

有源相控阵天线测试通用平台设计与实现

乔淑君, 李晓峰

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 有源相控阵天线在完成装配之后要进行功能和性能测试, 整个过程繁琐、复杂, 并且不同架构的天线有不同的测试方法, 现阶段天线测试系统多属于定制化研制; 针对不同架构天线, 提出通用化、标准化的测试硬件和构件化、模块化的软件平台, 并基于某型雷达天线做了应用验证; 结果表明天线测试通用平台相比于传统测试平台, 测试精度基本一致, 系统集成速度提升 69%, 软件复用率提升 50%, 开发人员能够快速、准确集成天线测试系统, 使用人员能够使用标准天线测试流程提升测试效率, 对有源相控阵雷达的研制具有重要意义。

关键词: 有源相控阵; 天线测试; 通用; 硬件平台; 软件平台

Design and Realization of General Test Platform for Phased Array Antenna

QIAO Shujun, LI Xiaofeng

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Active phased array antennas must undergo function and performance test after assembly. The whole process is tedious and complicated, and antennas of different architectures have different test methods. Nowadays, antenna testing systems are mostly customized developments. The generalized and standardized test hardware equipment and componentized and modularized software platform are proposed for antennas of different architectures, which are applied and verified based on a certain type of radar antenna. The results show that compared with the traditional test platform, the test accuracy of the general antenna test platform is basically the same, the system integration speed is increased by 69%, and the software reuse rate is increased by 50%. The general antenna test platform is of great significance for developers to quickly and accurately integrate the antenna test system, the standard antenna test procedures are used to improve test efficiency for the development of active phased array radars.

Keywords: active phased array; antenna test; general; hardware platform; software platform

0 引言

有源相控阵雷达是采用有源相控阵天线的雷达, 特点是天线无需转动, 通过多个天线单元的幅度、相位调整, 实现天线波束快速扫描和形状捷变。有源相控阵雷达架构包括模拟有源、子阵级数字化、单元级数字化^[1]。模拟有源相控阵天线单元通道中设置发射/接收组件 (T/R 组件), 将发射机、接收机、移相器和衰减器等有源部件集成在一起^[2]。随着电子技术的高速发展, 相控阵天线开始数字化趋势, 不再含有移相器, 将接收机前移, 出现数字波束形成技术, 具有更大的动态范围、同时多波束、较低副瓣和损耗、高抗扰能力等优点^[3]。单元级数字化是在天线阵元级实现数字波束形成, 子阵级数字化是将有源相控阵分为几个子阵, 按子阵进行数字化波束形成^[4-5]。

子阵数字化相控阵工作原理可以体现模拟阵和数字阵的工作原理, 每个子阵内的天线单元是模拟阵元, 与传统的模拟阵一样, 配有模拟移相器, 通过改变相位实现波束合成。这种技术成熟稳定, 并且采用模拟延迟线对信号在时间上产生延时, 解决孔径效应, 可以实现真正宽带信号的发射和接收, 用于雷达一维距离成像、雷达跟踪模式

等^[6]。每个子阵合成的模拟波束在子阵级数字接收机进行 AD 采样转换为数字信号, 多个子阵的数字信号形成自适应的数字波束^[7], 实现灵活的窄带搜索。该架构是数字和模拟的混合模式, 兼具模拟阵宽带、成本低, 以及数字阵自适应、多波束、低副瓣等优点。

子阵数字化相控阵接收波束合成原理是子阵内每个阵元接收信号后经过 T/R 组件幅度相位加权后合成模拟波束, 模拟波束在阵面级再经过馈电网络进行二级或者三级的和波束、方位差波束、俯仰差波束 (简称和差波束) 合成, 模拟接收波束有窄带和宽带, 根据不同功能选择不同模式。数字接收波束合成是子阵合成模拟波束后经过数字接收机转化为数字输出, 阵面的波束方向图是数字波束形成, 每个子阵波束方向图乘以加权系数合成自适应波束, 多组权向量还可以实现同时多波束。子阵数字化相控阵发射波束合成原理类似模拟相控阵, 经过多级功分和放大, 在天线单元辐射出去。

有源相控阵天线在完成装配之后要进行功能测试、性能的评估和验证, 这里天线包括天线罩、天线阵列、结构骨架和高频箱 (包含 T/R 组件、综合网络、阵面电源

收稿日期: 2022-01-19; 修回日期: 2022-03-09。

作者简介: 乔淑君 (1991-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事天线微波测试技术及测试系统方向的研究。

引用格式: 乔淑君, 李晓峰. 有源相控阵天线测试通用平台设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 20-25, 34.

等)^[8]。整个天线测试验证过程繁琐、复杂, 并且根据不同架构的天线有不同的测试方法, 模拟相控阵天线测试核心是依靠矢量网络分析仪(简称矢网), 实现收、发同频频信号的测试; 单元数字化相控阵天线由于发射激励源是自身直接数字频率合成(DDS), 接收信号是经过中频 A/D 采样的数字信号, 需要搭建测试设备实现同步相参和数字信号接收^[9]; 子阵数字化相控阵天线可以当成模拟和数字天线的混合模式, 要分别进行模拟部分和数字部分的测试。

现阶段很多学者研究了有源相控阵天线测试方法和测试系统^[10-13], 本文主要是针对不同架构天线, 提出一种通用化、标准化的天线测试平台: 硬件平台研制通用设备满足不同雷达电接口; 软件平台设计标准测试流程形成构件适配不同测试功能。

通用平台主要包括测试计算机、多功能控制模块、综合频率源、阵面数据分析仪、矢网、电源单元、网络接收机以及功率放大器、低噪声放大器、射频电缆等其他测试附件。图 1 简单示意了子阵数字化天线接收测试状态, 模拟接收测试由矢网一个端口做源经过探头辐射信号给天线阵面, 接收信号送至矢网另一个端口。数字接收测试由综合频率源提供时钟和本振, 下行数据送至阵面数据分析仪。测试计算机上运行的测试软件读取矢网数据和阵面数据分析仪数据, 进行数据分析、显示和存储。

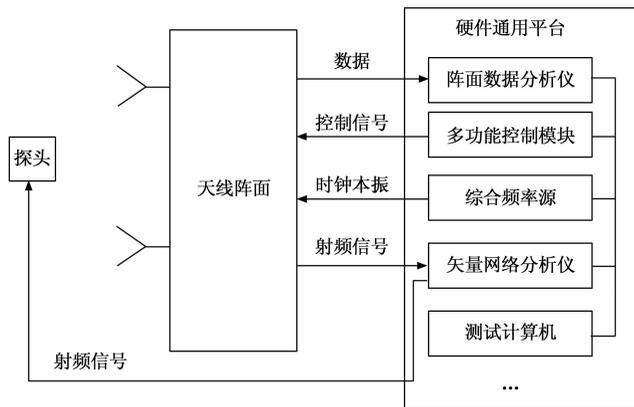


图 1 天线接收测试示意图

1 关键硬件模块设计

1.1 多功能控制模块

在天线测试通用平台中, 我们把天线作为单独的被测件, 提供多功能控制模块。该模块是天线测试平台的“大脑”, 其功能类似于雷达中的阵面控制分系统, 实现天线控制信号、定时信号的仿真。雷达控制系统是针对当前雷达定制研发的控制模块, 电信号是常用的控制信号, 通常是时钟、数据、定时脉冲等多路差分信号, 能够产生控制时序和电平或者脉冲定时信号。现阶段随着光纤技术的飞速发展, 越来越多的雷达利用光纤产生控制定时信号, 能够提升传送速率和准确率。不论是电信号还是光信号, 为提升软件稳定性, 雷达研制都是定制化设计雷达控制系统,

匹配当前雷达。

而针对不同雷达的控制需求, 多功能控制模块设计时充分考虑天线测试通用平台通用化需求, 硬件接口设计时确保该模块可以通过电连接器输出电信号, 也可以通过光纤接口输出光定时信号。多功能控制模块(图 2)内部连接一组可以存储 512 M 字节的存储器, 存储多路定时、控制波形数据, 根据要求在电接口输出特定 IO(输入/输出)时序或者在光接口输出控制指令定时数据。IO 接口包括 96 路静态 IO 和 64 路动态时序 IO, 满足不同需求。光定时接口满足 12 路收发, 速率最高为 8 GB, 向下兼容多种速率。软件接口设计时, 在 FPGA 编程中加入关键参数编辑功能, 实现控制指令和定时信号在软件层面可编辑, 灵活的输出不同的控制协议和时序。

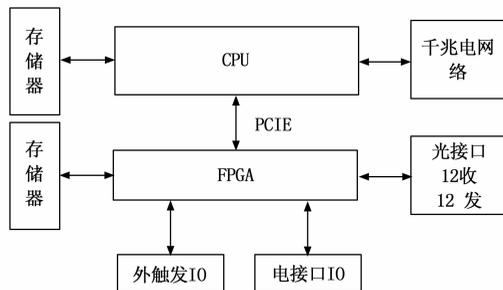


图 2 多功能控制模块原理框图

除了控制定时信号产生外, 该模块还有另一个针对提升测试效率设计的核心功能: 实现多任务参数的存储。多任务测试前需要把多个频率、波束指向等任务信息预先存储, 在近场测试时受到探头到位外触发后, 依次发送出去^[14]。外触发则采用脉冲触发模式, 并且由于触发信号容易受到干扰, 加入了脉冲宽度检测和干扰毛刺宽度检测的功能。毛刺宽度检测阈值为脉冲宽度的 0.1 倍。

1.2 综合频率源

对于模拟相控阵天线, 相参同频射频信号的测试使用一台矢量网络分析仪即可, 不需要提供额外的频率源。对于数字相控阵天线, 要提供整个天线测试系统和被测天线的时钟信号、本振信号和接收测试激励信号。天线测试通用平台包含一台综合频率源(图 3), 能够产生三通道独立的 200 MHz~15 GHz 宽频正弦波信号, 以及一路频率可选的点频信号, 覆盖常用的 100 MHz、200 MHz 等时钟频率。CPU 控制单元采用嵌入式 ARM 控制器作为 CPU 核心器件, 主要实现功能模块的控制、本地控制的参数设置、远程控制的参数设置、设备状态的上报等。

数字接收测试时一个重要的问题是信号的同步和相参。天线阵面不同子阵之间的同步由阵面自身保证, 测试时不同时刻采集的信号相参由测试系统保证。方法之一是利用监测 T/R 组件, 该组件是特殊的数字 T/R 组件, 可以保证不同时刻测试都有一个同步相参的参考通道作为基准。为降低成本, 天线测试通用平台不包括监测 T/R 组件, 对频率源提出新需求, 要求频率源直接保证每次设置都会输出

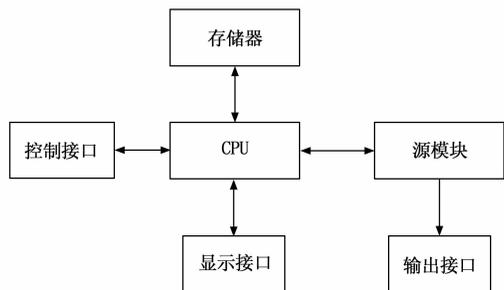


图 3 综合频率源原理框图

同一初始相位。

综合频率源在输出宽频信号时采用锁相环锁相方式合成，保证相同的初始相位。点频信号源采用多个晶振倍频的方案设计，低成本实现多种频率。

综合频率源具有以太网和同步串口 (RS422) 的远程控制功能，网口是利用 UDP 协议输出三路信号频率，RS422 接口用于多任务测试需求。该控制方式包含 4 对 RS422 差分接口，分别是换频脉冲、数据、时钟和使能信号，在天线测试通用平台内部受多功能控制模块的特定 IO 时序控制，多任务测试过程中依次输出不同的频率点。频率源的跳频时间小于 200 μ s。

1.3 阵面数据分析仪

数字相控阵天线下行信号是经过中频采样后的 IQ 数据，通用仪表不能直接测量。阵面数据分析仪是天线测试通用平台的数据记录模块，放置 4 个接收光模块，实现 96 路 SERDES 数据的接收，实现多路数据的接收，能够覆盖多路数字信号的测试场景。阵面数据分析仪 (图 4) 采用两级 FPGA 架构设计，第一级采用 2 片 V7FPGA，合成 72 路光纤数据，第二级采用 1 片 V5FPGA，内嵌 PowerPC 处理器，可以实现 V7FPGA 的逻辑加载、配置参数加载、测试数据外发等功能。

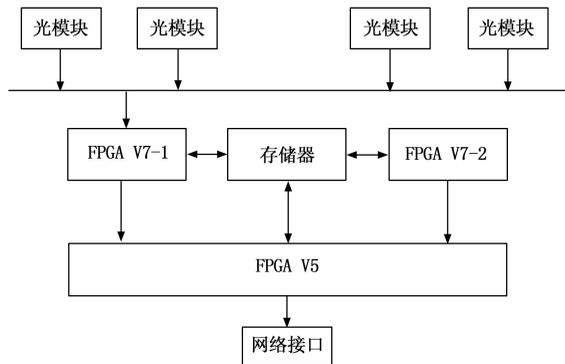


图 4 阵面数据分析仪原理框图

相比于雷达数字波束形成 (DBF)，阵面数据分析仪重点在于功能通用性，强调对于天线原始数据的获取和处理。设计过程充分考虑通用化配置，例如：可以选择输入光纤的位置和数量、设置光纤速率、指定某个光纤通道为测试参考通道、配置测试数据报文格式、波束合成数据抽取和

处理等。这些信息都可以通过 V5FPGA 实现参数预先加载，适配不同的雷达天线。

阵面数据分析仪功能主要是：天线原始数据处理功能、天线状态监测数据处理功能和波束合成功能。原始数据是按照配置参数中数据抽取规则选取数据点通过 V5FPGA 网口输出，后续数据处理可以在上位机软件中实现。天线状态监测数据主要是阵面自检数据，也可以直接通过网络接口输出。波束合成数据是在阵面数据分析仪内部经过通道的矢量和运算后再进行 FFT 数据处理，最终可以将合成后的少量数据点送出，效率较高。

2 软件平台设计

测试软件是完成用户信息交互、测试流程调度、测试硬件对接、测试数据显示的平台。天线测试通用平台在软件开发过程中利用构件尽可能实现通用化，减少代码重复开发^[15]。对不同的被测天线，通过调用通用构件和专用构件，快速完成测试流程代码开发和调试。开发环境为 Qt，代码执行效率高，绘图功能简单^[16]。测试系统软件采用软件架构与测试流程分离的设计思想，每个被测件的测试流程是一个独立的动态库，最大限度地保障测试系统软件的稳定性，并且测试流程形成动态库可以有效的软件复用，不断积累不同测试方法库^[17]。

软件复用技术是充分利用过去系统开发中积累的知识经验，能够有效降低软件开发时间、人力和成本，已成为软件开发主流方式。传统测试软件是针对某型天线测试定制化开发代码，对于不同的测试需求开发特定的测试流程，优点是代码架构简单、没有冗余，但是不同的天线测试需求采用“从零开始”的软件开发模式，只有少量的函数级别的代码复用。本文设计的软件将功能模块以构件形式开发，针对文中的天线测试通用硬件平台，可复用构件包含图 5 中的硬件资源驱动库、构件库，是支持软件复用的关键技术，大大提升了软件复用率。经统计，传统测试软件在函数级的复用大概在 20% 左右，而通用软件平台针对特定测试仪器型号的通用硬件平台，仪表驱动库和控制协议配置构件等构件库功能独立、可直接复用，测试流程针对不同的测试需求要重新开发、修改，但是有函数级别的复用，粗略统计软件复用率在 70% 左右。另外，文中讨论的软件复用率统计范围是对于能够使用本文设计的天线测试通用硬件平台测试的相控阵天线。

2.1 软件总体结构

测试软件界面是用户交互的接口，执行用户指令。软件设计按照通用功能模块构件化，测试流程通用化加定制化，硬件资源按资源库管理的模式。常用的测试流程、构件库和硬件资源如图 5 所示。

软件总体结构第一层是硬件平台资源通过开发底层控制指令形成驱动库，同一硬件资源不同型号统一软件接口，软件开发时针对不同型号实现驱动的直接替换。第二层是软件平台的构件库，包括针对硬件驱动的控制构件，控制协议的配置构件，数据存储显示构件等，将软件平台中通

用的功能形成构件, 专用的功能也以构件方式开发, 可以针对不同的需求进行构件增加裁剪。第三层是针对具体天线测试需求开发的测试流程, 测试流程按照天线测试功能需求分类, 在通用流程基础上支持定制化开发, 通常不同的需求需要反复调试测试。顶层是人机接口, 提供参数输入和数据显示界面, 操作简单。

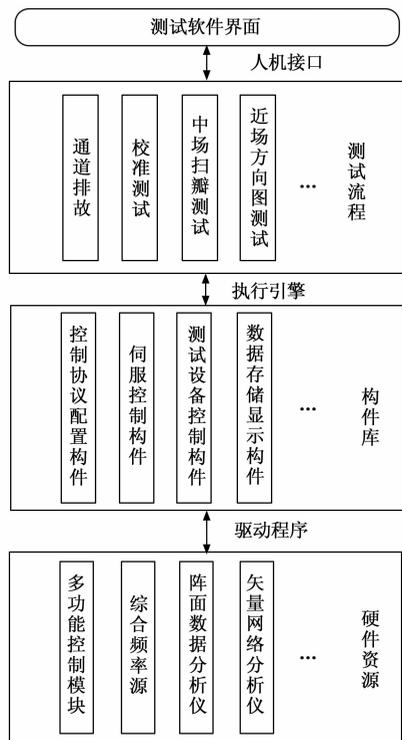


图 5 软件总体结构框图

测试流程动态库和构件库都是以 .dll 控件形式存在, 在软件平台中动态加载、管理和释放。动态加载、释放动态库的主要代码如下所示:

```

QLibrary lib(".dll"); //加载动态库 if(! lib.load())
{
    QMessageBox::about(this,CString Format("天线测试平台"),
    CStringFormat("加载失败"));
return;
}
typedef void( * DlgShow); //声明调用的功能函数
DlgShow dlgshow=
(DlgShow)lib.resolve("show");
dlgshow0; //功能函数调用 lib.unload0; //释放动态库
    
```

仪表编程基于 NIVISA/VISA32(Virtual Instrument Software Architecture), 支持 GPIB 及 LAN 通信。NI-VI-SA/VISA32 是美国国家仪器 NI 公司开发的一种与各种仪器总线交互的高级应用编程接口。不受平台、总线、环境等限制, 是虚拟仪器系统接口软件。VISA 编程驱动结构如图 6 所示。

IVI 引擎指的是可互换虚拟仪器, 定义通用的仪器驱动

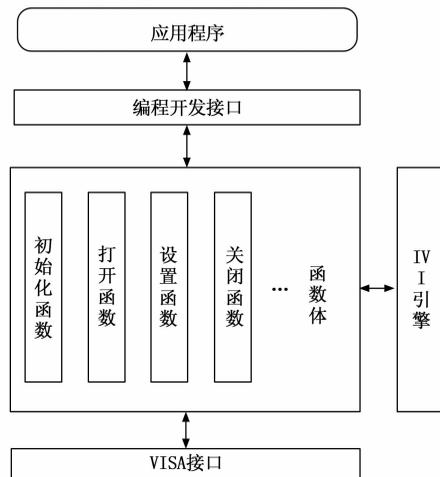


图 6 VISA 编程驱动结构图

函数, 对不同厂家仪器实现在线互换。典型代码如下:

```

viOpenDefaultRM(&nSession); viOpen(nSession, "GPIB: 3:
INSTR", VI_NULL, VI_NULL, &HandleID); //仪器打开函数
viClose(HandleID); //仪器关闭函数
    
```

2.2 主要功能模块

2.2.1 产品信息配置功能

针对不同的被测阵面, 开放信息配置功能, 由于不同阵面只需配置一次, 并且参数相对固定, 因此利用 XML 文件配置。主要参数包括: 阵面通道数、阵面子阵数、阵元行间距、阵元列间距、阵元行数、阵元列数、阵面架构(模拟阵、单元数字化、子阵数字化)、极化模式、校准通道等。测试过程直接调用 XML 文件获得各项参数值, 避免不同被测阵面测试流程针对该部分代码的重复修改。

2.2.2 参数协议编辑功能

通用平台控制是由多功能控制模块实现, 软件重要的一项功能是提供该模块协议编辑, 开发者或用户可以编辑阵面控制参数和定时参数的值, 用于天线上行控制链路不同工作模式的调试或者测试流程调用。该功能以表格形式展现, 方便用户编辑。

2.2.3 数据存储显示功能

被测数据在软件界面上合理、直观的布局和显示, 能够帮助用户实时了解测试情况, 以做出测试异常及时中断等行为。通道测试数据用表格形式展示, 方向图测试数据用波形图形式显示波瓣曲线(图 7)。数据存储按照固定的格式保存在数据库中, 按照测试项目建立表格。

2.2.4 测试硬件管理功能

该功能模块是针对天线测试通用平台硬件资源的管理设计, 包括多功能控制模块、通用频率源和阵面数据分析仪的接口管理, 以及测试仪器的管理(表 1)。测试仪表主要是矢网和电源单元, 软件构件库包含常用仪表类型, 例如美国是德、德国罗德施瓦茨、中国思仪几款矢网型号。

2.2.5 用户管理功能

测试软件平台提供多级用户管理, 每级用户有不同的

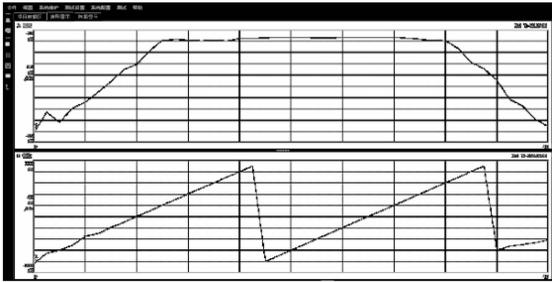


图 7 近场测试界面

权限, 可以提供超级管理员、软件开发人员、测试人员、数据查阅人员等不同的用户权限, 例如超级管理员享有最高权限, 可以修改平台代码、数据库等; 软件开发人员享有较高权限, 可以增加修改测试流程代码; 测试人员享有一般权限, 能够使用测试软件进行实际测试; 数据查阅人员享有最低权限, 只能浏览软件平台和测试数据。用户多级管理能够确保测试系统软件组成完整性和安全性。

表 1 测试硬件管理

ID	硬件资源	型号	接口类型	接口	是否在线
ID1	多功能控制模块	自研	NET	192.168.xx.xx	是
ID2	多通道频率源	自研	NET	192.168.xx.xx	是
ID3	阵面数据分析仪	自研	NET	192.168.xx.xx	是
ID4	矢网	Keysight N5224A	NET	192.168.xx.xx	否
ID5	矢网	思仪 AV 3672B	GPIB	16	是

2.3 天线测试流程设计

装配好的天线测试过程一般包括通道排查测试、通道校准测试和波瓣性能测试。软件平台在测试流程设计中将通用流程固化, 相关阵面参数、控制参数、测试延时等参数可配置。

2.3.1 通道排查流程设计

查看阵面好坏通常的做法是通过内监测挨个遍历 T/R 组件, 对阵面控制、各有源器件、射频链路等完成功能测试。模拟链路测试利用矢网, 天线阵面接收测试时, 矢网一个端口作为源通过稳相电缆发射信号至阵面内定标链路总输入口, 总输出口通过电缆接至矢网另一个端口; 发射测试时, 链路相反, 矢网一个端口提供相参的激励信号, 阵面发射, 矢网另一个端口接收。测试时挨个打开每个 T/R 组件每个通道, 并且控制不同的移相码、衰减码、延时码, 检查每个通道的移相器功能。模拟链路测试完成所有 T/R 组件及链路的功能检查, 确保天线单元幅相加权合成波束。数字相控阵的数字接收链路是利用阵面数据分析仪对下行 I/Q 采用数据分析完成测试。流程图如图 8 所示。

2.3.2 通道校准流程设计

相控阵天线每个通道都包含若干微波器件, 通道之间

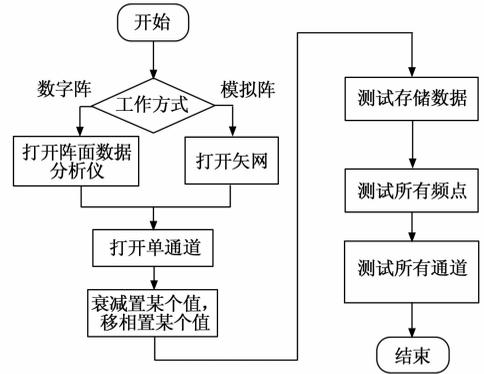


图 8 通道排查流程

初始的幅相不一致会影响天线合成波束的性能。因此, 经过天线幅相测试排查后, 幅相校准也很重要。直接利用内定标射频链路的方法适用于精度要求较低的幅相校准, 没有考虑到阵元互耦影响。现有天线阵面幅相校准也会利用中场校准或近场校准^[18]。

中场接收校准时测试系统通过探头发射信号, 阵面各接收通道依次打开, 得到接收通道的幅相数据, 发射校准时阵面各个通道发射信号, 中场探头接收信号后送到测试系统, 得到发射通道的幅相数据。中场探头相对于阵面的位置是经过光学方式严格标定, 因此可以计算出不同通道到探头的路程差引起的幅度、相位误差, 测试的幅相数据减去幅相误差可以得到幅相校准时的各个通道幅度、相位数据。发射校准测试流程相似, 没有衰减置位。中场校准较近场校准操作简单、效率高, 但是依靠光学标定和计算会引来测试误差, 近场校准是在近场测试环境下, 利用扫描架等装备依次移动探头到每个通道前方, 控制当前通道打开, 其他通道关闭, 获得通道初始幅相值。近场受环境影响小、测试精度较高。测试流程与中场相同, 多了探头移动的过程。阵面参考基准幅度的选择有多种方法, 其中之一是全阵面通道幅度值平均值再减去一个参考值。参考基准相位可以为任意值, 所有通道向参考值校准即可。流程图如图 9 所示。

2.3.3 波瓣性能测试流程设计

阵面完成校准后方向图性能测试前, 可以通过中场扫描快速检查阵面波束形成情况。阵面波束按照俯仰角和方位角依次控制在不同角度, 获得的幅度相位按照角度绘制出变化趋势, 粗略表现出阵面的方位、俯仰角向波束情况。

经过上述一系列功能检查和测试后, 要进行天线阵面性能测试。方向图测试是获得天线阵面性能最常用的方法, 有远场、中场和近场测试方法^[19]。室内暗室近场测试具有不受天气因素影响、节省场地的优点^[20]。近场测试系统包括伺服扫描架分系统、测试系统和微波暗室, 扫描架接有近场探头, 在移动过程发射或者接收信号完成阵面接收或发射平面近场测试, 通过计算得到方向图。流程图如图 10 所示。

模拟阵面接收测试核心仪器是矢网, 四通道矢网可以

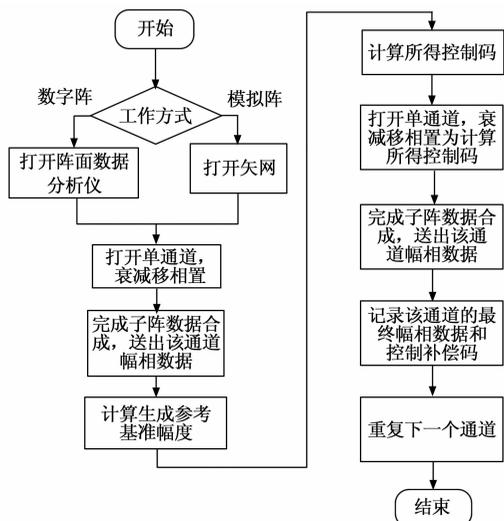


图 9 通道校准流程

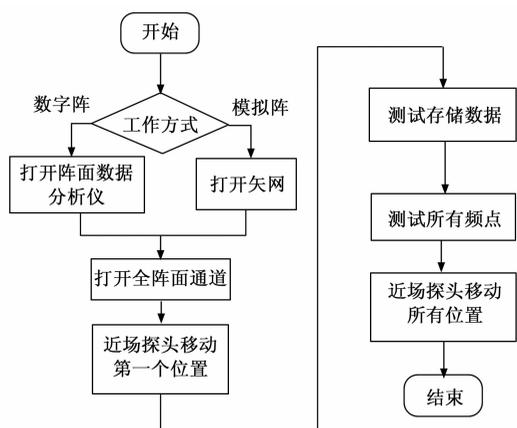


图 10 波瓣测试流程

同时得到和差波束, 仪器一个端口接至近场探头, 提供激励源信号, 另外 3 个通道接至阵面和差差网络接口, 测试时同时获得 3 个波束信号。数字阵面接收测试时, 监测 T/R 组件或者稳相频率源发射信号至近场探头, 子阵下行数字信号合成和差波束, 并且可以根据要求合成多个不同角度波束。阵面发射方向图测试利用矢网, 矢网一个端口发射信号经过功放后作为阵面激励信号输入, 阵面发射信号至近场探头接收, 探头将信号送回矢网另一个端口, 完成发射测试。

波瓣性能测试引入多任务测试方法, 利用多功能控制模块, 测试前将多个频点、多个波束指向的控制信息提前存储, 收到扫描架探头到位发出的握手信号后, 控制模块被触发产生特定的时序, 实现多个测试任务的阵面控制、源控制、信号采集的同步。

3 试验与验证

天线测试通用平台由通用硬件资源和软件平台构成, 适用于多数模拟相控阵、数字化相控阵的测试。相比传统的以雷达控制、数据记录等分系统为硬件资源的定制化测

试系统, 通用平台有标准架构、软件可复用、能够快速集成, 大大减少开发人员的工作量, 同时对使用人员也提供相对标准的测试流程, 测试精度与传统的测试系统相当。两类测试系统硬件组成如表 2 所示, 选择某 X 波段子阵数字化相控阵天线为例进行试验与验证。

表 2 测试硬件组成

序号	传统测试系统	通用测试平台
1	雷达控制系统	多功能控制模块
2	雷达频率源	综合频率源
3	雷达数据记录	阵面数据分析仪
4	矢网	矢网
5	电源	电源
6	测试附件	测试附件

前文已经对传统测试系统和通用测试平台的软件复用率比对, 现在进行系统集成和方向图的实际测试, 利用多任务测试得到不同波束角度的测试结果, 如表 3 所示。从对比数据看出, 通用测试平台测试精度与传统测试系统基本一致, 但是系统集成速度提升 69%, 软件复用率提升 50%, 具有很大优势。

表 3 测试硬件组成

序号	对比内容	传统测试系统	通用测试平台
1	系统集成	6.5 小时	2 小时
2	软件复用率	20%	70%
3	0°波束指向精度	-0.025 3	-0.102 6
4	20°波束指向精度	19.905 2	20.097 6
5	40°波束指向精度	39.966 3	39.943 1
6	60°波束指向精度	59.890 5	59.877 1

使用文中天线测试通用平台对某型有源相控阵测试, 发射近场测试数据分布和方向图显示如图 11 所示。

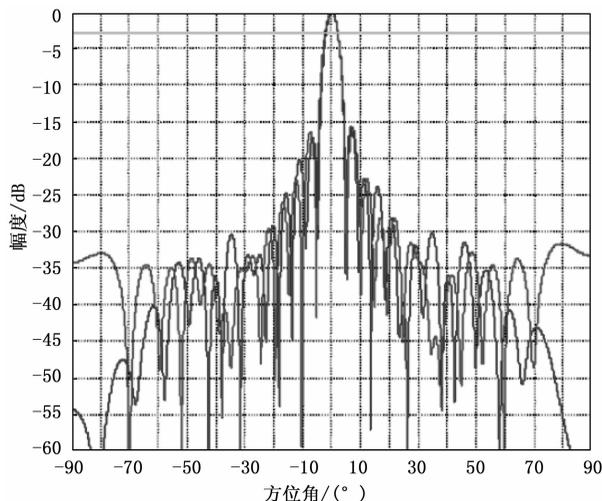


图 11 发射近场相位分布和波束

(下转第 34 页)