

基于健康管理的有源相控阵雷达威力性能评估方法

王索建

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 针对有源相控阵雷达一类的复杂电子系统, 设备的维修是产品全寿命周期内最核心的工作之一; 装备的过维修或欠维修, 都将对装备的使用造成影响, 同时提高了保障费用; 文中提供了一种基于健康管理的雷达威力性能评估方法, 通过对有源相控阵雷达的健康管理系统的参数获取、分析和知识挖掘, 进而提升雷达全寿命周期保障的自动化、智能化水平, 达到降低全寿命周期费用, 提高装备作战效能的目标。

关键词: 相控阵雷达; PHM; 性能评估; 故障预测和健康管理

Phased Array Radar Range Performance Evaluation Method for Radar Health Management

Wang Suojian

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

Abstract: For the complicated electronic system such as active phased array radar, equipment maintenance is one of the core working in the full life circle of product. Over or under maintenance for equipment would affect the usage of equipment, while increase the cost of support. This paper provides one evaluation method for radar power performance based on health management, through parameter attaining and analysis from health management system and knowledge excavation. Thus it can increase the automation and intelligence level of the whole life circle for radar support, and decrease the cost, so as to promote the purpose of equipment operational effectiveness.

Keywords: phased array radar; PHM; performance evaluation; fault predict and health management

0 引言

近年来, 随着部队实战化训练要求以及设备复杂性增加, 装备保障任务急剧增加, 对装备保障和使用部门带来极大的压力。有源相控阵雷达作为作战系统的核心传感器, 担负战备任务多、使用频率高, 必须时刻保持良好的作战状态, 迫切需要采用故障预测和健康管理 (PHM) 方法, 提高自主式保障能力, 降低保障的压力, 提升保障效率。

故障预测与健康管理工作早在 2000 年就被列入美国《军用关键技术》报告, 美国国防部将嵌入式诊断和预测技术视作降低寿命周期费用和实现最佳战备完好性的基础, 明确确立了装备健康管理是实现武器装备战备完好性和经济性的重要地位。目前故障预测与健康管理工作已经成为美国国防部采购武器系统一项要求, 是下一代舰船、车辆特别是飞机等系统设计和使用的极为重要一部分。健康管理的内涵主要包含以下几个方面:

1) 故障检测技术: 通过对设备的状态监视, 并结合专

业的测试手段以及系统级测试、分析, 获得故障检测结果。

2) 综合诊断技术: 通过收集和处理关键设备的性能信息 (单点故障等), 预计部件寿命并为预防性维修提供技术支持, 为备件筹备提供理论依据。

3) 基于数据的决策技术: 建立历史故障信息的故障库, 通过专家支持系统分析, 提供预测结果并对可用资源和使用需求提供决策, 即实现装备健康管理。

1 传统雷达的 BIT 设计

雷达 BIT 的任务就是故障检测与故障隔离 (隔离到可更换单元), 能够及时发现整机及各子系统的故障, 迅速、准确地将故障隔离到最小可更换单元。BIT 系统结构层次一般由 LRU 级 BIT、分机级 BIT 和整机级 BIT 形成。LRU 级 BIT 是这种分层式设计 BIT 的最底层, 是整个系统的基础; 各级 BIT 之间通过总线连接。雷达工作后, 雷达分机监测模块自动工作, 低一级的 BIT 将其结果传给上一级的 BIT 和整机 BIT 进行分析; 整机 BIT 综合分析各子系统级 BIT 的信息, 通过逻辑判断给定相应的故障信息和隔离信息, 得出最终结论。传统雷达 BIT 结构框图如下图 1 所示。

在流程的设计上, 一般情况下雷达 BIT 设计包括加电 BIT、周期 BIT、启动 BIT 和故障隔离程序; 加电 BIT 是在

收稿日期: 2018-08-21; 修回日期: 2018-09-05。

作者简介: 王索建 (1979-), 男, 山东单县人, 高级工程师, 主要从事雷达系统总体设计方向的研究。

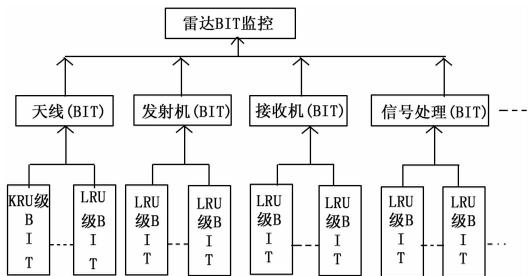


图 1 雷达系统 BIT 结构示意图

系统开机之初对雷达各系统进行的详细检测，以确定雷达是否进入正常工作状态；周期 BIT 是定期对雷达各系统的设定点进行测试和检查，以确定雷达在运行过程中的状态；启动 BIT 是在加电 BIT 和周期 BIT 的基础上，对各系统及功能模块进行的检测，粗略进行故障隔离和定位，为故障隔离 BIT 提供可靠的依据；故障隔离程序是在启动 BIT 无法将故障定位到最小可更换单元时，通过启动运行故障隔离程序，精确定位故障。

传统的雷达 BIT 设计，主要是通过对关键的 LRU 功能进行监视、测量对设备状态好坏进行判断，机内 BIT 对于一些性能指标很难进行定量检测或检测深度不够，同时缺乏对整个装备的系统性能评估和支持，可能出现在 BIT 无明显故障征兆的情况下而整机性能的变化（下降），这直接影响着雷达的作战能力^[1]。如在一般的监视雷达中，如果通道一致性不好会使雷达对目标的跟踪发生偏差，导致测高不准；在制导雷达中，类似的故障现象会导致目标无法实现正常的跟踪，导致作战系统无法实现目标打击。因此基于整个雷达系统关键性能技术指标（天线增益、发射功率、噪声灵敏度）监控极为重要，通过关键指标的测量，从而实现对诸如威力、精度以及系统改善因子等整机性能评估。相控阵雷达作为复杂的电子系统，健康管理系统通过雷达 BIT 的测试数据分析挖掘，提供故障诊断结果，实现对雷达系统的状态进行实时分析评估，并根据分析评估结果自动进行维修决策，提高装备效能。

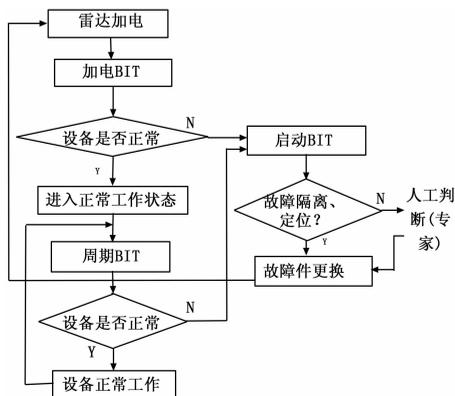


图 2 典型雷达系统 BIT 处理流程示意图

2 有源相控阵雷达健康管理方案

对于有源相控阵雷达装备而言，健康管理需要实现状

态监视 (BIT)、健康评估以及故障预测，按照健康管理观点，有源相控阵雷达健康管理的系统框架如图 3。雷达关键性能的监视是健康管理的基础，通过综合诊断的分析完成对雷达性能的评估。相控阵雷达的健康设计考虑如下：

- 1) 确定健康标准和健康诊断逻辑；
- 2) 确定状态实时监测能力，设置监测指标和监测点及；
- 3) 设计对故障的隔离、修复能力；
- 4) 确定主要特征参数及雷达性能评估方法；
- 5) 设计雷达系统健康信息的处理与预测维修流程及方法。

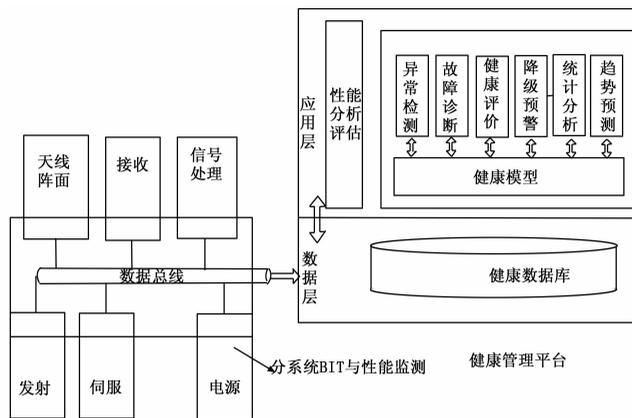


图 3 相控阵雷达系统健康管理架构设计

2.1 有源相控阵雷达的健康标准和方法

装备的健康状态描述了装备及其组成执行功能的能力。装备的健康状态一般是通过测试数据来表征的，测试数据偏离标准值的程度越大，其健康状态越差，因此装备的健康状态在一定程度上可表现为测试数据偏离标准值的程度。对于地面有源相控阵雷达探测而言，雷达的威力和探测精度是核心指标，而这两个指标需要通过辐射功率、系统灵敏度、天线增益（波束宽度）、脉冲宽度以及通道处理的损失等关键指标进行测量评估，如果考虑到杂波抑制以及抗干扰性能，还需要增加系统稳定性、天线副瓣电平、动态范围、发射的谐波杂散等指标。此外，有些指标进行精确测量需要非常高的环境条件，譬如天线增益精确值，有源相控阵的灵敏度等，因此需要综合考虑指标测量与实际设计的折中，除了基本的 LRU 完好信息判断外，按照关键要素测量值与指标的偏离度健康标准。

对于已实际服役的有源相控阵雷达而言，考虑到设计的余量和监视系统的复杂度，一般有源相控阵雷达状态健康状态的判别标准如下：

- 1) 设备监视的 LRU 状态正常，主要功能性能符合指标要求，此时雷达状态为“良好”；
- 2) 考虑到设备冗余设计，设备监视的主要 LRU 状态正常，且雷达功能性能符合设计要求，此时雷达状态为“合格”；这里的冗余重点考虑的是有源相控阵雷达天线阵面、阵面电源以及备份的发射、处理链路。
- 3) 设备监视主要 LRU 状态正常（无单点故障），雷达

功能性能参数有一定的下降,例如由于有源天线阵面的慢性退化特性,功率孔径积降低 1 dB,改善因子恶化相对于指标不超过 1 dB 等,此时雷达可判定为有条件的“可使用”。

2.2 有源相控阵雷达状态监视和参数获取设计思路

在装备健康管理概念中,综合诊断是核心,故障信息和性能参数获取是基础,因此传统的 LRU 功能监视、测量仍然需要。有源相控阵雷达的综合诊断系统首先统筹有源相控阵关键性能保证要求和成本约束,按照各个典型分系统或者设备组成及其 FMEA 的分析结果设计各分系统 LRU 监视,进行分系统 LRU 功能监视和性能参数的获取。其次,按照整个雷达的信号流程构建关键系统测量点,同时从系统的角度获取系统关键参数,因而必须要求在系统设计测量、监视系统。因此,对于关键分系统,在系统角度上设计的监视测试说明如下。

天线阵面:假设每个天线阵面的 LRU 均自身设计监视逻辑,则设备比较复杂且成本颇高,此时需要从系统的角度设计内监测/外监测系统,考虑到外部环境影响以及参数的获取有效性,一般有源天线阵面采用内监测设计。

阵面电源:阵面电源设计故障和电压电流的监视测量系统,有源相控阵雷达阵面电源模块采用冗余设计,通常设计的冗余量在 1 个模块以上(一般超过 10%),实现功能的冗余。

发射通道:有源相控阵雷达的发射链路一般是从低功率的信号产生,让后进行固态放大,然后再通过阵面的发射网络分配到每个 T/R 通道,考虑到可靠性因素,对该节点进行监视,同时在固态放大这一级进行双冗余设计。

接收:天线接收馈线网络形成的信号在接收机进行放大、STC 控制、混频以及数字化处理,考虑到接收状态监视和系统参数的获取,考虑在工作休止期,注入测试信号进行通道的判别和处理,同时设计冗余的通道进行热备份。

信号处理:在每个功能模块的 LRU 设计监视,同时利用系统的模拟信号进行性能参数的获取。

2.3 故障预测方法

根据对雷达获取状态的监测、功能性能测试以及预测模型,得出可能出现的故障及相关保障用信息。对可能出现的故障,提出“预先”维修、保养的方法,将传统的事后维修转变为视情维修,从对故障的被动反应到主动预防,实现装备自主式保障。对于电子设备的组成元器件寿命通过一定计算方法进行评估,从而实现对整个电子设备的未来进行剩余使用寿命的预估。通过大数据、人工智能的方法实现辅助决策,减少全寿命周期的各项费用。

3 有源相控阵雷达性能评估方法

雷达方程(见公式 1)决定了雷达威力的约束条件,在不考虑常数、目标 RCS 以及环境的约束下,取决于雷达自身参数主要是发射功率 P_t ,脉冲宽度 τ ,天线的收发增益 G_t 、 G_r ,波长 λ (工作频率),噪声温度 T_s ,适配损失 C_B ,系统损耗 L_s ;为简化系统评估,检测因子 $D_x(n)$ (系统的

检测因子,可看作常数),方向图因子 F_t 、 F_r ,方向图因子暂时不考虑。

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G_t \lambda^2 \sigma F_t^2}{(4\pi)^3 k T_s D_x(n) C_B L_s} \right]^{1/4} = \left[\frac{n E_s E_r(n) G_t G_r \lambda^2 \sigma F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^3 k T_s D_0(1) C_B L_s} \right]^{1/4} \quad (1)$$

在外围手段良好的条件下,可采用直接方法验证,例如观察固定的球或者反射体进行雷达威力性能评估;也可采用相对直观的测试方法验证,例如采用系统灵敏度测试和上行功率孔径积的方法对雷达关键性能进行测试验证(转发器灵敏度、功率孔径积);但是对于一般部署的雷达而言,上述手段需要的条件比较难以满足,而且不灵活。通过雷达系统自身的采集数据,通过间接的方法可以对雷达威力性能进行比较可靠的评估,是解决健康管理的有效途径之一。

3.1 天线阵面性能(含脉冲宽度)参数的获取

天线阵面的故障判别和参数获取采用统一设计,并采用按照 2.1 的设计的天线阵面监测方式为内监测模式。在天线阵面生产调试过程中,特别是在暗室环境条件下,对监测网络进行校准,取得标准的数据;在雷达产品使用时,阵面监测的数据按照校准的结果进行调整和补偿。利用天线阵面收发数据的监测结果,获得阵面的收发幅度、相位的分布数据,进而通过计算获得远场的等效方向图,因此可以得出天线的发射、接收增益,波束宽度,天线副瓣电平关键参数(监测时可以通过波束指向配置移相器的数值,从而达到天线阵面的波束扫描特征)。对于脉冲宽度测量,可以在阵面发射监测或者发射工作时,采用监测通道接收的 T/R 组件发射信号进行信号分析的方式实现测量。通过对收发增益、脉冲宽度精确测量以及天线副瓣电平的参数获取(也通过和差波瓣图获得角敏曲线,评估测角精度的影响)。从而或整个雷达的健康情况和威力性能。下图设计了一个约 3000 点的阵面,天线在状态完好时的性能参数与一定故障率条件下的参数可以清晰的对比,同时在维护时结合单元在阵面中的权值情况,可将部分在阵面中间的故障单元调整至阵面边缘,提高雷达的性能。

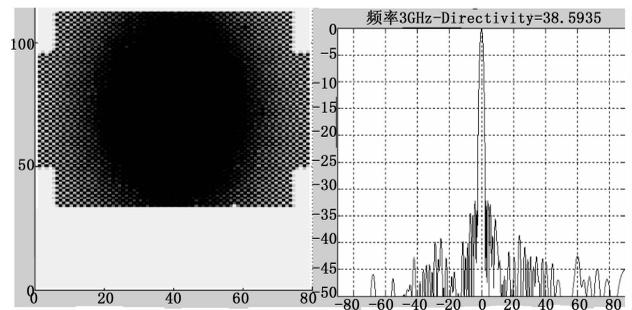


图 4 正常天线的幅度分布天线波瓣图

3.2 系统灵敏度(噪声温度 T_s)参数的获取

对有源天线阵面而言,系统的灵敏度测试是比较复杂的难题。一般情况下通过测试 T/R 通道、主接收机灵敏度以及固定的馈线网络损耗来综合计算整个系统的灵敏度结

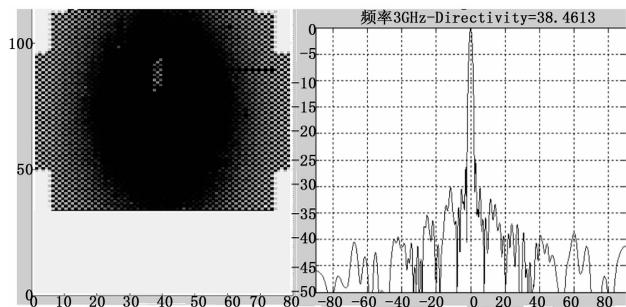


图 5 故障模式下天线的幅度分布和天线波瓣图

果,或者采用远场等效的方式整体测量(含天线接收增益)。本设计考虑的方式是二种,第一种方式是采用阵面监测通道注入系统的模拟信号,通过阵面内监测网络接收信号的功率(幅度)(网络的调整补偿应用于该模式),在暗室环境或者净空环境条件下进行测量校准,然后,通过雷达的信号处理得到标准的信噪比做参照,此方式相对复杂一些。第二种方式是在主接收机的射频加耦合通道,在接收通道内耦合模拟目标信号,在主接收机的休止期工作,实时对通道的测试信号信噪比进行监视。当然上述两种模式下,均包含了处理通道的损耗,特别是适配损耗、采样损耗,脉压展宽损耗等。两种方式,第一种相对复杂,但是可以得到含阵面在内灵敏度结果,可用于工作维护时启用,第二种简单,可以应用于在线 BIT 方式中,实时获得处理结果(T/R 通道和网络采用系统设计的参数计算替代,可用于威力性能的间接评估)。

3.3 其他参数的获取

3.3.1 阵面电源参数的获取意义

阵面发射通道监测时,一般采用逐一工作的模式开展,进而仅能说明发射通道具备正常工作的能力,需要设定特定的占空比工作,观察整个阵面电源的功率,辅助确认发射通道能否具备发射功率的条件。

3.3.2 设备自身的损耗及工作波长

波长这一参数通过工作频率体现,通过目标模拟即可以精确的判断;关于设备自身引起的损耗,上行的主要是发射链路损耗,这一参数可通过阵面发射监测实现;设备的处理通道损耗按照 3.2 的说明可以统一在方程中计算。关于系统设计的雷达检测损耗主要决定于设计,当然也可以采用机内模拟注入的方式进行评估;电波传输的损耗取决于环境,波束交叠的损耗取决于波束形状和设计,可通过天线内监测获取的波瓣信息判断损失。

3.4 雷达威力性能评估实例

按照雷达方程规定的要求以及 3.1、3.2、3.3 参数获取的结果可对有源相控阵雷达的威力性能进行评估。下面通过实例说明威力的评估的结果。

设定一部有源相控阵雷达频率工作在 3 GHz,对于 RCS 为 2 m^2 的目标,天线阵面法向威力在 280 km,天线阵面尺寸约 $2.1 \text{ m} \times 3.8 \text{ m}$,其他构成包括接收机(含频率

源)、阵面电源、发射、信号处理、显示终端。系统参数如下:天线阵面的收发增益分别为 38.7 dBi、39.6 dBi,单个通道辐射功率为 70 w,脉冲宽度为 $200 \mu\text{s}$,检测信噪比设定为 18 dB(发现概率:0.8,虚警 10^{-6}),系统损耗 9.2 dB(发射(0.5 dB),采样、波形匹配和检测损耗为 3 dB),噪声系数 4 dB,则整部雷达的自由空间威力为 288 km。

设实际参数的获取的结果如下:收发增益分别为 38.59 dBi、39.47 dBi,单个通道有效辐射功率为 66 w(含发射损耗的结果),脉冲宽度为 $199.7 \mu\text{s}$ 。天线阵面接收的模拟目标信号功率为 -20 dB (扣除耦合损耗),按照设计损耗和噪声功率,其理论信噪比应为 88 dB;实际参数获得的信噪比为 87.3 dB。通过实际参数得到的威力估算结果为 277 km,估算结果相当于理论计算的 96%,与实际要求基本相当。可以说明性能评估的有效性。如果其他因子有改变,则可以通过雷达方程进行推算,从而掌握各参数对雷达的性能影响的信息,作出预防性维修的建议。

4 关于有源相控阵雷达健康管理中的性能评估方法的进一步思考

根据第 3 章节的说明,通过系统诊断设计,获取关键参数,可对有源相控阵雷达威力进行评估。当然雷达的性能不仅仅是威力,还包括距离、角度和速度精度,杂波抑制以及抗有源干扰能力等等。针对上述性能评估可以通过模拟目标注入、分析波瓣图特性部分解决,当然还需要仔细分析上述性能特征实现的途径和设备特征,对于核心的参数获取需要从系统实现的逻辑设计监视诊断系统。

通过对雷达 LRU 监视以及关键参数的获取等手段得到整个雷达性能的评估结果是未来雷达装备健康管理发展的必然要求。完好的装备状态是装备实现可用性和实战能力必备条件;后续将进一步优化整个雷达装备的健康管理和关键性能的评估方法设计,实现雷达装备效能发挥和全寿命周期的费用减低。

参考文献:

- [1] 胡文华,史林,薛东方. 雷达智能 BIT 中整机性能监测系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(7): 1883-1885.
- [2] 黄正英. 数字阵列雷达系统的 BIT 设计 [J]. 数字与应用, 2012(5): 124-125.
- [3] 刘应刚,于兴伟. 雷达健康管理的性能评估方法 [J]. 现代雷达, 2015, 37(11): 12-15.
- [4] 王小谟,匡永胜,陈忠先,等. 监视雷达技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [5] 初晓军. 机载雷达 BIT 及实现研究 [J]. 科技信息, 2008(35): 435-436.
- [6] 侯其坤. 机载雷达系统的 BIT 设计 [J]. 现代雷达, 2003, 25(11): 7-9.
- [7] 高洪青. 有源相控阵雷达状态监测与健康管理工作 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9): 146-148.