

## 可靠度限制下相控阵雷达天线阵面 T/R 单元维修模型\*

蒋伟, 盛文, 刘诗华, 鲁力

(空军预警学院 防空预警装备系, 湖北 武汉 430019)

**摘要:**为了描述维修活动对相控阵雷达天线阵面系统的影响,构建了以可靠度为基础的“修旧不如新”定期维修优化模型。对相控阵雷达 T/R 单元失效下的天线性能参数进行分析,根据指标确定系统不能正常工作的失效 T/R 单元阈值;针对大部分维修活动都难以使 T/R 单元修复如新的事实,引入失效率递增因子,在系统一定的可靠度水平上,以相控阵雷达系统的使用可用度和维修费用率为优化决策参数,建立了系统的维修优化模型,并运用边际效能算法对系统的最佳预防换件维修周期和换件维修组数量进行求解。实例运算结果表明,该模型突破了已有模型“修旧如新”的限制条件,更符合实际,能为维修策略的制定提供理论依据。

**关键词:**相控阵雷达;可靠度;失效率;使用可用度;边际效能

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)02-138-06

## Maintenance model for T/R unit of phased array radar's antenna under the restriction of reliability

JIANG Wei, SHENG Wen, LIU Shihua, LU Li

(Air-Defense Early Warning Equipment Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** In order to describe the maintenance activities for the phased array radar's antenna system, a time based maintenance model that "T/R unit can not be restored to as good as new" under the foundation of reliability was built. Firstly, the antenna's construction parameters under the T/R unit failure in series were analyzed and the threshold value of failure T/R unit was determined. Then in view of the fact that "T/R unit can not be restored as good as new", a maintenance model that minimizes the average cost per unit time under the restriction of antenna's operational availability was established by introducing failure rate increasing factor. Finally, the marginal efficiency analysis algorithm was applied to achieve the optimized maintenance cycle and service group. Several examples are given to verify that the model excludes the restriction of "T/R unit cannot be restored to as good as new", which are more in accordance with the actual situation and will provide the theoretical foundation for preventive maintenance policy.

**Keywords:** phased array radar; reliability; failure rate; operational availability; marginal efficiency

据统计,近5年来美国用于军事装备的维修保障费用已经达到总军费开支的14.2%以上,如何在确保装备正常运行的前提下进一步削减维修保障费用已成为急需解决的关键问题<sup>[1]</sup>。因此,在大数据时代背景下,要求装备维修保障人员具有及时高效的精确保障理念,即能通过装备的大量运行历史数据,运用信息化手段对装备的维修策略进行精确决策,在保障费用限制的条件下,最大限度提高装备的保障效能。相控阵雷达作为弹道导弹预警和空间目标监视任务的主要装备<sup>[2-4]</sup>,其在出厂设计时具有以下特点:一是相控阵雷达 T/R 单元数量多达成千上万,单

个 T/R 单元失效并不影响天线的性能;二是相控阵雷达系统中具有完善的机内检测 (Built In Test, BIT) 能力,天线阵面故障 T/R 单元数量以及位置信息能够实时显示,供维修决策人员参考。

相控阵雷达系统的冗余设计以及机内自检能力为 T/R 单元的维修策略问题提供了有利条件<sup>[5-10]</sup>。许多学者对  $k/N$  系统的维修策略问题进行研究,文献[11-14]中  $k/N$  系统所采用的维修方式是,在任意一项部件失效后立即进行换件维修的方式,该方法只适合部件数量较少的情况;文献[15]中张涛等建立了  $(m, N_c)$  维修策略下的使用可用度模型,并通过实际仿真分析了不同参数  $m$

\* 收稿日期:2018-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61401503);军内科研重点资助项目(KJ2012225)

作者简介:蒋伟(1989—),男,浙江建德人,博士研究生,E-mail:514293712@qq.com;

盛文(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:shengwen@139.com

和  $N_C$  对系统使用可用度的影响;文献[16]对文献[15]的模型进行改进,建立了两级维修体制下的定数维修模型,并分别讨论了三种情况下系统参数  $m$  和  $r$  的取值。文献[17]中贾秀芹等利用定时定数混合截尾寿命原理,建立了  $k/N$  系统在采用  $(n, L, r, r)$  维修策略时的使用可用度模型。

本文主要针对大部分维修活动难以使部件真正地修复如新,经过维修后的部件更多的处于一种介于“全新”和“如旧”之间的状态这一特点,突破已有模型中“修旧如新”的限制条件,引入失效率递增因子,首先对平面阵相控阵雷达 T/R 单元失效下的天线性能参数进行分析,根据指标确定系统不能正常工作的失效 T/R 单元阈值;其次在系统一定可靠度水平上,建立了 T/R 单元的维修模型。

### 1 雷达天线性能参数分析及阈值选取

#### 1.1 雷达天线性能参数分析

已知某平面相控阵雷达的 T/R 单元数量为 1600 ( $40 \times 40$ ),按矩形格排布方式均匀分布在天线阵面上,天线波束最大指向为  $\theta = 90^\circ, \varphi = 30^\circ$ ,且各 T/R 单元在横向和纵向上的间距分别为  $d_1$  和  $d_2$ ,相邻 T/R 单元的间距为半波长,即  $d_1 = d_2 = d = 0.5\lambda$ ,坐标记为  $(i, z)$ ,其中  $i = 0, 1, \dots, 39; z = 0, 1, \dots, 39$ ,具体排布方式如图 1 所示。

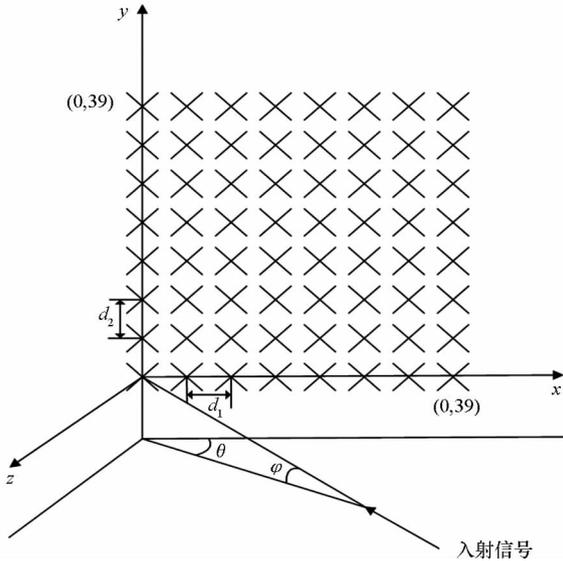


图 1 T/R 单元排布方式

Fig.1 Molecular structure of T/R unit

根据图 1 所示的排布方式,平面相控阵雷达的方向图可以表示为<sup>[18]</sup>

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} a_{iz} S(i, z) e^{jz(\frac{2\pi}{\lambda}d_2 \sin\theta - \beta)} e^{ji(\frac{2\pi}{\lambda}d_1 \cos\theta \sin\varphi - \alpha)} \quad (1)$$

式中:  $a_{iz}$  表示坐标为  $(i, z)$  的 T/R 单元幅度值;  $S(i, z)$  表示坐标为  $(i, z)$  的 T/R 单元示意值,当该 T/R 单元正常工作时,  $S(i, z) = 1$ ,相反失效时  $S(i, z) = 0$ ;相邻 T/R 单元之间沿  $y$  轴和  $z$  轴的阵内相位差分别为  $\alpha, \beta$ 。

根据方向图计算公式可以求得天线发射增益  $G_t$ 、发射总功率  $P$  以及最大探测距离  $R_{\max}$  三个参数指标,则

$$\begin{cases} P = w_2 \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{z=0}^{N-1} |S(i, z) a_{iz}|^2 \\ G_t = \frac{4\pi \left| \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{z=0}^{N-1} S(i, z) a_{iz} \right|^2}{w_2 \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{z=0}^{N-1} |S(i, z) a_{iz}|^2} \\ R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P \cdot G_t \cdot G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_0 \cdot B_r \cdot F_r \cdot (S/N)_{\min}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $w_2$  表示比例系数;  $G_r$  为接收天线功率增益;  $\sigma$  为目标有效反射面积;  $\lambda$  为雷达工作波长;  $T_0$  为标准噪声温度;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $B_r$  为接收机带宽;  $F_r$  为接收机噪声系数;  $(S/N)_{\min}$  为最小可检测信噪比。

由于 T/R 单元总共有 1600 个,根据式(2)可以计算出增益下降率和最大作用距离下降率等参数,即

$$\begin{cases} \omega = \frac{\left| \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{z=0}^{N-1} S(i, z) a_{iz} \right|^2}{\left| \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{z=0}^{N-1} a_{iz} \right|^2} \\ \varphi = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{z=0}^{N-1} |a_{iz}|^2}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{z=0}^{N-1} |S(i, z) a_{iz}|^2} \\ \alpha_G = 1 - \omega\varphi \\ \beta_{R_{\max}} = 1 - \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{z=0}^{N-1} |S(i, z) a_{iz}|^2}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{z=0}^{N-1} |a_{iz}|^2}} \cdot \sqrt[2]{\omega\varphi} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)可以计算出不同失效 T/R 单元数量下的增益下降率、最大作用距离下降率。

#### 1.2 阈值选取

维修阈值的选择取决于雷达的状态,即装备性能下降的程度,而大型相控阵雷达天线性能指标主要包括天线增益、最大作用距离、副瓣电平。根据该型雷达设计指标要求,当天线发射增益下

降 15%、接收增益下降 15%、最大作用距离下降 10%、副瓣电平大于 -24 dB 时,雷达不能正常工作。根据上述分析,可列出每种指标对应的损坏阈值,具体如表 1 所示。

表 1 各指标对应的损坏阈值

Tab.1 Threshold value of failure unit in accord with the index

参数指标	失效数量阈值/总数量
发射增益下降 15%	240/1600
接收增益下降 15%	242/1600
最大探测距离下降 10%	210/1600
副瓣电平大于 -24 dB	245/1600

根据上述分析,为满足所有参数指标要求,可以确定失效 T/R 单元数量阈值为 210,即天线阵面可视为 1390/1600 的  $k/N$  系统。

## 2 问题描述及符号说明

### 2.1 问题描述

大型相控阵雷达天线阵面由  $N$  个同类型的 T/R 单元组成,且每个 T/R 单元由发射模块、限幅放大器开关以及数字通道三种车间可更换单元组成。假设备件库存有两种 T/R 单元,一种是新的 T/R 单元,另一种是修复过的 T/R 单元,失效率函数分别为  $f_1(t), f_2(t)$ ,且  $f_2(t) = af_1(t)$ 。本文采用的维修策略为:系统开始运行时, $N$  个 T/R 单元都正常,如若当运行时间为  $T$  时,系统仍然正常工作(T/R 单元故障数量小于  $N - k + 1$ ),则利用库存中修复过的 T/R 单元更换系统中所有的故障 T/R 单元;如若在运行时间为  $T_1$  ( $T_1 < T$ ) 时,系统故障(T/R 单元故障数量大于  $N - k + 1$ ),则利用库存中修复过的 T/R 单元更换系统中所有的故障 T/R 单元,直至当运行  $i$  个小周期后,系统的可靠度低于设定值时,将系统中天线阵面上所有修复过的和故障 T/R 单元用新的 T/R 单元更换,且本文定义从系统开始运行到下一次系统开始正常运行为一个小周期,从系统开始运行到系统可靠度小于某一阈值  $R_k(t)$  为一个大周期,如图 2 所示。

### 2.2 符号说明

$R_i(t)$ :系统第  $i$  个小周期内的可靠度。

$f_1(t)$ :新 T/R 单元失效率函数。

$f_2(t)$ :修复过的 T/R 单元的失效率函数。

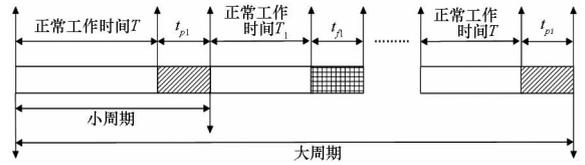


图 2 雷达装备运行周期

Fig.2 Operation cycle of radar equipment

$a$ :失效率递增因子,  $a > 1$ 。

$E(t_{p_i})$ :第  $i$  个小周期运行后的预防性换件维修时间。

$E(t_{f_i})$ :第  $i$  个小周期运行后的故障换件维修时间。

$C_{p_i}$ :第  $i$  个小周期运行后进行一次预防性换件维修费用。

$C_{f_i}$ :第  $i$  个小周期运行后进行一次故障换件维修费用。

$r_1(t)$ :未经修复过 T/R 单元的可靠度。

$r_2(t)$ :修复过 T/R 单元的可靠度。

$E(m_i)$ :第  $i$  个小周期结束时天线阵面上修复过的 T/R 单元期望数量,且本文假设  $E(m_i) < k$ 。

$N$ :天线阵面 T/R 单元总数量。

$k$ :系统正常工作所需的最小 T/R 单元数量。

$A(T, r)$ :系统的使用可用度。

$M(T, r)$ :系统单位时间内的维修费用。

## 3 天线阵面 T/R 单元维修模型

### 3.1 模型参数计算

本文选取系统的可靠度、使用可用度以及单位时间维修费用作为系统维修决策中的三个关键要素。T/R 单元属于电子器件,因此本文假定 T/R 单元的失效率函数服从指数分布,即

$$\begin{cases} f_1(t) = \lambda e^{-\lambda t} \\ f_2(t) = a\lambda e^{-\lambda t} \end{cases} \quad (4)$$

则新 T/R 单元和修复过 T/R 单元的可靠度为

$$\begin{cases} r_1(t) = 1 - \int_0^t f_1(t) dt = e^{-\lambda t} \\ r_2(t) = 1 - \int_0^t f_2(t) dt = 1 + ae^{-\lambda t} - a \end{cases} \quad (5)$$

根据  $k/N$  系统的特点可知,当  $N$  个 T/R 单元中至少有  $k$  个单元正常工作时,系统才能工作,因此系统的初始可靠度可以表示为

$$R_1(t) = \sum_{j=k}^N C_N^j [r_1(t)]^j [1 - r_1(t)]^{N-j} \quad (6)$$

第  $i$  个小周期结束时,天线阵面上修复过的 T/R 单元期望数量为

$$\begin{cases} E(m_1) = N[1 - R_1(T)] \\ E(m_2) = E(m_1) + [N - E(m_1)] \int_0^T f_1(t) dt \\ E(m_3) = E(m_2) + [N - E(m_2)] \int_0^T f_1(t) dt \\ \vdots \\ E(m_i) = E(m_{i-1}) + [N - E(m_{i-1})] \int_0^T f_1(t) dt \end{cases} \quad (7)$$

此时天线阵面的 T/R 单元由经过修复后的  $E(m_i)$  个 T/R 单元和未经过修复的  $[N - E(m_i)]$  个 T/R 单元这两部分组成,即这两部分  $k - p + j$  与  $p$  之和  $k + j$  中,必须确保至少有  $k$  个能够正常工作,则系统第  $i$  个小周期内的可靠度为

$$R_i(t) = \sum_{j=0}^{N-k} \sum_{p=0}^{E(m_i)} C_{N-E(m_i)}^{k-p+j} [r_1(t)]^{k-p+j} \cdot [1 - r_1(t)]^{N-E(m_i)-k+p-j} C_{E(m_i)}^p \cdot [r_2(t)]^p \cdot [1 - r_2(t)]^{E(m_i)-p} \quad (8)$$

第  $i$  个小周期内的平均不能工作时间可以表示为

$$MDT = E(t_{pi}) \cdot R_i(T) + [1 - R_i(T)] \cdot E(t_{fi}) \quad (9)$$

假设有  $r$  个维修组进行换件维修,且当  $r$  小于需换件维修的 T/R 单元数量时,  $E(t_{pi})$  和  $E(t_{fi})$  可以表示为

$$\begin{cases} E(t_{pi}) = \frac{N[1 - R_i(T)]}{r\mu} \\ E(t_{fi}) = \frac{N - k + 1}{r\mu} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\mu$  定义为单个 T/R 单元的换件维修率。

小周期  $T$  内的平均能工作时间为

$$MUT = T \cdot R_i(T) + \int_0^T t \cdot R'_i(t) dt = \int_0^T R_i(T) dt \quad (11)$$

一个大周期内系统的使用可用度为

$$A(T, r) = \frac{\sum_{i=1}^n MUT}{\sum_{i=1}^n MUT + \sum_{i=1}^n MDT} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_0^T R_i(t) dt}{\sum_{i=1}^n \int_0^T R_i(t) dt + \sum_{i=1}^n \{E(t_{pi}) \cdot R_i(T) + [1 - R_i(T)] \cdot E(t_{fi})\}} \quad (12)$$

同样地,单位时间的维修费用可以表示为

$$M(T, r) = \frac{\sum_{i=1}^n \{C_{pi} \cdot R_i(T) + C_{fi} \cdot [1 - R_i(T)]\}}{\sum_{i=1}^n \int_0^T R_i(t) dt + \sum_{i=1}^n \{E(t_{pi}) \cdot R_i(T) + [1 - R_i(T)] \cdot E(t_{fi})\}} \quad (13)$$

### 3.2 T/R 单元维修模型

由前述分析可知,本文建立了以固定小周期时间  $T$  以及换件维修组数量  $r$  为决策变量,相控阵雷达系统的使用可用度以及可靠度为限制条件,维修费用率最小为优化目标的维修模型,如式(14)所示。

$$\begin{cases} \min M(T, r) \\ A(T, r) \geq A_0 \\ R_i(T) \geq R_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $A_0$  为系统最小可接受的使用可用度;  $R_0$  为系统最小可接受的可靠度。

### 3.3 维修模型求解算法

在上述所建立的模型中,小周期  $T$  及换件维修组数量  $r$  是影响系统可靠度、使用可用度以及维修保障费用的重要参数,为了求解模型中的  $T$  以及  $r$ ,本文设计了一种适合求解该模型的边际效能算法,具体流程如图3所示。

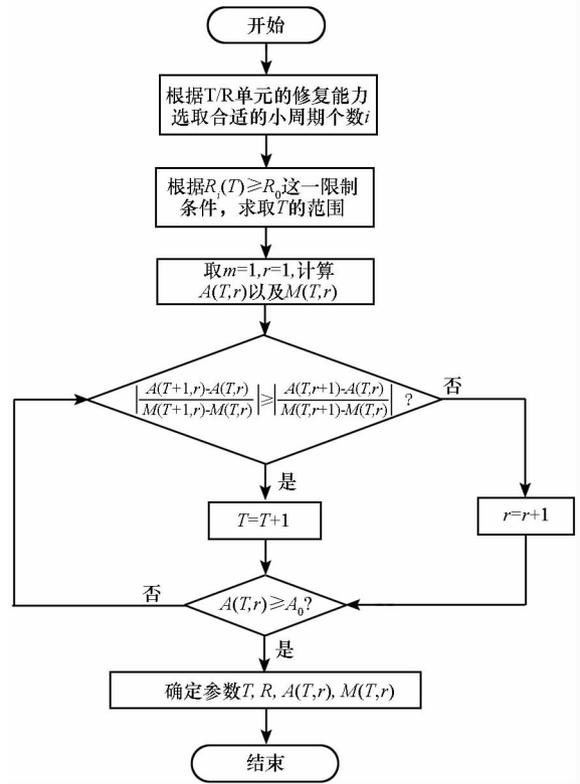


图3 模型求解算法流程图

Fig. 3 Flow chart cycle of model algorithm

该边际效能算法的核心思想为:首先根据 T/R 单元的修复能力确定小周期个数  $n$ ;其次根据式(7)计算出第  $i$  个小周期结束时的可靠度;最后在周期个数以及小周期时间  $T$  的范围确定后,选取参数  $T = 1, r = 1$  作为算法的初始条件,分别对参数  $T$  和  $r$  加1,并计算其中一个参数加1时产

生的边际效能(增加的使用可用度/增加的维修费用),对边际效能大的参数加 1,如此反复直至使用可用度的值达到  $A_0$ 。

### 4 实例仿真

根据前文分析可知,当 T/R 单元故障数量大于 210 时,无法正常完成规定预警探测任务,因此该天线阵面可以等效成一个 1390/1600 的  $k/N$  系统。已知 T/R 单元的失效率服从参数为  $\lambda = 0.0005$  的指数分布,  $C_{fi} = 10\ 000$  元,  $C_{pi} = 2000$  元,换件维修率  $\mu = 2$  个/h,故障率递增因子  $a = 1.15$ ,系统最小可接受的使用可用度  $A_0 = 0.98$ ,系统最小可接受的可靠度  $R_0 = 0.9$ 。

本文假定备件库存量充足,根据前面所建立的模型和求解算法,按步骤求解如下。

**Step 1:** 根据 T/R 单元的维修能力,本文取小周期数量为 5,5 个小周期为一个大周期,即前 4 个小周期天线阵面故障 T/R 单元用修复过的 T/R 单元更换,第 5 个小周期时将阵面上所有经标记为修复过的 T/R 单元和故障 T/R 单元用新 T/R 单元更换,第 6 个小周期开始重复上述运行方式。

**Step 2:** 根据某型相控阵雷达设计指标要求,其可靠度不低于 0.9,根据式(7)~(11)可以计算出不同工作小周期  $T$  的可靠度,如表 2 所示。

表 2 不同工作小周期  $T$  的可靠度

Tab.2 Reliability in different minor operation cycle  $T$

$T$	$R_1(T)$	$R_2(T)$	$R_3(T)$	$R_4(T)$	$R_5(T)$
230	0.997 9	0.997 9	0.995 7	0.992 4	0.987 7
240	0.989 0	0.988 3	0.978 5	0.964 8	0.947 5
243	0.983 0	0.981 3	0.966 8	0.947 4	0.923 7
244	0.980 5	0.978 3	0.961 8	0.940 1	0.914 0
245	0.977 6	0.974 9	0.956 4	0.932 2	0.903 4
246	0.974 5	0.970 9	0.950 1	0.923 5	0.892 2
247	0.970 9	0.966 3	0.943 1	0.913 6	0.879 6

从表 2 可以看出,随着小周期  $T$  时间增长,系统的可靠度下降,当小周期  $T$  大于 245 时,不满足可靠度不低于 0.9 这一限制条件,因此必须满足小周期  $T \leq 245$ 。

**Step 3:** 根据上述建立的模型,运用边际效能算法和 Step 2 中的  $T \leq 245$  这一限制条件可求出最佳维修小周期  $T = 239$  h,换件维修组数量  $r = 2$ ,维修费用率为 8.534 元/h,此时相控阵雷达系

统的使用度为  $0.9816 > ASET = 0.98$ 。

当换件维修组数量  $r = 2$  时,维修费用率以及使用可用度随不同维修小周期  $T$  的变化曲线如图 4~5 所示。

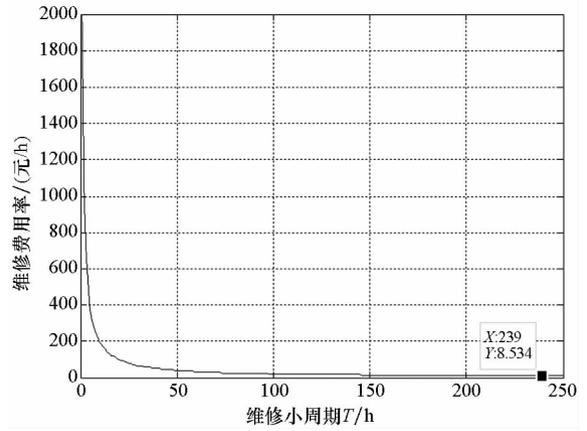


图 4 维修费用率随不同维修小周期  $T$  的变化曲线

Fig.4 Average cost per unit time in different minor operation cycle  $T$

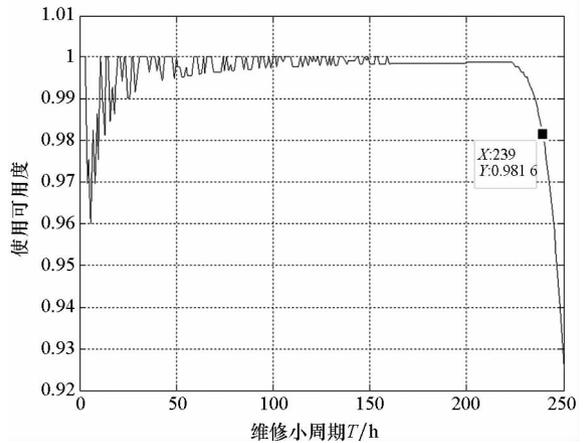


图 5 使用可用度随不同维修小周期  $T$  的变化曲线

Fig.5 Operational availability in different minor operation cycle  $T$

### 5 结论

针对当前依据维修保障人员经验对相控阵雷达装备 T/R 单元进行换件维修可能产生误差的实际,本文首先对平面阵相控阵雷达天线性能进行分析,对不同失效数量下的天线增益、峰值副瓣电平进行计算,从而确定了天线阵面不能正常工作的 T/R 单元失效阈值。其次,针对大部分维修活动都难以使 T/R 单元修复如新的事实,引入故障率递增因子,在系统一定可靠度水平上,以相控阵雷达系统的使用可用度和维修费用率为联合优化决策参数,建立了 T/R 单元的定时维修模型。最后,对模型中的最佳维修小周期和换件维修组数量进行求解并进行了实例仿真验证,为实现对

大型相控阵雷达装备进行及时、可靠、经济的维修保障提供理论依据。

## 参考文献 (References)

- [1] 汪懿君.  $k/n$  系统定数维修模型研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013.  
WANG Yijun. Repair policy with  $m$ th failur for  $k$ -out-of- $n$  system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [2] 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.  
SHAO Chunsheng. Study status and development trend of phased array radar [J]. Modern Radar, 2016, 38(6): 1-4. (in Chinese)
- [3] 钱建刚, 戎哲萍, 许弼. 大型相控阵雷达系统效能评估[J]. 兵工自动化, 2007, 26(11): 6-8.  
QIAN Jiangang, RONG Zheping, XU Bi. Effectiveness evaluation of large phased array radar's system[J]. Ordnance Industry Automation, 2007, 26(11): 6-8. (in Chinese)
- [4] 张道尚, 卢雷, 李广俊. 大型相控阵雷达可靠性评估方法[J]. 现代雷达, 2015, 37(3): 8-10.  
ZHANG Daoshang, LU Lei, LI Guangjun. Reliability evaluation method for large scale phased array radar [J]. Modern Radar, 2015, 37(3): 8-10. (in Chinese)
- [5] Babishin V, Taghipour S. Joint optimal maintenance and inspection for a  $k$ -out-of- $n$  system [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(5/6/7/8): 1739-1749.
- [6] Li X Y, Liu Y, Chen C J. A copula-based reliability modeling for nonrepairable multi-state  $k$ -out-of- $n$  systems with dependent components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, 26(2): 133-146.
- [7] Franko C, Tutuncu G Y. Signature based reliability analysis of repairable weighted  $k$ -out-of- $n$ :  $g$  systems [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 65(2): 843-850.
- [8] Salehi E. On reliability analysis of consecutive  $k$ -out-of- $n$  systems with arbitrarily dependent components [J]. Applications of Mathematics, 2016, 61(5): 565-584.
- [9] Cai Z Q, Si S B, Sun S D. Optimization of linear consecutive- $k$ -out-of- $n$  system with a Birnbaum importance-based genetic algorithm [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 152(1): 248-258.
- [10] Yuge T, Maruyama M, Yanagi S. Reliability of a  $k$ -out-of- $n$  system with common-cause failures using multivariate exponential distribution [J]. Procedia Computer Science, 2016, 96(1): 968-976.
- [11] Zhang Y Y, Wu W Q, Tang Y H. Analysis of an  $k$ -out-of- $n$ :  $g$  system with repairman's single vacation and shut off rule [J]. Operations Research Perspectives, 2017, 49(4): 29-38.
- [12] 聂涛, 盛文.  $K:N$  系统可修复备件两级供应保障优化研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1452-1455.  
NIE Tao, SHENG Wen. Research on two-echelon supply support optimizing for repairable spare parts of  $K:N$  system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(7): 1452-1455. (in Chinese)
- [13] 卢雷, 杨江平.  $K/N(G)$  结构系统初始备件配置方法[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 773-778.  
LU Lei, YANG Jiangping. Initial spare allocation method for  $K/N(G)$  structure system [J]. Acta Aeronautics et Astronautics Sinica, 2014, 35(3): 773-778. (in Chinese)
- [14] 阮旻智, 李庆明, 黄傲林, 等. 有限维修渠道约束下多级维修供应系统库存控制[J]. 航空学报, 2012, 33(11): 2018-2027.  
RUAN Minzhi, LI Qingming, HUANG Aolin, et al. Inventory control of multi-echelon maintenance supply system under finite repair channel constraint [J]. Acta Aeronautics et Astronautics Sinica, 2012, 33(11): 2018-2027. (in Chinese)
- [15] 张涛, 武小悦, 郭波.  $(m, N_G)$  维修策略下可修系统的使用可用度模型 [J]. 系统工程学报, 2007, 22(6): 627-633.  
ZHANG Tao, WU Xiaoyue, GUO Bo. Operational availability model for repairable system under  $(m, N_G)$  maintenance policy [J]. Journal of Systems Engineering, 2007, 22(6): 627-633. (in Chinese)
- [16] 蒋伟, 江峰, 鲁力. 相控阵天线阵面 T/R 单元维修模型[J]. 现代防御技术, 2017, 45(1): 161-166.  
JIANG Wei, JIANG Feng, LU Li. Maintenance model for T/R unit of phased array radar's antenna [J]. Modern Defense Technology, 2017, 45(1): 161-166. (in Chinese)
- [17] 贾秀芹, 刘瑞元.  $k/n$  系统在  $(n, L, r, r)$  维修策略下的可用度[J]. 西南大学学报, 2011, 33(9): 17-21.  
JIA Xiuqin, LIU Ruiyuan. Availability for the  $k$ -out-of- $n$  system under  $(n, L, r, r)$  maintenance policy [J]. Journal of Southwest University, 2011, 33(9): 17-21. (in Chinese)
- [18] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 27-40.  
ZHANG Guangyi. Principles of phased-array radar [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 27-40. (in Chinese)