

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105645

相控阵雷达系统的 BIT 设计和故障诊断方法

苏洲阳

(中国电子科技集团公司第二十研究所 西安 710068)

摘要:良好的机内测试(BIT)设计和合理的故障诊断方法选择能够有效提升相控阵雷达系统的故障检测和诊断能力。本文阐述了雷达系统 BIT 设计的基本思路,针对某多功能相控阵雷达的基本组成和功能特点,设计了集中控制和分级检测相结合的分布式 BIT 结构以及相应的 BIT 工作流程,并且介绍了不同故障诊断方法的选择依据。通过基于故障注入的实验验证,该雷达 BIT 系统的故障检测率 $\geq 95\%$,故障隔离率 $\geq 90\%$ (隔离到 3 个 LRU), $\geq 85\%$ (隔离到 1 个 LRU),故障虚警率 $\leq 5\%$,满足雷达总体的要求,结果证明了该雷达 BIT 设计的有效性。最后展望了未来相控阵雷达系统故障检测与诊断技术发展的重点方向。

关键词:相控阵雷达;机内测试;故障诊断

中图分类号: TN952 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.70

The BIT design and method of diagnosing faults of phased-array radar

Su Zhouyang

(No. 20th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710068, China)

Abstract: The good design of built in test (BIT) and fault diagnosis is an important way to achieve the better testability and maintainability of phased array radar. This paper presents the basic idea of BIT design of radar system. Aim at the composition and function of a multi-functional phased array radar, This paper designed a distributed BIT structure combining centralized control and hierarchical detection and the corresponding BIT workflow, and the selection basis of different fault diagnosis methods. Through the experimental verification based on fault injection, the fault detection rate of the radar BIT system is greater than 95%, the fault isolation rate is greater than 90% in the case of isolation to 3 LRU, greater than 85% in the case of isolation to 1 LRU, and the fault false alarm rate is greater than 5%, which meets the overall requirements and proves the effectiveness of the design of the BIT. At last, it looks forward to the improvement direction of on-line testing and fault diagnosis technology in the phased array radar system.

Keywords: phased-array radar; built in test; fault diagnosis

0 引言

相控阵雷达自从 20 世纪 60 年代诞生以来,经过数十年的发展,国内外相控阵雷达先后经历了机械扫描体制、真空管无源相控阵体制、固态有源模拟相控阵体制、数字阵列体制,集成度和数字化程度越来越高,对测试性、维修性、可靠性的要求也越来越高^[1]。

在相控阵雷达系统的设计中,良好的测试性设计是提高维修性、任务可靠性的关键,综合保障资源和维修人力都可以有效降低。文献[2-3]提出机外测试在故障定量检测和检测深度方面有优势,但由于其难以快速、准确地进行故障诊断,可以作为机内测试(built in test, BIT)的补充手段。

文献[4]表示良好的 BIT 设计和故障诊断方法使雷达系统具备内部进行故障检测、隔离或诊断的自动测试能力,在雷达各分系统内部设计 BIT 模块,通过设置故障检测点、加入自检测试信号等方式,再结合软件上的计算处理,实现对雷达系统整体和各分机工作状态、实时性能进行监测,自我辨识运行状态,快速定位故障,有效减少测试时间、提高故障检测率和隔离率。本文综合阐述了雷达系统 BIT 设计的基本思路,针对某多功能相控阵雷达的基本组成和功能特点,设计了集中控制和分级检测相结合的分布式 BIT 结构以及相应的 BIT 工作流程,并且介绍了不同故障诊断方法的选择依据。通过基于故障注入的实验验证了该雷达 BIT 系统的故障检测率、隔离率、虚警率,均满足雷达总体要求。

收稿日期:2021-01-02

• 172 •

1 雷达系统 BIT 设计原则

雷达系统的 BIT 设计的主要目标是提高性能监控、工作检查和故障隔离的能力,使系统具备完善的状态监控、故障检查、故障隔离和故障预测的能力。在雷达系统的 BIT 设计中,既希望能对系统状态进行全面监控,故障发生时可以进行完善的检测和定位,又要权衡设置故障检测点对系统可靠性、实现难易程度和费用的影响。简而言之,雷达系统 BIT 设计应遵循以下原则:

- 1) BIT 系统作为全局性的系统,应与整个雷达系统从方案论证开始就同步设计,各功能模块中的 BIT 检测点也应与模块设计同步展开。
- 2) 设置 BIT 检测点应该做到故障检测与性能检测相结合, BIT 检测不能影响雷达系统主通道工作。
- 3) 设置 BIT 的检测点应该硬件、软件检测相结合,要尽量覆盖全面,又降低检测成本和实现难度。
- 4) BIT 模块应注重通用性、兼容性和扩充性,可以适用不同使命、不同体制的雷达系统。
- 5) 雷达系统方案论证、系统或分系统设计应为 BIT 模块设计预留足够的余量空间。

除了以上原则外,相控阵雷达系统的 BIT 设计,尤其是大型相控阵雷达,都会采用二级检测方式, BIT 结构遵循集中控制与分级检测相结合的原则,各分系统有独立监测 CPU,可独立检测,分系统的信息又集中到系统级 BIT 处理。这种分布式检测,集中控制和处理的方案,可以保证检测的覆盖面足够全面,又容易做到 BIT 模块的标准化,顺应模块化发展的需要;同时雷达系统整体的串联结构,无法孤立的看待某一处故障,汇集各个分系统的信息并加以综合,才能做到故障定位、提高检测概率、降低系统的虚假概率,改善系统的维修性,提高系统的可用度^[5-7]。

2 相控阵雷达系统基本组成和 BIT 结构

某多功能相控阵雷达兼具搜索、跟踪、模拟对抗等功能,采用电扫描与机械扫描结合的扫描体制,相控阵天线阵面采用子阵级数字阵列体制,可以完成多波束在方位和俯仰方向上的相扫,在需要高数据率跟踪时,又可通过伺服传动分系统控制天线阵面进行机械转动,完成随动跟踪。该雷达系统主要由天线阵面、频率源、阵面控制、阵列处理、信号处理、数据处理、中心控制、显控终端、伺服传动、冷却、电源等分系统组成,图 1 所示为其系统架构。

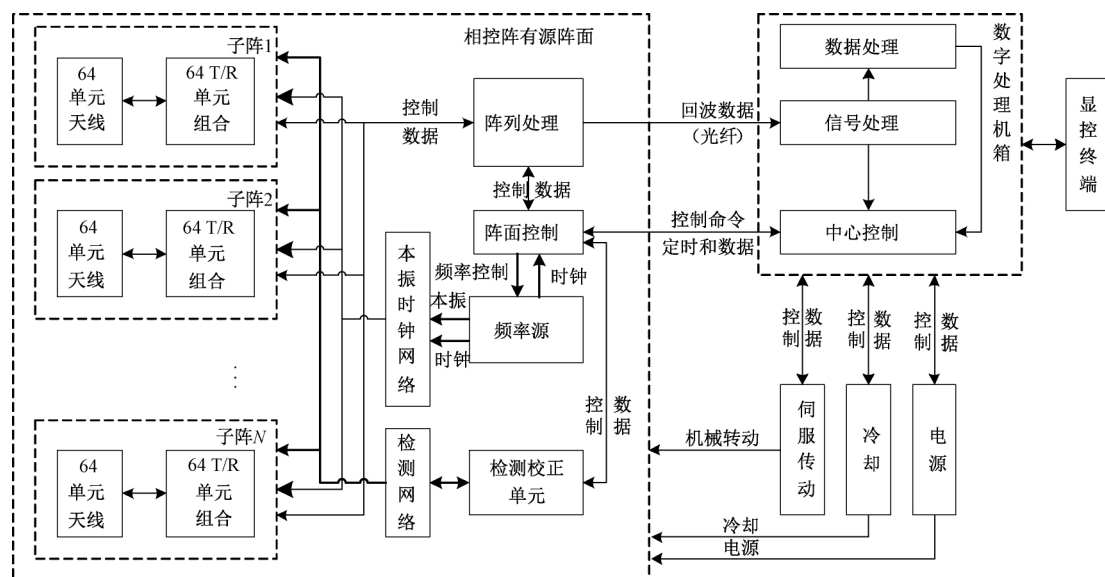


图 1 某多功能相控阵雷达系统架构

中心控制分系统对显控终端的控制命令进行解析,将工作模式、控制命令等提前发送到阵面控制分系统,由阵面控制分系统转发给频率源、阵列处理分系统。发射模式下频率源分系统产生各种本振、时钟通过本阵时钟网络送至各数字子阵,还包括各种时序同步信号,同时各数字子阵还收到阵面控制分系统计算出的发射波束所需的控制字,数字子阵中在波形产生时预置相位、幅度,经上变频、功率放大后由天线单元发射出去,在空间合成为发射波束;接收模式下每个天线单元接收的信号在各数字子阵中经过下变频、AD 采样后形成数字数据,送至阵列处理分

系统形成和路、方位差路、俯仰差路、辅助通道等信号数据,送至信号处理、数据处理等分系统进行数字处理,数据处理分系统形成目标航迹,最后送至显控终端进行显示。不同工作模式下,中心控制还要控制伺服传动分系统完成相应的机械动作。

参照文献[8]中介绍的数字阵列雷达 BIT 设计,本雷达系统的 BIT 设计与主通道功能设计紧密结合,坚持集中控制与分级检测相结合的设计原则,采用分系统级、模块级二级监测方式,各分系统具备自检能力,具有外场可更换单元(line replaceable unit, LRU)故障隔离能力,各分系

统 BIT 设计分系统级测试管理器,对各模块故障检测点进行监测和 BIT 信息初步管理,受中央 BIT 管理器控制可以启动分系统自检功能。位于中心控制分系统的中央 BIT 管理器则对各个分系统 BIT 信息进行深度分析和综合管理。由于相控阵有源阵面与数字处理机箱、伺服传动、冷却、电源、显控终端等,分处舱内舱外,通过光纤进行通信,因此设计阵面控制分系统对子阵、阵列处理、频率源等分系统的 BIT 信息进行收集管理,作为整个相控阵有源阵面的“中央 BIT 管理器”,其他分系统则直接受中央 BIT 管理器控制,采用网络通信。

T/R 组件作为相控阵雷达的基本构造单元,数量多、故障检测点多、维修困难,是相控阵雷达分系统 BIT 设计的重中之重^[9]。本雷达采用数字子阵形式,每个子阵都包含独立的 BIT 系统,可以独立地完成故障定位,降低了系统的复杂度和成本,具有良好的可靠性。数字子阵是本雷达系统的关键部件,主要分为发射功能和接收功能:发射功能主要由数字频率合成器(direct digital synthesizer, DDS)、上变频模块和功放器件等组合完成;接收则是低噪放、下变频模块和 AD 等完成。发射通道检测和接收通道检测是数字子阵最重要的 BIT 检测项,但它的检测与主通道工作无法同时进行,因此系统设计了检测校正单元来辅助发射通道和接收通道以自检模式来实现 BIT 检测。由阵面控制分系统控制发射通道产生射频自检信号,检测校正单元接收该信号进行下变频、数字化处理后送阵面控制分析后给出检测结果,并送至中央 BIT 管理器;接收通道自检则是通过控制检测校正单元发射射频自检信号,接收通道接收该信号进行下变频、数字化处理后送阵面控制分析后给出检测结果,并送至中央 BIT 管理器。

3 BIT 工作流程

本雷达系统为满足测试性需求,设计 BIT 工作流程如图 2 所示,从 BIT 执行的时机可以分为加电 BIT、周期性 BIT 和启动 BIT^[10]。

加电 BIT 为在系统加电后,各分系统开始进行初始化和自测试,把结果上报给中央 BIT 管理器进行分析处理,只有各分系统都正常才进入正常工作模式。包括相控阵雷达的初相补偿、各数据接口通信状态、频率源分系统的时钟信号和本振信号等。

周期 BIT 是在正常工作状态下的检测方式,不影响设备正常工作,在不同工作模式下实时监测各故障检测点状态,周期性汇报给中央 BIT 管理器,当出现非正常状况时,及时判断故障类型和故障位置。周期 BIT 主要针对影响雷达系统工作的关键测试项,如冷却温度、电源输出、本振信号、系统时钟、T/R 通道温度等,以及需要结合不同工作时段进行的功能检测,如阵列处理分系统的 DBF,信号处理分系统的脉压、FFT 等。

中央 BIT 管理器作为整个雷达系统的测试管理设备,

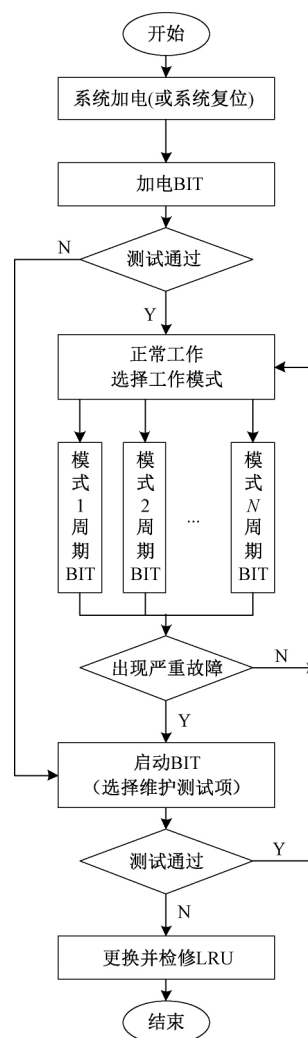


图 2 某多功能相控阵雷达系统 BIT 工作流程

多级 BIT 测试信息和初步分析结果,最终都汇总到中央 BIT 管理器进行深度分析和综合管理。启动 BIT 是指由中央 BIT 管理器启动的系统级 BIT 检测模式,这种模式需要利用整个系统的软硬件资源对系统功能、分系统功能进行检测,需要停止雷达正常工作,针对 BIT 测试项另行安排工作时序的测试方式,对雷达系统的特定功能或工作方式进行检测,实现故障的深度检测、隔离、确认和排除。通常是出现影响雷达系统正常工作的故障或需要对整个雷达系统进行性能检测时,可以选择进入这种维护模式,通过人工控制,根据不同维护测试项模拟产生测试信号对相应分系统或功能模块进行检测,精确定位故障。比如各分系统或几个分系统组合的自检和检测整机功能的模拟目标自检、中频模拟目标自检等。

4 故障诊断方法

良好的 BIT 设计保证了故障检测点的覆盖面,是确保故障诊断快速、准确的基本条件。雷达系统的功能往往是

以一种串联结构完成的,各种信号都存在串联、交联的关系,故障基本都具有一定的相关性,所以故障诊断的关键就是作合理的相关处理。故障诊断方法主要有故障字典诊断、故障树诊断、贝叶斯网诊断等。

前两种方法使用起来比较方便,但需要繁杂且详细的前期准备,在雷达系统设计过程中以可靠性分析为基础进行充分的逻辑相关。故障字典诊断是指像字典一样建立故障的模式或特征与检测结果之间的相关关系,出现故障时像字典检索一样,根据实际的测试结果寻找相应的故障

模式。故障树是某个系统故障模式与所属部件故障关系事件的树根状逻辑图,描述了故障根源和表象的关系。故障树诊断就是根据系统实际的各种故障表象(顶事件)沿着故障树逐级判断,最终找到故障根源(底事件)。建立故障树时常常先以分系统故障为顶事件进行分析,再进行整个相控阵雷达系统的综合,找出系统的各种故障模式的相关性,最终以故障树遍历的方式实现故障诊断^[11]。以本雷达系统子阵为例,故障树如图 3 所示,其中为图示方便,仅以一个 T/R 组件为例,实际子阵中包含多个 T/R 组件。

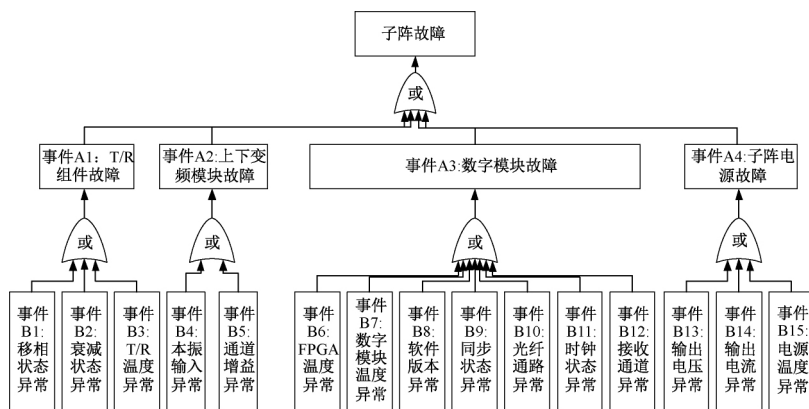


图 3 子阵故障树

贝叶斯网络可以节约概率推理计算,采用网络结构直观表达变量的联合概率分布和条件独立性。故障诊断的贝叶斯网络是建立故障模式与测试结果之间的关系网络,用条件概率来描述两者之间的关系。故障字典和故障树诊断都是假设故障模式与测试结果之间是确定性关系,而在贝叶斯网诊断中并不认同这种假设,而是通过测试结果与故障模式之间的不确定关联关系推理计算得到每个可疑故障模式的概率并进行排序,从而达到故障隔离的效果。建立贝叶斯网需要不确定关系数据,对于大型的相控阵雷达系统,建立网络和利用贝叶斯公式计算概率都比较耗时,因此这种方法只适合处理特定模糊组^[12]。

5 实验结果

本雷达系统对 BIT 的定量指标要求是:故障检测率 $\geq 95\%$;故障隔离率 $\geq 90\%$ (隔离到 3 个 LRU), $\geq 85\%$ (隔离到 1 个 LRU);故障虚警率 $\leq 5\%$ 。本雷达故障检测点分布如表 1 所示,针对雷达总体对 BIT 系统的指标要求,采用基于故障注入的验证方法进行验证,根据各类故障的覆盖率要求注入足够多的故障。

按照 BIT 工作流程进行,分别统计 BIT 的故障检测、隔离和虚警数据,再根据相应公式计算概率,试验结果如表 2 所示,故障检测率、隔离率、虚警率均满足本雷达系统的定量指标要求,实验结果证明了本雷达 BIT 系统设计的有效性,能将故障迅速定位到 LRU,指导维修人员进行换件维修,其设计方法也可以应用到其他相控阵雷达系统的 BIT 设计中,具有一定的实用价值。

表 1 某多功能相控阵雷达系统故障检测点分布

分系统	模块名称	模块数量	故障检测点数量
天线阵面	T/R 组件	8	3
	上下变频模块	4	2
	数字模块	1	5
	子阵电源	1	3
频率源	检测校正模块	1	5
	频率源模块	1	8
阵面控制	阵面控制模块	1	4
	上光端机	1	3
阵列处理	电源模块	1	3
	DBF 模块	2	4
信号处理	定时模块	1	4
	下光端机	1	3
数据处理	信号处理模块	3	3
	存储板	1	2
中心控制	电源模块	1	3
	数据处理模块	2	3
伺服传动	中心控制模块	1	3
	电源模块	1	3
显控终端	伺服处理模块	1	4
	接口板	1	3
冷却	显控台	1	3
	冷却机柜	1	6
电源	AC-DC 电源	8	4

表 2 某多功能相控阵雷达系统 BIT 指标验证统计

统计项目	符号与公式	数据
雷达真实故障总数	N_T	200
BIT 系统报告故障总数	N_B	206
BIT 系统正确检出故障总数	N_{FD}	193
BIT 系统隔离故障总数 (隔离到 3 个 LRU)	N_{FL3}	182
BIT 系统隔离故障总数 (隔离到 1 个 LRU)	N_{FL1}	169
BIT 系统虚警数	N_{FA}	6
故障检测率	$\gamma_{FD} = N_{FD}/N_T$	96.5%
故障隔离率(隔离到 3 个 LRU)	$\gamma_{FL3} = N_{FL3}/N_{FD}$	94.3%
故障隔离率(隔离到 1 个 LRU)	$\gamma_{FL1} = N_{FL1}/N_{FD}$	87.6%
故障虚警率	$\gamma_{FD} = N_{FA}/N_B$	2.9%

6 结 论

本文介绍了雷达系统的 BIT 设计原则、某多功能相控阵雷达系统的 BIT 设计和故障诊断方法,该雷达系统的故障检测率、隔离率和虚警率均符合总体要求。随着雷达数字化进程的不断演进,相控阵雷达系统在线测试和故障诊断的发展仍然面临巨大的挑战,在以下 3 个方向还有很多工作可以开展。

1) 远程诊断与故障诊断专家系统相结合现代战争强调协同作战能力,多平台间要做到信息融合共享,相控阵雷达系统正在向各种新型作战平台扩展,急迫地需要能够远程对故障进行诊断,信息汇总到故障诊断专家系统,使故障检测和诊断更加自动化、智能化^[13-14]。

2) 目标向故障预测和健康管理转移传统的基于传感器的诊断正在逐渐转向基于智能系统的预测,以后基于状态的维修将取代目前由故障事件主宰的维修(即事后维修)或时间相关的维修(即定期维修)。

3) 现有系统的 BIT 优化设计通过将系统级故障、工作模式与测试资源进行最优结合,实现系统级测试资源的优化,在不增加测试性硬件成本的条件下提高故障隔离能力^[15]。

参考文献

- [1] 邵春生. 相控阵雷达研究现状与发展趋势[J]. 现代雷达, 2016, 38(6):1-4.
- [2] 翟桂全, 尹波, 王艳萌. 一种机载雷达便携式维修辅助系统设计[J]. 电子测量技术, 2017(8):94-97.
- [3] 肖圣兵. 某型雷达通用自动测试系统的设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4):96-100.
- [4] 赵继承, 顾宗山, 吴昊, 等. 雷达系统测试性设计[J]. 雷达科学与技术, 2009, 6(3):174-179.
- [5] 齐兴龙, 王春丽, 王润澜. 某型火控雷达综合测试系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(7):45-47, 51.
- [6] 高政民, 张克军. 舰载综合测试系统设计与实现[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(6):165-167, 191.
- [7] 王燕, 宋小安, 曹子剑. 某两型雷达综合测试系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(11):117-121.
- [8] 黄正英. 数字阵列雷达系统的 BIT 设计[J]. 数字技术与应用, 2012, 5:124-125.
- [9] 洪畅, 王志刚, 朱庆彬, 等. CAN 总线在 T/R 组件故障检测系统中的应用[J]. 雷达与对抗, 2018, 38(3):31-33.
- [10] 王燕. 一种远程相控阵雷达的自动化测试与故障诊断方法[J]. 电子测量技术, 2010, 33(1):129-132.
- [11] 袁玉勇, 李开宇, 刘文波. 光电雷达电子部件故障树分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(6):149-152.
- [12] 何其或. 基于诊断树与贝叶斯网的相控阵雷达中央 BIT 诊断系统设计[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- [13] 冯乾. 分析雷达故障检测与诊断技术及新发展[J]. 电子元器件与信息技术, 2018, 8(14):18-20.
- [14] 李浩, 邱超凡. 雷达故障检测专家系统设计[J]. 雷达科学与技术, 2011, 4(2):99-103, 108.
- [15] 陈光辉, 宋小梅. 新型雷达系统 BIT 优化设计技术研究[J]. 现代雷达, 2016, 38(6):75-77, 82.

作者简介

苏洲阳, 工程硕士, 工程师, 主要研究方向为雷达总体设计、雷达数据处理等。

E-mail: qin7shang@163.com