q MCIMX6Q6AVT10AC, 主要与机箱上的键盘、显示屏等协作, 实现人机交互界面。外围包含 DDR3、EMMC、RTC、温度传感器、SSD、USB、以太网、RS232、RS422 等。设计采用 8bit EMMC Boot, 启动的 SD 接口为 SD4。时钟为典型频率为 24 MHz 和 32.768 kHz。

电源单元主要是将外部输入的 +5V 电源转换为各个芯片的工作电压以及电源的上电时序控制。系统

2.2 显示控制组件

显控组件由接口信号处理模块、7 英寸液晶屏显示模组、按键导光板模块、面板组件等部分组成。

整体上电时序: 单板上电后, ARM 先启动, ARM 启动后控制 FPGA 和 DSP 启动, FPGA 和 DSP 按照各自的上电时序启动。

2.3 C 波段接收模块

C 波段接收模块主要由接收通道、控制单元、本振 1、本振 2、自检模块、电源单元等组成^[13], 主要功能是通过二次变频输出两路信号, 一路对数视频, 一路 70 MHz 中频信号, 组成如图 3 所示。

接收通道接收输入 C 波段微波引导角度数据信号, 经滤波、限幅放大后进行混频, 输出 510 MHz 的第一中频信号, 第一中频信号通过滤波放大后进行二次混频, 产生 70 MHz 的第二中频信号^[14]。控制单元接收外部的 1 路 SPI 通信和波道、自检、衰减等控制码, 完成对各个单元的控制, 并向外部反馈本振 1 的频率锁定指示信息^[15]。本振 1 生成一本振信号配合接收通道实现变频和 BITE 设计, 并反馈至外部; 本振 2 模块输出 580 MHz 点频, 配合接收通道实现变频; 外部参考输入自检模块后, 生成自检信号输入到接收通道中; 电源单元为其他单元提供指定电压的直流电源。

整体结构采用了模块化、内嵌功能按键、背光驱动集成设计, 具备上、下、左、右共 4 个方面可视角度达到 85°宽视角显示功能, 支持网络接口、RS232

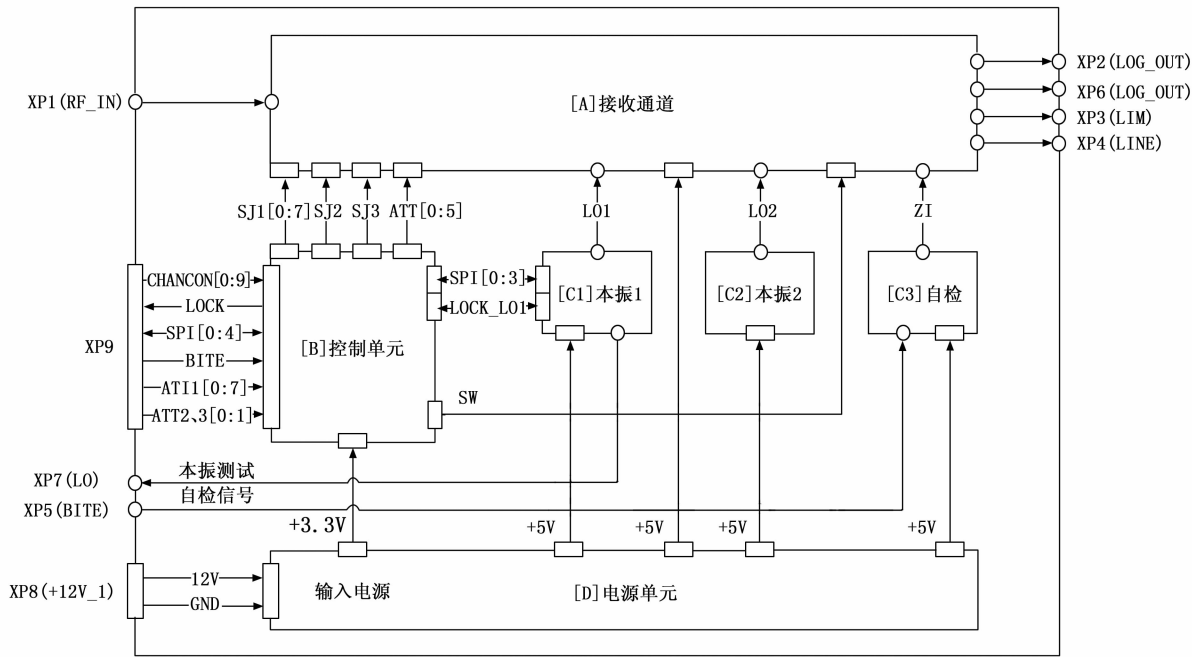


图 3 C 波段接收模块组成框图

接口、USB、视频信号输出及宽电压输入等，支持 26 个用户定义按键和不同种类外设需求；提供人机交互接口，通过串口实现与主板通信；接口信号处理板接收上位机输出的 LVDS 信号，经解码器解码成 TTL 电平，编码器编码为 VGA 信号，视频处理芯片采集 VGA 信号，通过 LVDS 视频信号送显示屏进行显示^[16]。

2.3 系统电源

系统电源采用交流和直流两种供电方式，供电优先等级为：AC 供电 > 外部直流供电 > 锂电池供电，单相 AC220 V/50 Hz 电压通过 AC/DC 变换后给锂电池单元内的 +14.4 V 锂离子蓄电池组充电，后经 DC/DC 变换后，输出稳定的 +5 V、+12 V 直流电压给系统供电。系统电源设计具备交流输入过欠压、过温以及输出短路保护等功能。

2.5 天线

角度数据测量接收天线设计采用喇叭口型天线，频率范围为 5.0~5.1 GHz，增益 ≥ 8 dB，阻抗 50 Ω，垂直极化方式，驻波 ≤ 2.0。

3 系统软件设计

软件设计主要由显示控制软件、信号处理软件两大部分构成^[17]。显示与控制软件运行平台为 ARM 处理，采用 C/C++ 语言进行编程，基于 Qt 环境下

进行开发调试；DSP 软件采用 C 语言和汇编语言相结合的方式编程，在 CCS 环境下调试；FPGA 信号处理软件采用 VHDL 或 Verilog 语言开发，在 ISE 环境下调试。

3.1 显示控制软件

显示控制软件主要实现界面参数的设置及测试数据的显示、键盘信号接收与处理、测试数据存储和读取^[18]，显控界面的设计如图 4 所示。

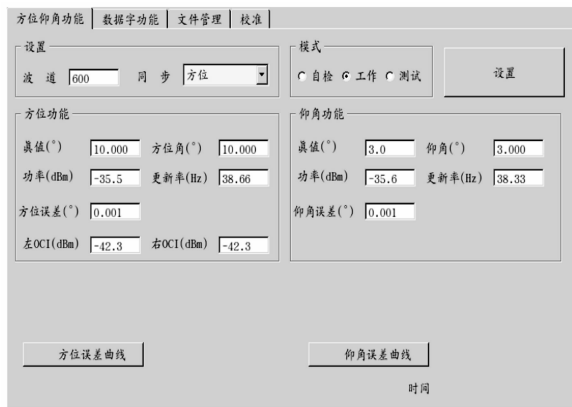


图 4 角度数据测试功能显示界面

方位仰角功能主要通过输入方位、仰角真值，实现实时测量显示微波引导扫描信号功率和更新率，点击方位、仰角误差图形按钮，可显示实时的方位、仰角误差曲线，设计流程如图 5 所示。

数据字功能是通过键盘实现基本数据字及辅助数

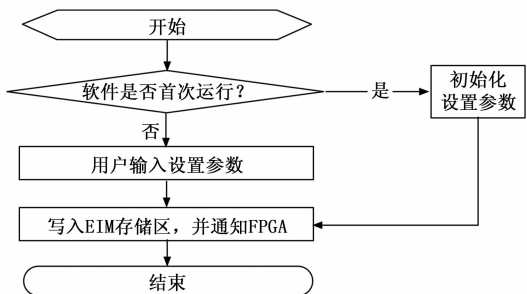


图 5 方位仰角功能流程图

据字测试内容的循环切换, 支持基本数据字 1~6、辅助数据字 A1~A3、B40~B45 等^[19]。对定义的数据字, 可解析出相应的数据字内容, 测量出信号功率及更新率; 对于未定义的辅助数据字, 在“备用辅助数据字”中进行解调、显示, 软件设计流程如图 6 所示。

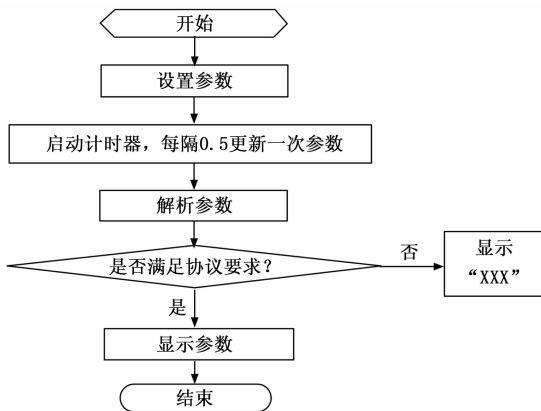


图 6 数据字功能流程图

文件管理功能主要完成对测试数据文件进行管理,

测试数据需存储时, 通过设置存储时间长度, 对方位、仰角数据进行存储, 存储的数据可在测试接收中进行回放。支持用户选择存储时间: 1 分钟、2 分钟、5 分钟和 10 分钟, 数据存储自动生成以当前时间为文件名的 CSV 格式文件。校准功能主要完成扫描信号、数据信号功率的校准补偿, 各补偿值能够存储在设备中。

3.2 信号处理软件

信号处理软件功能包括数据解调、幅度及角度解调两部分^[20]。射频前端输出的 70 MHz 限幅中频信号, 经 40 MHz 的带通采样转换为数字中频信

号, 经带宽为 120 kHz 的带通滤波器滤出 10 MHz 信号, 由数字下变频输出 800 kHz 信号, 为减轻信号处理压力进行 4 倍抽取, 将信号数据率降为 10 MHz, 设计中采用数字 costas 锁相环技术实现载波恢复与跟踪, 完成数据基带信号的解算。为提高系统的测试精度, 设计中采用相干解调方式实现 DPSK 信号的解调。相干解调后的信号是绝对码, 通过软件设计实现绝对码—相对码的变换。若绝对码记为 b_k , 相对码记为 a_k , 则绝对码—相对码之间的关系为: $a_k = b_k \oplus b_{k-1}$ 。解调出的数据基带信号, 通过相关运算, 数据信息解差分, 获得功能码、基本数据字和辅助数据字的相关信息。接收前端输出的微波引导信息包络信号, 经 A/D 采样及 26 kHz 带通滤波, 与数据解调配合, 解调出仰角、方位、扫描功率信息, 从而实现幅度及角度解调。容的识别、信息校验、显示输出等工作, 其流程如图 7 所示。

4 实验结果与分析

角度数据检测系统研发完成后, 利用某部机场微波引导设备进行了检测试验与数据测试验证。按照相关标准规定及系统测试要求, 喇叭口接收天线架选择距离高精度微波引导设备 400 m、方位天线相位中心 $\pm 20^\circ$ 覆盖区域内, 架设高度在 4.5~30 m 之间可调整, 预先确定了典型角度信号接收测试点作为标定值, 应用光学全站仪精确测量测试点的微波引导设备方位和仰角天线相位中心方位角和仰角数据, 作为方位、仰角以及数据信息的标定值。

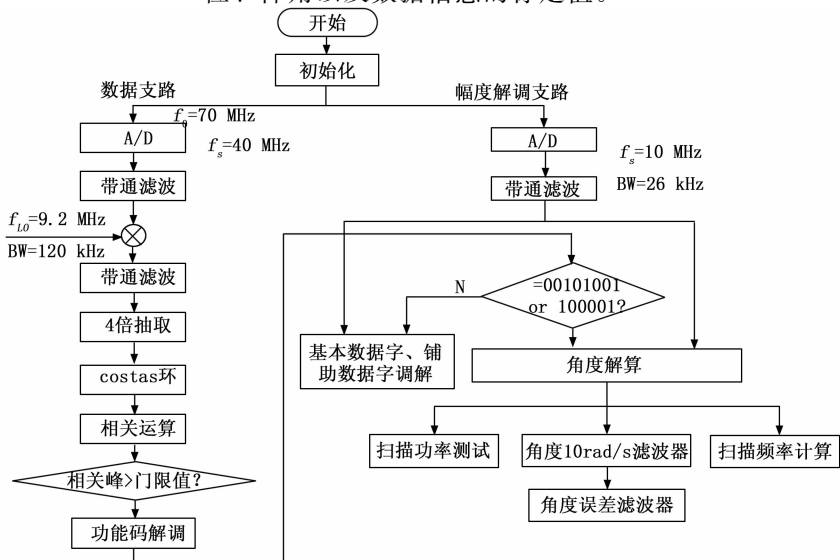


图 7 信号处理流程图

按照检测系统界面操作与检测使用程序方法步骤，将系统喇叭口接收天线、射频测试电缆与系统主机正确连接，选取与微波引导设备测角功能设备相同的 500、600、699 三个典型波道，在角功能界面设置波道、方位角真值、仰角真值，对微波引导测角设备发射的方位角、仰角及数据信号信息进行现地测试，并将测试的方位角、仰角数据与标定数据进行比对。

测试结果如表 1、表 2 和表 3 所示。实测结果表明：方位角测试精度不劣于 $\pm 0.16^\circ$ ，仰角测试精度不劣于 $\pm 0.18^\circ$ ，测试结果满足角度检测系统的技术指标要求；测试的数据信号与微波引导测角设备发射的数据信息一致，验证了检测系统功能、性能的有效性和准确性。

表 1 检测系统方位角实测数据记录表

| 测试点 | 标定值 | 波道 | 测试值/(°) | 误差/(°) | |
|-----|------|-----|---------|------------------------------|--------|
| | | | | 技术要求 | 结果 |
| 1 | -10° | 500 | -10.111 | $\leq 0.16^\circ$ (95%概率) | 0.111 |
| | | 600 | -9.888 | | -0.112 |
| | | 699 | -10.095 | | -0.095 |
| 2 | -5° | 500 | -5.093 | | 0.093 |
| | | 600 | -5.118 | | 0.118 |
| | | 699 | -4.892 | | -0.108 |
| 3 | -2° | 500 | -2.013 | | -0.032 |
| | | 600 | -1.913 | | -0.077 |
| | | 699 | -2.091 | | -0.091 |
| 4 | -1° | 500 | -1.032 | 0.032 | |
| | | 600 | -1.022 | 0.022 | |
| | | 699 | -0.069 | -0.031 | |
| 5 | 0° | 500 | -0.063 | -0.063 | |
| | | 600 | -0.045 | -0.045 | |
| | | 699 | -0.016 | -0.016 | |
| 6 | 1° | 500 | 0.959 | -0.041 | |
| | | 600 | 1.018 | 0.018 | |
| | | 699 | 0.945 | -0.055 | |
| 7 | 2° | 500 | 2.037 | 0.037 | |
| | | 600 | 2.020 | 0.020 | |
| | | 699 | 1.985 | -0.015 | |
| 8 | 5° | 500 | 5.083 | 0.083 | |
| | | 600 | 5.134 | 0.134 | |
| | | 699 | 4.828 | -0.112 | |
| 9 | 10° | 500 | 9.883 | -0.117 | |
| | | 600 | 10.154 | 0.154 | |
| | | 699 | 9.878 | -0.122 | |

表 2 检测系统仰角实测数据记录表

| 测试点 | 标定值 | 波道 | 测试值/(°) | 误差/(°) | |
|-----|-----|-----|---------|------------------------------|--------|
| | | | | 技术要求 | 结果 |
| 1 | -1° | 500 | -0.011 | $\leq 0.18^\circ$ (95%概率) | 0.011 |
| | | 600 | -0.983 | | -0.017 |
| | | 699 | -1.035 | | 0.035 |
| 2 | 2° | 500 | -1.983 | | -0.017 |
| | | 600 | -2.018 | | 0.018 |
| | | 699 | -2.103 | | 0.103 |
| 3 | 3° | 500 | -3.113 | | 0.113 |
| | | 600 | -3.143 | | 0.143 |
| | | 699 | -2.891 | | -0.109 |
| 4 | 4° | 500 | -4.162 | 0.162 | |
| | | 600 | -3.859 | -0.141 | |
| | | 699 | 4.165 | 0.165 | |

表 3 检测系统数据字实测记录表

| 序号 | 数据字 | 测试结果 | | |
|----|------|-------|------------|------------|
| | | 十六进制 | 解析 | |
| 1 | 数据 1 | 02B58 | 方位跑道入口距离 | 0 |
| | | | 方位比例覆盖区负极限 | 42° |
| | | | 方位比例覆盖区负极限 | 42° |
| | | | 余隙信号类型 | 扫描 |
| 2 | 数据 2 | 10C01 | 最低下滑角 | 2.8° |
| | | | 反方位状态 | 测试 |
| | | | DME 状态 | FA 模式，标准 2 |
| | | | 方位状态 | 测试 |
| 3 | 数据 3 | C8000 | 仰角状态 | 测试 |
| | | | 方位波束宽度 | 2.0° |
| | | | 仰角波束宽度 | 1.5° |
| 4 | 数据 6 | 1A072 | DME 距离 | 0 |
| | | | 识别码 | XAN |

5 结束语

高精度微波引导设备角度数据检测系统采用最新数字化、模块化、小型化技术设计，实现对高精度微波引导设备发射的空间信号的接收、处理、解算、测量，准确判断微波引导设备的主要功能和技术性能。检测系统在实装环境下现场对接实验与数据测试，实验结果表明：系统方位角测量精度不劣于 $\pm 0.16^\circ$ ，仰角精度不劣于 $\pm 0.18^\circ$ ，满足了系统角度数据指标测量要求，验证了系统测试的数据信号与微波引导测角设备发射数据基本信息的一致性，有效提升高精度

(下转第 50 页)