

文章编号: 1671-7449(2004)04-0320-05

机载 SAR 天线稳定平台自动化测试系统

刘万富^{1,2}, 张 平², 李科杰³

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 2. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100080;
3. 北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081)

摘要: 根据 SAR(Synthesis Aperture Radar, 合成孔径雷达) 平台的工作原理和需要测试的关键性能, 以 PXI 虚拟仪器为核心, 使用二维电控转台模拟载机角运动, 使用激光测量装置测量平台跟踪误差, 设计了机载 SAR 天线稳定平台的新型自动化测试系统。介绍了系统的结构、软件构成及工作原理。

关键词: 机载 SAR 稳定平台; PXI; 电控转台; 激光测量; 自动化测试

中图分类号: TN959.73 文献标识码: A

Automatic Test Equipment for the Antenna Stabilization Platform of Airborne SAR

LIU Wan-fu^{1,2}, ZHANG Ping², LI Ke-jie³

(1. Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;
2. Institute of Electronic, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;
3. Mech-Electronics Engineering Institute, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on key capabilities we caring for and the principle of antenna stabilization platform of airborne SAR (Synthesis Aperture Radar), the paper give us the consistent, software structure and principle of an ATE(Automatic Test Equipment) 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.

Key words: antenna stabilization platform of airborne SAR; PXI; electro-controlling motion simulator; laser testing; Automatic Test Equipment

机载 SAR(Synthesis Aperture Radar, 合成孔径雷达)因其受限制条件少, 容易实现, 灵活性强, 而且容易实验新技术, 并得到及时维护的特点成为 SAR 的首要发展目标。机载 SAR 系统提供的实时成像功能, 在灾害预防以及军事侦察应用方面有着不可估量的作用。在 SAR 信号处理时, 总是假定其处在理想状态即相对于要成像的地域做匀速直线的平移运动。而实际上不可能完全做到这一点, 雷达载机总要或多或少的偏离这种理想状况。表现为载机偏离匀速直线运动和载机在方位向、横滚向和俯仰向的摆动。这些载机运动偏差会造成回波多普勒信号调频斜率的变化, 这主要是一种二次相位误差, 将使线性调频信号通过匹配滤波器压缩波形失真, 使聚焦状况变坏, 严重时甚至完全不能成像^[1]。对于前一种情况, 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, 而后一种状况则主要由 SAR 稳定平台隔离。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。

1 SAR 稳定平台工作原理及一般的测试方法

一些机载 SAR 天线稳定平台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

* 收稿日期: 2004-03-04

作者简介: 刘万富(1977—), 男, 博士生, 主要从事机载 SAR 运动补偿及地面测试研究。

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。

对于雷达稳定平台, 我们主要关心其在方位、横滚和俯仰三个方向的稳定性能。目前国内没有针对机载 SAR 天线稳定平台的模拟载机运动的自动化测试手段。测试方法一般为手工测试, 使用指令发送器发送角度等信息, 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信号。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粗略地测量雷达稳定平台性能, 而动态性能只能通过飞行实验验证。在对机载 SAR 性能指标的要求越来越高的今天, 原有的雷达天线稳定平台测试手段已不能满足对高性能稳定平台的测试要求, 并且由于飞行实验费用昂贵, 急需用于雷达稳定平台的高性能地面自动化测试系统(ATE, Automatic Test Equipment)。本文介绍的系统是中科院创新基金项目的研究成果, 它以电子所研制的某型机载 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 稳定平台测试系统。该测试系统的研制成功对机载 SAR 的性能改进具有重要的意义。

2 SAR 稳定平台地面自动化测试系统结构

该雷达稳定平台的自动测试系统将平台安装在模拟载机角运动的载体上, 测试雷达稳定平台的伺服系统的静态和动态性能, 并实时监测平台的辅助数据检测故障。它从结构上可以划分为电控转台、激光测量装置和 PXI 虚拟仪器设备三个部分(如图 1 所示)。

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连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以及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。

2.1 电控转台的结构

电控转台在测试系统中起着重要的作用, 他是实现雷达稳定平台动态性能测试的根本条件。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, 并且俯仰向的影响相对前两者来说要小很多, 我们设计了一台二维转台(如图 2 所示), 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(该型 SAR 天线平台的体积和质量均较大), 使得该转台可以应用于多种机载雷达稳定平台的测试。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。为了给平台失真尽量小的激励信号, 我们保证了较高的轴系垂直度($0.1'$)、回转精度($0.1'$)和转台位置测量精度($0.1'$)。

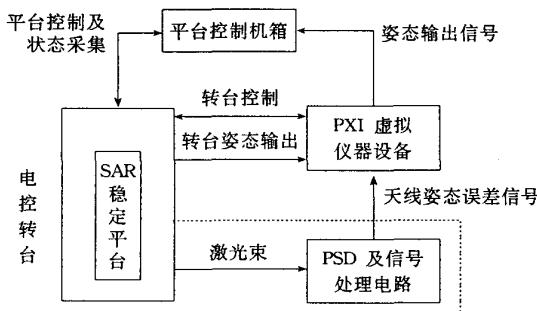


图 1 系统结构框图

Fig. 1 System structure

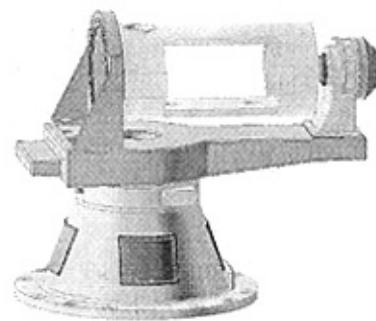


图 2 二维电控转台机械结构图

Fig. 2 Two axes simulator structure

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。

2.2 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——隔离扰动, 相对于地面仅有跟踪误差造成的微小角运动(根据某型机载 SAR 稳定平台技术参数和测试系统的误差, 该波动小于 0.15°), 我们引入了独立于雷达稳定平台的激光测量装置, 该测量装置使用日本滨松公司的高分辨率的光敏位置测量器件 PSD S1881 作为测量器件。将 PSD 放置于一个与转台固连的金属臂上, 并保证敏感面平行于雷达稳定平台方位轴和横滚轴组成的平面; 在靠近转动重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, 将会使激光束在感光面上形成线位移, 经过 PSD 的处理电路处理后通过 RS-232 串口每 5 ms 以数字方式输出给上位机一组数据。其测量原理如图 3 所示, 图 3 中 Z 为方向轴; Y 为横滚轴; X_0 为靶心和激光源的距离(0.6 m); Y_0 为激光源和水平转动轴的距离(0.1 m); Z_0 为激光源和垂直转动轴的距离(0.1 m); $M - Y_0$ 为光斑距离靶心的水平距离; N 为光斑距离靶心的垂直距离; α 为水平方向跟踪误差角(逆时针为正); β 为横滚方向跟踪误差角(逆时针为正)。

分析得知:

$$M - Y_0 = -\tan\alpha[X_0 + Y_0 \times \sin\alpha] - Y_0[1 - \cos\alpha],$$

$$N = -\tan\beta[X_0 - Z_0 \times \sin\beta] + Z_0[1 - \cos\beta].$$

根据被测对象的特点, $\alpha, \beta < 0.00262 \text{ rad}$ (0.15°), 由此可以近似为

$$M \approx \alpha \times X_0; \quad N \approx \beta \times X_0.$$

得出: 水平转角 $\alpha = (M - Y_0) / X_0$; 横滚转角 $\beta = N / X_0$ 。

2.3 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^[2]。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 4 槽 PXI (PCI EXtension for Instrumentation)机箱为载体实现虚拟仪器系统(如图 4 所示)。配置的模块包括: 0 槽及 PXI 扩展口、运动控制器、数据采集卡和自研的稳定平台测试 CPCI (CompactPCI)卡。

其中的稳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讯, 所以该卡只需遵循 32 b 的 CPCI 规范, 在电器上兼容 PCI 规范^[3]。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 IVI

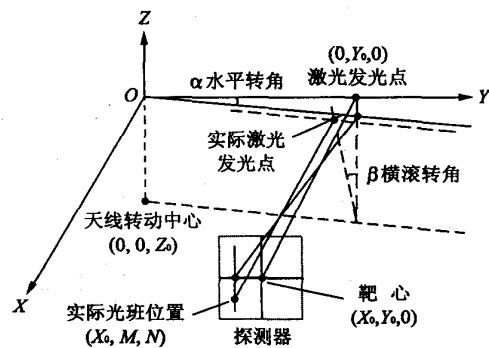


图 3 激光测量原理

Fig. 3 Laser testing principle

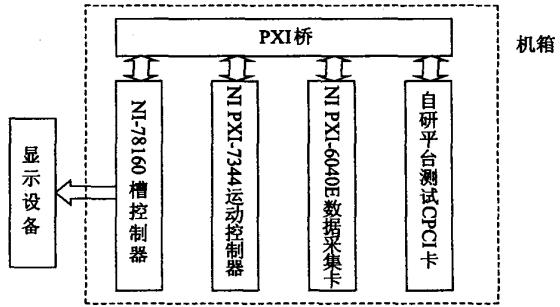


图 4 虚拟仪器设备的硬件结构

Fig. 4 Structure of hardware for VI

(Interchangeable Virtual Instrument, 可互换虚拟仪器规范)规范的应用程序接口^[4]. 该测试卡以 TI (Texas Instrument)的高性能定点 DSP-TMS320VC5510 为核心构建, 主要完成的功能为:

1) 平台姿态测量数据接收解算. PSD 每 5 ms 通过标准异步串口向该模块串行发送一帧串行数据, 由 DSP 的多缓冲串口 (Multichannel Buffered Series Port, McBSP) 以 DMA 方式模拟标准异步串口进行接收、解算出跟踪误差角并存储 (该 DSP 不具备 UART, 而 McBSP 为同步串口^[5]).

2) 在对应于每一帧的第一个字节的 DMA 中断产生 (每一个 DMA 中断代表一个字节接收完毕) 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, 做一个比例运算, 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, 送给平台控制机箱. 由于新型机载平台要求输入为旋转变压器信号, 所以, 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 总线与上位机的通讯. 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 进行通讯, 实现 DSP 程序代码的下载和仪器卡控制.

2.4 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 5 所示.

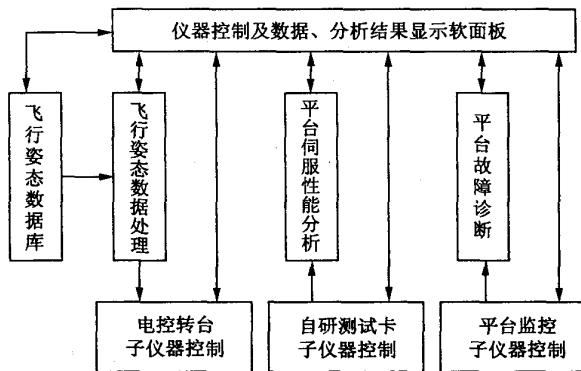


图 5 虚拟仪器软件体系结构

Fig. 5 VI structure of software

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.

2.5 测试系统工作原理

测试前, 首先调整 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, 以保证测试时光点不会偏离 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, 并由自研稳定平台测试卡在寻零过程中自动记录激光束的零位坐标, 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; 同时由自研稳定平台测试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。

3 系统误差分析

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

- 1) 转台测量误差 δ_0 ;
- 2) 模拟惯导输出信号误差 δ_1 , 使用自整角发送器比使用旋转变压器输出误差高出 5 倍;
- 3) PSD 的测量误差(5%)造成的角度测量误差 δ_2 .

随机误差的符合方均根合成法

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

使用自整角发送器时, δ_w 主要成分为 δ_1 ; 使用旋转变压器时, δ_w 主要成分为 δ_2 .

系统误差 δ_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, 通过计算, 两者均小于测得值的 1%, 且可以在后处理中补偿。系统误差 δ_s 值相对于随机误差 δ_w 可以忽略。

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

4 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地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。

5 结 论

测试证明, 该系统原理切实可行, 很好地完成了对某型机载 SAR 稳定平台的测试工作, 并且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。

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 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[M]. 北京: 科学出版社 1989. 299.
- [2] 张乐平. 虚拟仪器技术概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. 2—3.
- [3] PXI Specification. PXI System Alliance[Z]. 2000.
- [4] 张风均. LabWindows/CVI 开发入门与进阶[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001. 340.
- [5] Texas Instrument. TMS320VC5510 Fixed-Point Digital Signal Processor Data Manual[Z]. 2000. 1—2.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>