

## 基于 VI 的机载 SAR 天线稳定平台 ATS

刘万富\*\*\* 郭振永\* 戴明宇\* 张平\*

\*(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

\*\* (中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文简述了机载 SAR 天线稳定平台的工作原理,介绍了针对某型机载 SAR 天线稳定平台的新型自动化测试系统。该系统以 PXI 虚拟仪器为核心,使用二维电控转台模拟载机角运动,采用激光小角度测量方法测量平台响应误差。该机载 SAR 天线稳定平台测试系统可用于多种类型的机载 SAR 天线稳定平台测试。

**关键词:** 机载 SAR 天线稳定平台, 虚拟仪器, 电控转台, 激光测量

中图分类号: TN959.73 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)11-1786-05

## An ATS Based on VI for Antenna Stabilization Platform of Airborne SAR

Liu Wan-fu\*\*\* Guo Zhen-yong\* Dai Ming-yu\* Zhang Ping\*

\*(Institute of Electronics, China Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

\*\* (Graduated Institute, China Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** This paper describes the principle of antenna stabilization platform of airborne SAR briefly, and then introduces an ATS(Automatic Test System) for such platform. The core of this system is a PXI VI(Virtual Instrument). The system uses an electro-controlling motion simulator to simulate the angle-motion of airplane and laser-test device to test the track error of the platform. It can be used for different types of antenna stabilization platform of airborne SAR.

**Key words** Antenna stabilization platform of airborne SAR, Virtual instrument, Electro-controlling motion simulator, Laser testing.

### 1 引言

机载SAR(Synthesis Aperture Radar)具有受限制条件少,容易实现,灵活性强,容易实现新技术,方便及时维护等特点,是SAR的首要发展目标。机载SAR系统提供的实时成像功能,无论是在灾害预防以及军事侦察应用方面有着不可估量的作用<sup>[1]</sup>。

SAR 要求天线相位中心(APC)的运动状态为匀速直线运动,实际工作时总是无法达到这种理想的状态。因为载机平台都是靠自身动力飞行在大气层中,大气层中气流的运动会对载机的运动状态产生严重的影响。在合成孔径时间内,由于气流作用,载机平台可能会出现平移、偏流、横滚和俯仰等非理想运动状态,导致天线相位中心的运动误差,从而影响 SAR 成像质量。对于平移运动,主要是在后数据处理中根据惯导提供的载机运动状况对图像进行几何校正,而角运动则主要由 SAR 稳定平台隔离,使天线具有依靠惯性维持

固定指向的特性,达到稳定雷达波束指向的目的。机载 SAR 稳定平台这种隔离载机角误差的功能使其在机载 SAR 系统中具有重要的作用。

### 2 SAR 稳定平台工作原理及一般的测试方法

机载 SAR 天线稳定平台一般为采用陀螺稳定的自稳式平台,主要完成控制功能的平台控制机箱与平台台体分离,通过电缆连接。平台采用三轴位置随动环分别独立跟踪飞机惯导提供的偏流角、横滚角和俯仰角,克服常值风的影响。同时,在方位环和横滚环中引入挠性陀螺稳定以克服脉动风引起的随机扰动。另外,由常值风引起的飞机航迹的变化将由平台加速度计测量出来。

SAR 稳定平台的关键指标为其在方位、横滚和俯仰 3 个方向的稳定性能。目前国内没有针对机载 SAR 天线稳定平台的模拟载机环境的自动化测试手段。测试方法一般采用手

动测试,使用指令发送器发送角度位置等信息,待平台稳定后观察平台角度指示表和状态显示,并利用直尺、倾斜测量仪以及内调焦自准直仪等设备人工测量平台的实际姿态,对于平台动态跟踪,则观察其对给定信号跟踪的平稳性,同时使用雷达监测与控制分机对平台故障进行人工监测。这样的测试手段仅能简单测量雷达稳定平台的一些静态性能,其动态性能通常要通过飞行实验来考察。在对机载 SAR 性能指标的要求越来越高的今天,原有的雷达稳定平台地面测试手段已不能满足对高性能稳定平台的测试要求,由于飞行实验费用昂贵,急需用于雷达天线稳定平台的高性能地面自动化测试系统(Automatic Test Equipment, ATE),本系统是中国科学院创新基金项目的研究成果,它以某型机载 SAR 稳定平台为基本测试对象,是基于虚拟仪器(Virtual Instrument, VI)的自动化机载 SAR 天线稳定平台测试系统。该测试系统的研制成功对机载 SAR 天线稳定平台的设计和性能改进具有重要的意义。

### 3 SAR 稳定平台地面自动化测试系统结构

本雷达稳定平台的自动测试系统是将平台安装在测试系统的飞机角运动仿真转台上,测试雷达稳定平台的伺服系统的动静态性能。它从结构上可以划分为电控转台、激光测量装置和 PXI 虚拟仪器设备 3 个部分(如图 1 所示)。

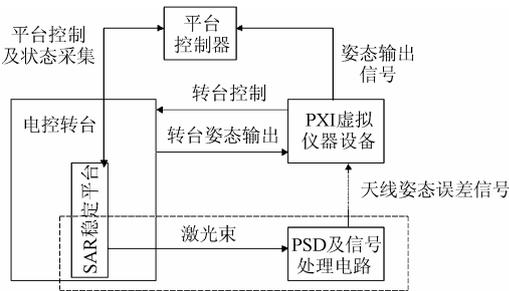


图 1 系统结构框图

其中电控转台完成载机二维角运动模拟;激光测量装置通过对固定在平台台体上的激光笔的激光光束在光敏器件 PSD(Position Sensitive Detector)上形成光点的位移,测量获得平台姿态的随动误差;虚拟仪器设备实现电控转台的控制,平台的监测与故障诊断,平台角位置伺服环的功能测试以及数据处理和数据显示软件。

#### 3.1 电控转台的结构

电控转台在测试系统中起着重要的作用,它是实现对雷达稳定平台动态性能进行测试的条件。它根据载机的实际飞行数据模拟载机的角运动,给转台一个近似真实载机的环境。由于对雷达成像的影响程度依方位、横滚、俯仰的顺序依次降低,俯仰向的影响相对前两者来说要小很多,因此我们设计了一台二维转台,仅对方位和横滚两个方向进行模

拟。该电控转台频响三倍于被测对象的频响,各向转角范围均大于飞行状态,并且带负载能力较强,使得该转台可以应用于多种类型和规格的机载 SAR 天线稳定平台的测试。由于转台对给定姿态输入信号的随动响应存在一定的误差,我们使用测量电控转台角位置的增量式光电编码器的输出信息转换成惯导的姿态输出信号,这样在数据处理时可以比较精确地分析输入误差及延时,并且可以降低对转台控制精度的要求。为了给平台控制提供失真尽量小的激励信号,我们保证了较高的轴系垂直度、回转精度和转台位置测量精度。

该二维转台提供两个距离可变的天线平台挂点,以适应不同尺寸的双挂点和单挂点天线稳定平台的性能测试要求,具有一定的通用性。

#### 3.2 激光测量装置的原理及结构

如何测量平台运动的角位置是本系统的技术难点之一,针对测量对象的独特性——隔离姿态扰动,天线平台台体相对于转台基座仅有跟踪误差造成的微小角运动,我们引入了独立于天线稳定平台的激光测量装置,该测量装置使用高分辨率的光敏位置测量器件 PSD 作为测量器件。将 PSD 放置于一个与基座连通的金属臂上,并保证敏感面平行于天线稳定平台方位轴和横滚轴组成的平面;在靠近转动中心的位置放置小功率的激光器,使激光束打在 PSD 的敏感面中心附近,当稳定平台在方位向和横滚向运动时,激光束在感光面上形成线位移,经过处理后,每 5ms 以数字方式输出给虚拟仪器一组数据。其测量原理如图 2 所示。

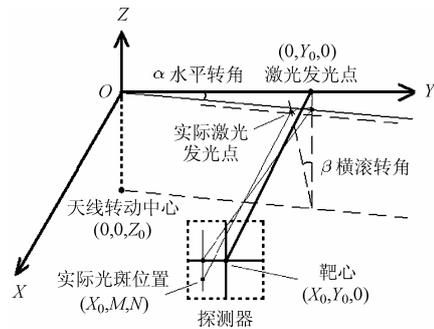


图 2 激光测量装置的测量原理图

分析得知:  $M - Y_0 = -\text{tg } \alpha [X_0 + Y_0 \cdot \sin \alpha] - Y_0 [1 - \cos \alpha]$ ,  $N = -\text{tg } \beta [X_0 - Z_0 \cdot \sin \beta] + Z_0 [1 - \cos \beta]$ 。根据被测对象的特点,  $\alpha, \beta$  远小于  $0.0174\text{rad}(1^\circ)$ , 由此可以近似为  $M \approx \alpha \cdot X_0$ ,  $N \approx \beta \cdot X_0$ , 水平转角  $\alpha = (M - Y_0)/X_0$ , 横滚转角  $\beta = N/X_0$ 。其中 Z 为方位轴, Y 为横滚轴,  $X_0$  为靶心与激光源间的距离(=0.6m),  $Y_0$  为激光源与水平转动轴间的距离(=0.1m),  $Z_0$  为激光源与垂直转动轴间的距离(=0.1m),  $M - Y_0$  为光斑离靶心的水平距离,  $N$  为光斑离靶心的垂直距离,  $\alpha$  为水平方向跟踪误差角(逆时针为正),  $\beta$  为横滚方向跟踪误差角(逆时针为正)。

### 3.3 PXI 虚拟仪器设备

目前,先进的ATE设备大都离不开虚拟仪器技术的支持。所谓虚拟仪器就是用户在计算机平台上,根据需求定义和设计仪器的测试功能,使得使用者在操作这台计算机时,就像在操作一台他自己设计的测试仪器一样<sup>[2]</sup>。虚拟仪器是本ATE系统的核心设备,根据测试要求,我们以美国国家仪器公司(National Instrument, NI)的3U四槽PXI(PCI Extension for Instrumentation)机箱为载体实现虚拟仪器系统(如图3所示)。配置的模块包括:0槽及PXI扩展口、运动控制器、数据采集卡和稳定平台测试CPCI(CompactPCI)卡。其中的稳

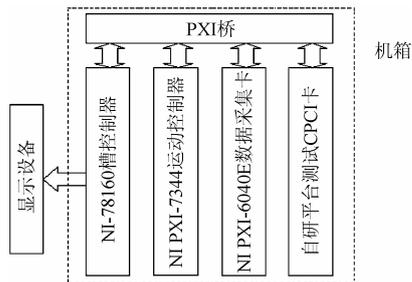


图3 虚拟仪器设备的硬件组成

定平台测试卡是我们根据测试要求自行研制的遵循CPCI规范的测试模块。它是该测试系统的关键模块。由于系统中的各PXI测试模块不需要实现同步处理和直接的数据通信,所以该卡只需遵循32位的CPCI规范,在电器上兼容PCI规范<sup>[3]</sup>。在主机端,我们使用WIN2000DDK编制了相应的PCI驱动程序,并编制了遵循可互换虚拟仪器(Interchangeable Virtual Instrument, IVI)规范<sup>[4]</sup>的应用程序接口。该测试卡以TI(Texas Instrument)的高性能定点DSP——TMS320VC5510为核心构建,主要完成以下功能:

(1) 平台姿态测量数据接收解算: PSD每5ms向该模块串行发送一组串行数据,由DSP的多缓冲串口(Multichannel Buffered Series Port, McBSP)接收、解算出跟踪误差角并存储。

(2) 在DSP的串口中断产生时,先从处理增量式编码器信号的角位置解码逻辑的锁存器中取出位置信息,作比例运算,将脉冲个数转换成角度值存储并发送给模拟惯导输出的高精度自整角发送机或是旋转变压器,送给平台控制器。由于新型机载平台要求输入为旋转变压器信号,我们的测试卡有自整角机和旋转变压器两种姿态输出信号。

(3) 完成通过PXI总线与上位机的通信:使用不影响DSP工作的增强主机接口(Enhanced Host-Port Interface, EHPI)通过主机对DSP的内存读写与DSP进行通信<sup>[5]</sup>,实现DSP程序代码的下载和仪器卡控制。

### 3.4 虚拟仪器软件

虚拟仪器软件是使用NI公司的仪器专用开发平台

LABWindows/CVI开发,运行于WIN2000操作系统。主要功能为操作各仪器卡、数据处理以及动态显示回送数据。它动态显示二维转台的姿态信息,其软件结构如图4所示。

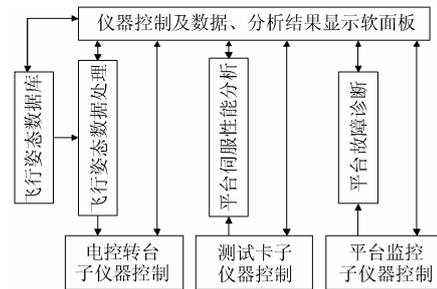


图4 虚拟仪器软件体系结构

各子仪器控制模块响应界面程序的动作操作硬件,并对取得的数据进行处理送回显示界面。飞行姿态数据库存储了飞机多次飞行中的由惯导测得的非机动飞行姿态数据,电控转台子仪器使用该数据库中的数据控制电控转台进行载机姿态模拟;平台故障诊断是根据平台监控子仪器通过数据采集卡采集到的多路数据进行故障监测与诊断的智能诊断程序。

### 3.5 测试系统工作原理

测试前,首先使调整PSD和激光源的安装位置,使激光束垂直打在尽量接近PSD光敏中心点,以保证测试时光束不会偏离PSD的线性工作区。

动态性能测试时,开机开启各个仪器模块,二维转台自动寻零,并由测试卡在寻零过程中自动记录下激光束的零位坐标,供解算角度时使用;寻零结束后从飞行姿态数据库调入飞行姿态数据,取其中的方位和横滚向数据控制转台模拟载机运动;同时由自研卡将转台实际姿态转换成惯导姿态输出信号作为激励发送给SAR稳定平台,并记录下由激光测量装置测得的平台实际姿态。转台姿态和平台的误差都将送到上位机进行分析处理、显示,以评价平台的性能。

在测试过程中由平台监测子仪器通过数据采集卡采集平台的辅助数据,对平台状态进行监测,并将数据送给故障诊断程序进行故障分析诊断。

## 4 系统误差分析

该测试系统的对于平台伺服环路性能测试的随机误差 $\delta_w$ 主要由以下几部分组成:

- (1) 转台测量误差 $\delta_0$ ;
- (2) 模拟惯导输出信号误差 $\delta_1$ ,使用自整角发送器时为使用旋转变压器时的5倍;
- (3) PSD的测量误差造成的角度测量误差 $\delta_2$ ;

随机误差采用符合方均根合成法:

$$\delta_w = \sqrt{\delta_0^2 + \delta_1^2 + \delta_2^2}$$

采用自整角发送器,  $\delta_w$  主要成分为  $\delta_1$ , 采用旋转变压器时,  $\delta_w$  主要成分为  $\delta_2$ 。

该系统的系统误差  $\delta_s$  主要由电控转台的轴系垂直度、回转精度以及激光测量装置的系统误差构成。由于转台在方位向和横滚向转动角度较小, 转台的轴系垂直度和回转精度产生的角度误差和由于激光测量装置的光源与光敏器件间距变化产生的测量误差小于测量范围的 2%, 激光测量装置的系统误差产生于安装误差和计算时的近似误差, 计算知两者均小于测得值 1%, 且可以在后处理中补偿, 由此可知系统误差  $\delta_s$  相对于随机误差可以忽略。

该测试系统的总体误差  $\delta = \delta_w + \delta_s \approx \delta_w$ ,  $\delta$  小于被测对象误差的 1/5, 满足精度要求。

### 5 系统关键技术

本自动化测试系统关键技术在于根据稳定平台在方位、横滚和俯仰向随动误差对雷达成像的影响程度依次降低的特点, 设计了较高测量精度、轴系垂直度和轴系回转精度的二维电控转台, 有针对性地实现了对载机角运动的模拟; 根据雷达天线稳定平台的隔离扰动的工作特点, 将小位移激光测量技术应用到平台姿态测量, 实现了高精度、低成本且系统构成简单的平台角位置随动误差测量装置; 引入虚拟仪器技术, 实现了平台的自动化测试。这些关键技术的实现解决了平台测试中难以准确模拟载机环境、无法精确测量平台动态响应以及原有平台测试手段自动化程度低的问题。

### 6 实验结果

通过对某型机载 SAR 天线稳定平台的动态稳定性能, 静态误差的测试证明, 该系统原理切实可行, 很好完成了某型稳定平台的测试工作。由于设计中的通用性考虑, 预期能够应用于多种机载 SAR 稳定平台测试。

图 5 为使用该测试系统对某型机载 SAR 天线稳定平台测量时的角度跟踪数据复现, 左侧为方位角姿态输入(左上)以及平台方位向响应误差(左下), 右侧为横滚角姿态输入(右上)以及平台横滚向响应误差(右下), 从图中可以看出天线平

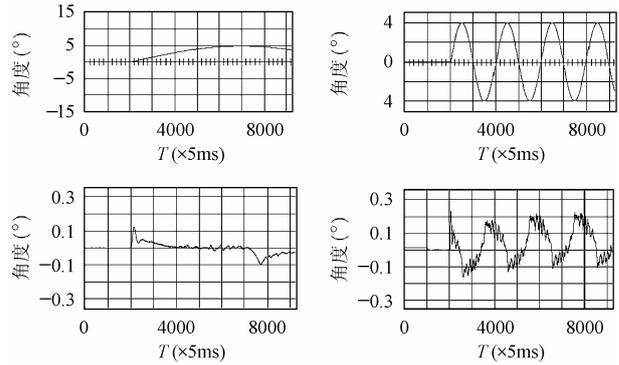


图 5 某型机载 SAR 天线稳定平台测试数据复现

台的伺服性能, 两轴之间由于机械设计等原因造成的耦合等。

### 7 结束语

该系统的研制完成填补了国内同类型机载 SAR 稳定平台测试领域的空白, 它是机载 SAR 天线稳定平台测试手段的一个突破, 具有很重要的意义。

### 参考文献

- [1] 张澄波. 合成孔径雷达的原理、系统分析及应用. 北京: 科学出版社, 1989: 299 - 235.
- [2] 张乐平. 虚拟仪器技术概论. 北京: 电子工业出版社, 2003: 2 - 6.
- [3] PXI Specification, PXI System Alliance, 2000: 15 - 100.
- [4] 张风均. LabWindows/CVI 开发入门与进阶. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001: 340 - 348.
- [5] TMS320VC5510 Fixed-Point Digital Signal Processor Data Manual, U.S.A, Texas Instrument, 2000: 1 - 10.

刘万富: 男, 1977 年生, 博士生, 从事机载 SAR 运动补偿及地面测试研究。  
 郭振永: 男, 1971 年生, 高级工程师, 从事信息安全研究。  
 戴明宇: 男, 1976 年生, 硕士, 从事激光测量系统研究。  
 张平: 男, 1949 年生, 研究员, 从事机载 SAR 监控系统研究。