

# 新一代综合自动测试系统在船用雷达测试保障中的应用研究

陈靖宇<sup>1</sup>, 刘 收<sup>2</sup>

(1. 中国船舶重工集团公司第七二三研究所, 江苏 扬州 225101;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

**摘要:** 以舰船装备综合测试的迫切需求为背景, 提出了新一代综合自动测试系统 (IATS) 总体架构, 构建新一代综合自动测试系统设备体系; 针对某型船用搜索雷达, 分析了船用雷达整机/分系统部件内场测试和外场原位监测评估等测试诊断需求, 开展了新一代综合自动测试系统适应性和适用性等应用技术研究, 实现了船用雷达工作频率、功率、带宽、噪声系数、窄脉冲信号等参数性能自动化测试和增强型原位监测评估功能; 经分析评估, 新一代综合自动测试系统设备体系可以满足船用雷达装备研制、试验和使用维护阶段测试保障应用, 对提升其寿命周期内的测试保障效率和效能具有重要支撑作用。

**关键词:** 新一代自动测试系统; 船用雷达; 合成仪器; 增强型原位检测

## Research on the Application of the New Generation Automatic Test System in Shipborne Radar

Chen Jingyu<sup>1</sup>, Liu Shou<sup>2</sup>

(1. CSIC 723 Research Institute, Yangzhou 225101, China;

2. Beijing Aerospace Measurement and Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

**Abstract:** Based on the urgent needs of the comprehensive test of ship equipment, this paper puts forward the overall framework of the new generation of ATS, and constructs the new generation of integrated ATS equipment system; aiming at a certain type of shipborne search radar, analyzes the testing and diagnosis requirements of shipborne radar's whole/sub-system components, such as depot detection and field in-situ monitoring and evaluation, carries out the research on the adaptability and applicability of a new generation ATS, and realizes the automatic testing and enhanced performance of shipborne radar's operating frequency, power, bandwidth, noise coefficient, narrow pulse signal and other parameters, as well as BIT monitoring and evaluation function. After analysis and evaluation, the new generation of integrated automatic test system equipment system can meet the requirements of test support application in the development, test, use and maintenance stage of shipborne radar equipment, which plays an important supporting role in improving the efficiency and efficiency of test support in its life cycle.

**Keywords:** new generation ATS; shipborne radar; synthetic instrument; enhanced in-situ detection

## 0 引言

大型舰船需要保障的武器装备数量大、种类多、覆盖面广, 对测试与诊断系统从体系结构、形式、功能等方面提出了更严格的技术要求; 新一代舰载系统的出现与舰载电子装备信息化程度的大幅提升, 对一直以来以测试系统为保障装备核心的设计理念提出了很高的适应性要求; 缩短舰上装备的战术准备时间, 要求测试保障装备的设计在满足复杂测试需求的同时, 须兼顾快速部署、高效反应、快速测试诊断和降低使用人员的操作难度。这些都决定了大型舰船装备对跨平台通用测试保障需求的迫切性。

美国等发达国家, 针对舰船装备的跨平台通用测试保

障问题, 基于新一代自动测试关键技术, 开展了两期敏捷快速全球作战保障系统 (agile rapid global combat support, ARGCS) 演示验证计划, 第一期为关键技术综合集成演示验证, 综合集成了公共测试接口、合成仪器、自动测试标记语言 (automatic test markup language, ATML) 软件平台和智能测试程序集 (test program set, TPS) 等关键技术实现了跨平台通用测试和面向信号测试, 关键技术成熟度得以提升, 系统标准化信息化程度得到提高; 第二期为面向联合作战保障的综合测试系统应用演示验证, 主要是面向网络中心、联合作战保障、信息化和精确保障。而我国在适用于舰船装备跨武器平台的综合测试诊断系统构建尚不完善, 在全寿命周期纵向测试信息集成和不同装备横向跨平台测试能力方面还存在较大差距<sup>[1]</sup>。

因此, 针对舰船装备通用测试保障需求, 以舰载电子信息装备等为典型应用对象, 构建新一代开放式综合自动

收稿日期: 2020-01-07; 修回日期: 2020-02-13。

作者简介: 陈靖宇(1973-), 男, 江苏扬州人, 大学本科, 高工, 主要从事软件开发方向的研究。

测试技术体系架构, 突破并综合集成和有效应用相关关键技术成果, 研制新一代综合自动测试系统设备体系, 并针对某舰载装备开展适应性和适用性等应用技术研究具有重要意义。

## 1 舰船装备综合测试保障需求

大型舰船装备的舰基维修诊断工程将不仅仅局限于基层级维护, 舰上装备的维修深度应达到中继级修理的能力。一方面, 要通过基层级维修实现舰载机的快速再次出动, 另一方面, 要运用较完备的测试设备 ATE 和技术人员进行组件级 (LRU 或 LRM) 维修, 确保更换备件的良好性, 以满足战时与平时维护的需求。因此, 为满足舰船装备纵向跨级别的测试需求, 实现各阶段测试设备和软件的相互通用和数据共享, 是一项重要需求<sup>[2]</sup>。

舰上装备多功能、多专业的特点, 要求测试系统能够覆盖这些装备的需求, 并且具备跨平台测试的横向通用化能力。舰船装备的测试系统应在纵向测试策略的基础上, 满足横向综合测试的需求<sup>[3]</sup>。

嵌入式测试技术在舰载装备的广泛应用, 要求测试系统改变传统的模式而向与装备机内测试 (built-in test, BIT) 融合靠拢。以新型船用雷达为典型代表的舰载装备, 基于 PHM 技术的自主保障系统逐步开始应用。因此, 如何有效基于装备 BIT、各类传感器和测试数据开展面向 PHM 系统信息融合的增强型原位监测评估成为新的问题<sup>[4]</sup>。

## 2 新一代综合自动测试系统设备体系构建

### 2.1 新一代综合自动测试系统总体架构

新一代综合自动测试系统平台架构如图 1 所示。整个系统平台主要由支撑跨平台互操作的公共测试接口 (common test interface, CTI)、支撑跨平台测试的综合测试硬件平台和基于 ATML 信息框架的软件平台组成, 系统平台配合智能 TPS 可完成对不同被测对象的综合测试。

新一代综合自动测试系统平台可通过裁减、重构形成 3 种不同类型的测试设备 (PMA、PATS 和 IATS), 其上运行不同配置的软件平台, 配合运行在软件平台上的具备不同测试诊断能力的 TPS 及相关辅助设备可实现不同武器装备三级或两级测试诊断<sup>[4]</sup>。

基于 ATML 测试信息框架的软件平台, 一方面负责整个平台自动化测试任务的调度控制及测试策略的实施, 一方面构建了整个平台信息交互的框架, 定义和实现了整个系统的通用信息接口。通过这两方面的作用, 实现了整个系统

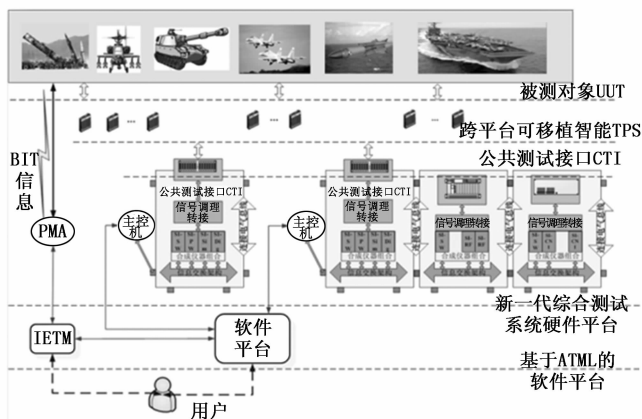


图 1 新一代综合自动测试系统总体架构

在软件应用层、支持层和信息接口层的通用性。跨平台可移植的智能 TPS, 能够在各种武器平台的测试设备之间移植、复用的 TPS。

### 2.2 基于关键要素构成视图的新一代综合自动测试系统体系结构

如图 2 所示, 新一代综合自动测试标准化体系共有 25 个左右的关键元素及其支撑标准组成。自动测试系统体系架构按照服务对象划分, 可分为 TPS 层、测试系统 ATE 层和 UUT 信息层等 3 层。各层之间的信息交互可分为物理信息和描述信息, 因此在测试系统体系结构中, 核心是以通用的、标准化的系统公共测试接口来规范信号的物理连接层; 以统一的测试信息描述框架约束测试过程中所有的信息语言交互<sup>[4]</sup>。

针对新一代综合自动测试标准化体系, 其基本特征是采用开放的体系结构、开放的标准和新一代测试技术。其实质首先是改善武器系统整个生命周期内信息流复用; 其

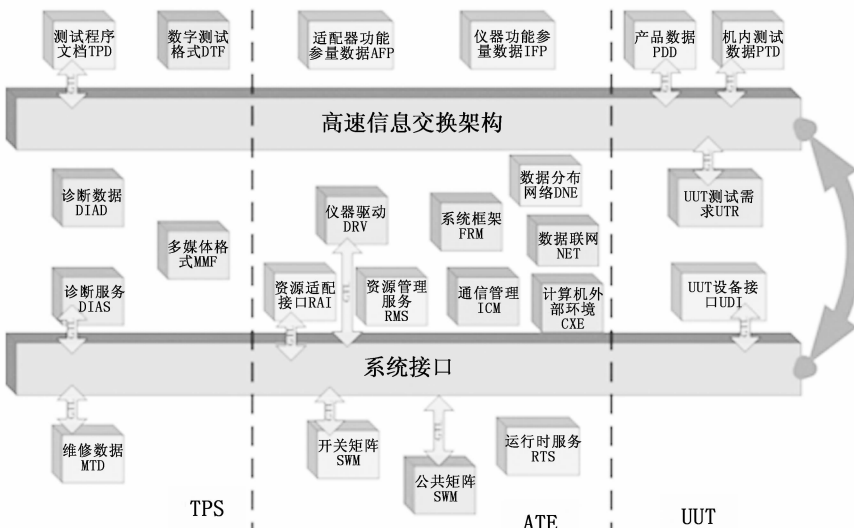


图 2 基于关键要素视图的自动测试系统体系结构

次是较大地减少 TPS 的换宿主工程成本；加强测试仪器的互操作性和互换性，而又不负担先前的 ATE 投资。

### 2.3 基于设备体系视图的新一代综合自动测试系统体系结构

物化的新一代综合自动测试系统设备体系如图 3 所示，不同类型的测试设备可以单独使用，也可以多个设备组网形成分布式综合自动测试系统，满足分布式网络化应用场景的测试需求。如便携式维修辅助设备 PMA 可独立使用，亦可与 PATS 或 IATS 之间通过 TCP/IP 协议互连互通或直接作为两级设备的主控计算机进行互操作。PATS 测试设备由组合式应用和分体式应用两种应用方式。IATS 测试设备资源配备较多功能较为强大，主要由基于 PXI/PXI-E 的基础测量单元和射频微波合成仪器为核心仪器系统，对外接口包括公共测试接口和专用测试接口两类。PATS 和 IATS 均可通过公共测试接口配合智能 TPS 完成与被测对象信息互通和综合测试功能。测试诊断数据基于 ATML 并可在各级设备之间完成信息共享和移植。

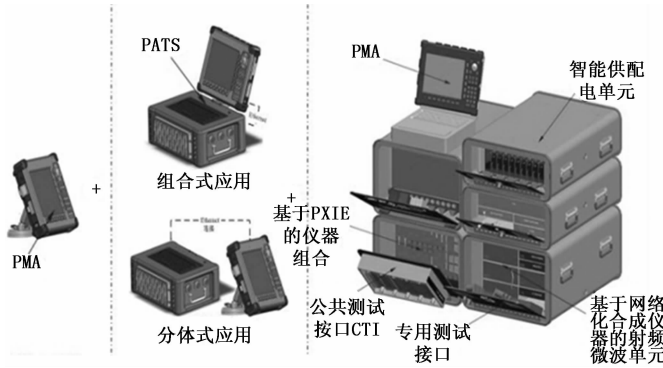


图 3 新一代自动测试系统设备体系

研制新型 PMA、PATS 和 IATS 系统平台与装备机内测试设备 (built-in test equipment, BITE) 和各类传感器共同构建了舰船装备综合测试设备体系，如图 4 所示。其中，PMA 设备基于平板电脑，综合集成了一体化多功能微型仪器主板、多点触控仪器操作、基于 ICD 数据库的装备 BIT 信息解析等关键技术，具有体积小、重量易于便携等特点，适用于装备原位测试。

PATS 设备基于 PXI/PXI-E 混合总线，具有主控型、模拟仪表型、数字总线型、数据采集型、射频频型等多个系列，可以灵活拼装构型组成不同规模的测试系统，主要用于装备原位和中继级测试维修，即可和 PMA 组合使用增强原位测试能力，又可独立作为前端设备完成前端狭小空间的长时间远距离分布式数据采集。

IATS 设备综合集成了可变规模公共测试接口 CTI、合成仪器 SI、基于 ATML 的分布式软件平台、基于高速信息交换架构的基础测量平台、智能 TPS 等系列关键技术，具备新一代综合测试系统技术特点，适用于舰船装备舰基测试维修，并可扩展应用至装备基地级维修。

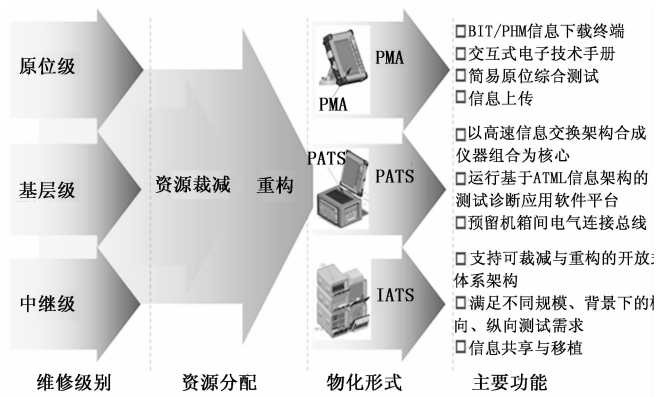


图 4 基于设备体系视图的自动测试系统体系结构

### 2.4 基于应用视图的新一代综合自动测试系统体系结构

针对舰船装备实际应用需求，综合测试系统平台应是开放式和根据实际资源需求可重构的系统，并且支持系统平台的快速裁减或扩充重构，如图 5 所示。体系结构应用将基于开放式体系架构的设备体系重构、仪器资源重构软件定义测量重构和智能 TPS 应用重构等 4 个方面解决舰船装备综合测试系统重构问题。系统可基于应用场景重构成分布式、网络化、集中式等多种形态，主要通过网络来实现设备间的信息通信以及在机械连接方面保留电气连接接口来实现；仪器资源可通过基于合成仪器技术进行硬件资源重构以及通过资源复用模式来改变接口信号规模；智能 TPS 技术可用于屏蔽由于硬件测试资源功能重构、系统扩充或形态改变后造成的硬件差异。

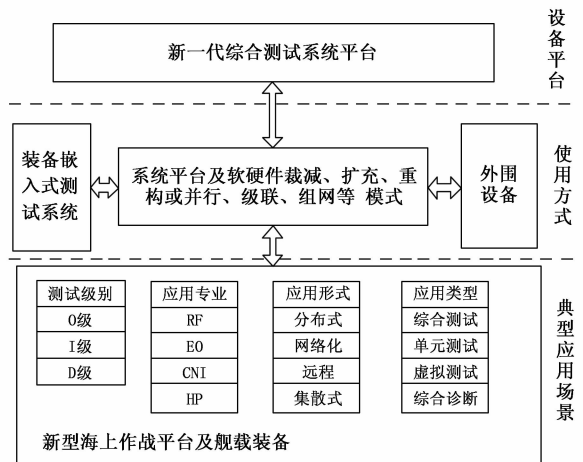


图 5 自动测试系统设备体系应用原理框图

## 3 新一代综合自动测试系统在某型船用雷达中的应用

### 3.1 船用雷达测试保障需求

#### 3.1.1 船用雷达维修保障现状与不足

随着近年我海军转型建设的深入发展，高新装备不断列装，大量新建舰艇入列，由近海向远海发展，舰队出航

时间长, 以往依靠短期靠岸维修已不能满足要求, 相应的保障面临着一系列的新需求<sup>[5]</sup>。以某型船用搜索雷达为例, 雷达交付部队后, 随部队训练、军事演习的频度提高, 远洋航行的距离变远, 出海时间不断增长, 装备的现有保障状态存在以下不足:

1) 舰员级维修水平不高: 随装备性能和复杂程度的不断提高, 维护与维修难度也在不断加大。但舰上操作空间有限、制约了现场的检测与维修排故工作, 定位故障耗时较长, 且依赖船员本身水平。

2) BIT 自动检测能力有限: 虽然船用雷达装备内部设计有机内测试功能 (BIT), 但往往只能故障发生后告警, 无法提前预知将故障消灭在发生前; 同时 BIT 虚警率较高, 缺乏故障复现手段, 故障定位能力较弱<sup>[6]</sup>。

3) 舰上测试手段受限制: 由于受限于成本、舰上空间等因素的限制, 舰员级检测手段缺乏。如需要进行全面测试, 往往需要多种检测仪表共同工作, 而这些仪表大多为试验室环境设计: 体积大、价格高、使用复杂、环境适应性差, 难以满足舰用条件的要求。

### 3.1.2 某型船用雷达综合测试需求

本文以某型军贸装备为例, 该装备在研发、生产、交付和保障阶段的综合测试需求包括:

1) 生产阶段的总装、总调测试与试验, 含整机功能/性能测试, 主要包括整机对外接口测试 (网络接口、模拟接口、时统接口、视频接口等)、基本技术指标测试 (工作频段及带宽、天线转速、天馈线参数、噪声系数、动目标改善因子和发射机功率等参数) 和内场功能测试 (中频回路功能、录取回放功能) 等;

2) 交付部队之后, 随舰保障所需的原位监测与评估, 主要包括搜索雷达工作状态监测和 BIT 信息监测上报功能测试等<sup>[7]</sup>;

3) 所需修理的典型故障 LRU 的离线测试, 如中频接收机主要包括: 噪声系数测试、接收前端动态范围测试、带宽测试和 MGC 控制等。

## 3.2 基于新一代自动测试系统的测试保障方案

### 3.2.1 某型雷达整机检测解决方案

图 6 为某型搜索雷达整机验证试验系统组成框图。该验证系统由雷达装备 (UUT)、舰船装备综合测试系统软件平台、雷达测试专用测试设备 (中频信号录取回放等)、试验用 TPS 和雷达状态监测及 BIT 信息解析软件模块等组成。

本验证方案针对某型船用雷达研制和使用维护等阶段实际测试保障需求, 指出现有测试保障亟待解决的问题, 提出基于新一代综合自动测试系统的验证试验方案, 明确了包含舰网接口、噪声系数、工作频率、带宽、功率等测试项目/参数, 分析确认了每个项目/参数的测试方法、步骤和结果判据。验证系统可开展的试验包含搜索雷达整机

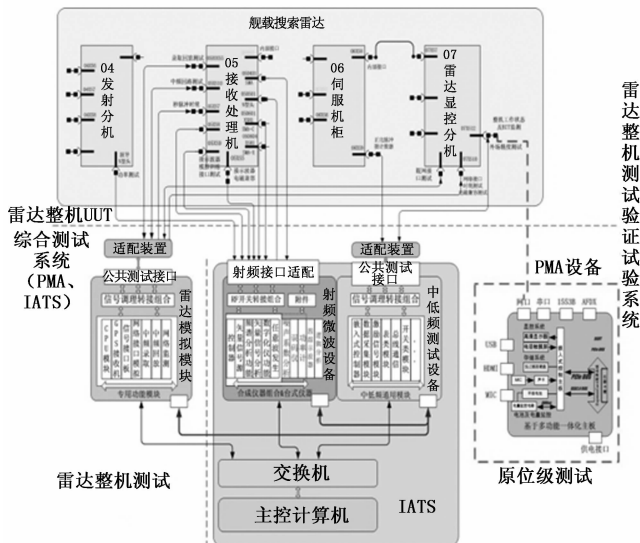


图 6 雷达整机测试验证试验组成框图

原位 BIT 解析与状态监测, 内场整机对外接口测试、雷达内场基本技术指标测试等<sup>[8]</sup>。

### 3.2.2 增强型原位检测解决方案

雷达增强型原位测试包含, 雷达工作环境监测和运行状态检测评估。解决方案如图 7 所示, 针对雷达原位测试需求, 在雷达状态监测端由便携式辅助设备 PMA 设备和便携式测试系统 PATS 配合完成雷达原位测试中传感器非电量信号采集和雷达 BIT 信息下载、解析。增强型原位测试中, 传感器布置在冷却机柜及雷达天线平台。主要监测项目为: 外循环水温度、供水进出口压力、流量等, 海水过滤堵塞, 气象参数、桅杆姿态和天线平台振动、倾角等参数。雷达工作运行状态及当前气象参数均以 BIT 信息格式由 PMA 通过网络从雷达 BIT 网络报文接口下载。

所有信号在数据采集端设备中汇集, 作前端处理后由组网模块通过以太网发送到 IATS 服务器端。同时将雷达环境监测状态信息发送到原位测试 PMA 设备, 结合雷达整机 BIT 信息进行状态监控与故障推理诊断。IATS 服务器端同时通过网络收集设备内部状态数据进行汇总处理。另外, 雷达关键参数信息或故障预警信息可以通过无线传输的方式, 发送到手持式设备 IPAD 上, 方便舰员远程实时监控雷达状态。

## 3.3 船用雷达综合测试结果及部分关键技术

### 3.3.1 基于合成仪器的微波参数测试技术

合成仪器分系统基于软件无线电和射频综合技术, 将频谱分析仪、矢量微波信号源、矢量信号分析仪、噪声系数分析仪等台式射频频微波仪器以通用模块化仪器来实现<sup>[9]</sup>, 总体架构如图 8 所示。

合成仪器分系统集成高性能基带信号发生器、数字化仪、高性能本振、上下变频器、微波开关及功率调节等系列模块, 可以合成频谱分析、矢量信号分析、矢量信号源、

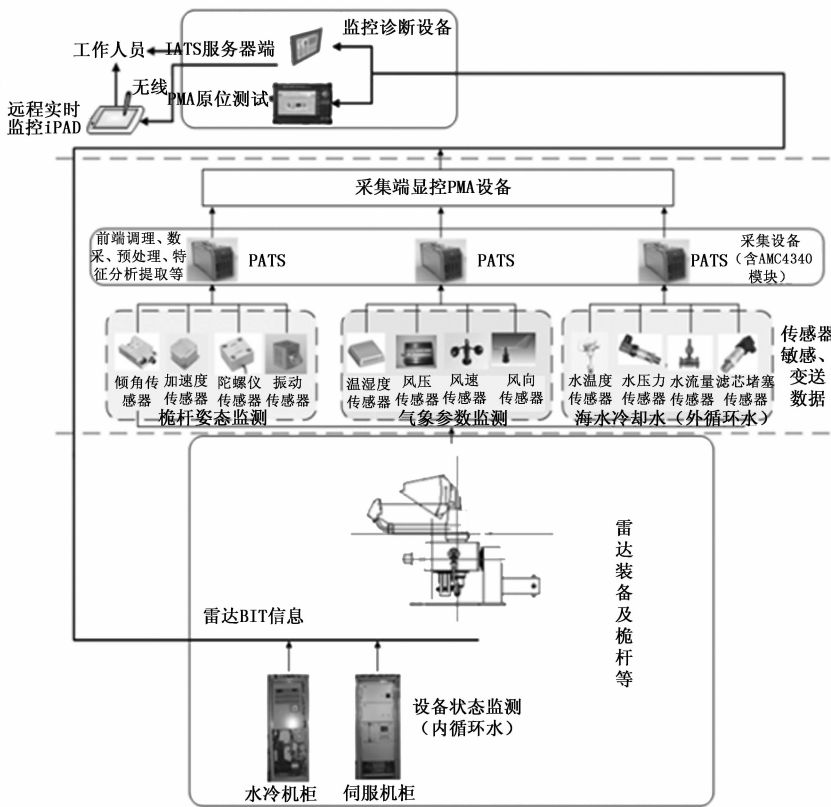


图 7 船用雷达增强型原位检测系统架构框图

谱分析仪、微波信号源和噪声系数分析仪等台式仪器<sup>[10]</sup>, 实现了船用雷达工作频段及带宽、发射机功率、接收机噪声系数等十余项微波参数测试功能<sup>[11-12]</sup>。

以接收机噪声系数测试为例, 根据与是德科技台式仪器 N8975A 测试结果相对比, 如表 1 所示, 噪声系数偏差在 0.4 dB 以内, 增益偏差在 -1.5 dB 以内, 满足使用要求<sup>[11]</sup>。

### 3.3.2 基于信息融合的增强型原位检测与故障诊断技术

某型船用雷达增强型原位检测试验, 针对雷达 BIT 测试覆盖能力不足 (如缺少机械、机电部分) 的问题, 新增了传感器和机械/机电数据分析功能, 用于雷达内外部工作环境状态监测<sup>[13]</sup>, 并在 PMA 上实现与 BIT 的融合和基于交互式电子技术手册 (Interactive Electronic Technical Manual, IETM) 的推理诊断。工作原理如图 9 所示, PMA 和 PATS 配合完成雷达原位测试中传感器非电量信号采集及雷达 BIT 信息下载、解析。可实现机内测试与外部传感器状态监测相结合的系统级故障诊断, BIT 数据与地面测试相融合以及分布式传感器环境状态数据监测等功能。

传感器环境状态数据监测等功能。

表 1 噪声系数测量结果对比节选

| 频率 /GHz | N8975A 噪声系数 /dB | N8975A 增益 /dB | 合成仪器 噪声系数/dB |       | 合成仪器 增益/dB |        |
|---------|-----------------|---------------|--------------|-------|------------|--------|
|         |                 |               | 测量值          | 偏差值   | 测量值        | 偏差值    |
| 6.5     | 3.420           | 91.878        | 3.60         | 0.180 | 90.57      | -1.308 |
| 6.625   | 3.428           | 91.884        | 3.78         | 0.352 | 90.41      | -1.474 |
| 6.75    | 3.454           | 91.865        | 3.52         | 0.066 | 90.73      | -1.135 |
| 6.875   | 3.442           | 91.875        | 3.82         | 0.378 | 90.53      | -1.345 |

原位测试中传感器布置在冷却机柜及雷达天线平台, 主要环境监测项目为: 外循环水参数、气象参数、桅杆参数和天线平台等参数, 该类参数经过前端数据采集变换存储并经过规则运算后, 将非电量状态参数通过报文发送到。图 10 为内外部环境装备监测评估服务器端软件界面示意。状态监测 PMA 设备监测雷达相关状态, 并向综合测试系统上报整机工作状态和 BIT 信息, 并根据 BIT 故障信息, 分析给出故障定位。

以发射机柜信息融合诊断为例, 解析结果显示试验中水冷机柜整体报故。为进一步隔离故障, 在软件中点击上述途中故障信息将自动打开交互式电子手册, 基于故障树信息融合进行故障隔离, 并给出维修辅助决策。图 11 为

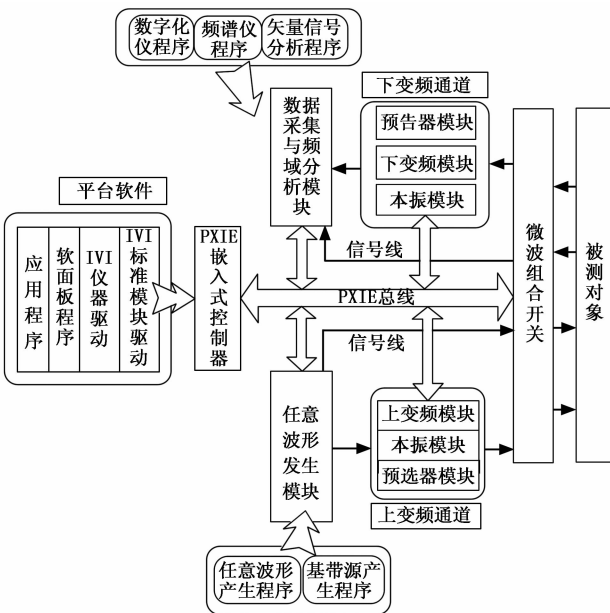


图 8 模块化合成仪器总体架构框图

噪声系数分析等仪器功能, 信号分析频率范围 1 MHz~18 GHz, 信号源频率范围 1 MHz~18 GHz, 并分段设计, 可灵活组合成不同波段、不同体积规模的仪器。并可通过微波组合开关进行通道扩展。

合成仪器从功能上可以替代体积较大、价格昂贵的频

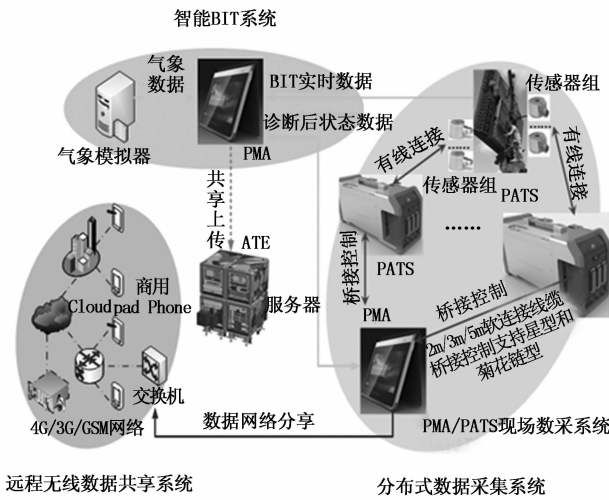


图 9 某型船用雷达增强型原位检测工作原理图

IETM 执行故障隔离的过程及结果, 从图中结果可看出软件可对雷达 BIT 信息进行故障隔离, 准确进行故障定位。



图 10 增强型原位检测服务器端界面图

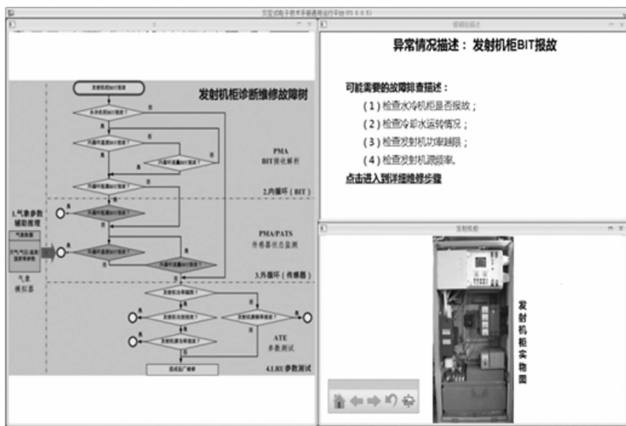


图 11 基于 BIT 和环境信息融合的发射机柜交互式故障诊断案例图

### 4 结束语

本文通过分析船用雷达测试保障需求, 给出了船用雷达综合测试系统解决方案。提出并构建了基于传感器、BITE、PMA、PATS 和 IATS 的舰船装备综合测试系统设备体系模型和基于 ATML 软件、PXI-E 仪器、SI (合成仪器)、CTI (公共测试接口)、智能 TPS 等新一代测试技术要素的技术体系模型。

经分析评估, 新一代综合自动测试系统设备体系可以满足船用雷达装备研制、试验和使用维护阶段测试保障应用, 对提升其寿命周期内的测试保障效率和效能具有重要支撑作用。可提升舰船装备纵向测试集成和横向跨平台测试能力, 并可拓展应用于其他新型武器装备, 可为通用测试技术研究成果的推广应用起到有效的示范作用。

### 参考文献:

[1] 刘 收, 陈 斐, 等. 武器装备横向通用化综合测试与保障体系研究 [R]. 中国国防科学技术报告, 2012.

[2] 张彦宏, 赖长江, 等. 海上舰船装备维修保障建设探讨 [J]. 装备环境工程, 2007, 4 (4): 81-84.

[3] 丁国胜, 陈 栋. 舰载雷达一体化综合保障模式探讨 [J]. 信息化研究, 2009, 35 (8): 1-4.

[4] 刘 收, 陈 斐, 等. 新一代综合测试系统体系结构与关键技术研究 [A]. 总装通用测试与故障诊断技术研讨会论文集 [C]. 2012: 1-5.

[5] 邓 斌. 雷达性能参数测量技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.

[6] 郭衍莹. 相控阵雷达测试维修技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

[7] 陈 军. 舰载雷达自动测试系统设计 [M]. 南京: 南京理工大学, 2010.

[8] 刘 收, 陈 斐, 蔡栋生, 等. 新一代自动测试系统平台构建技术研究 [R]. 中国国防科学技术报告, 2012.

[9] 辛丽霞, 刘金川, 等. 基于合成仪器的可互换虚拟仪器软件研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 617-623.

[10] 黄 坤, 刘 咏, 等. 雷达接收机自动化噪声系数测试方法与实现 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9 (18): 5518-5520.

[11] 辛丽霞, 史 浩, 刘金川. 基于合成仪器的噪声系数分析 [R]. 中国国防科学技术报告, 2014.

[12] 史 浩, 辛丽霞, 刘金川. 基于合成仪器的雷达脉冲检测装置 [R]. 中国国防科学技术报告, 2015.

[13] 王丹梅, 萧海林. 雷达环境监测系统构建研究与设计 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21 (3): 81-83.