

# 机载相控阵雷达天线阵的可靠性新模型

丁定浩, 李 健

(华东电子工程研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 影响机载相控阵雷达下视能力的一个重要指标是天线的超低副瓣特性。在传统的机载相控阵雷达天线的可靠性设计中是对  $n$  中取  $k$  的表决模型冗余量进行压缩, 该方法没有考虑失效 T/R 组件的分布位置对天线超低副瓣性能的影响。通过数学归纳法建立了在收发组件失效分布约束条件下, 机载相控阵雷达天线阵的可靠性数学模型。该模型的正确性经过了仿真验证。通过实例比较说明了传统可靠性设计方法可能带来的工程设计风险。该模型可用来指导机载相控阵天线的可靠性设计。

**关键词:** 机载相控阵雷达; 天线阵; 可靠性模型

中图分类号: TB114.3; TN957.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-2337(2006)02-0081-04

## A New Reliability Model of Airborne Phased Array Radar Antenna Array

DING Ding-hao, LI Jian

(East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei 230031, China)

**Abstract:** An important index to influence the down-looking capability of airborne phased array radar is the ultralow sidelobe level of antenna. The traditional design and analysis method of reliability of airborne phased array radar antenna is to reduce voting model redundancy, the voting model takes  $n$  from  $k$ . The influence of failure T/R on the ultralow sidelobe level of antenna is not considered in traditional design method. Using the mathematical induction, this paper constructs a novel reliability model of antenna array under the constraint of failure distribution of T/R modules. Simulation is used to test the model. Meantime, an example is analyzed to describe the possible project design risk. The model can be used to guide the design of airborne phased array antenna.

**Key words:** airborne phased array radar; antenna array; reliability model

规定功能。

在射频固态功率器件问世以后, 对于多级固态功率放大链组成的有源天线阵的可靠性模型, 文献[1]指出, 如继续简单沿用表决模型, 则在层次划分不同的方式下将存在过高估计或过低估计有源天线阵的可靠性这两种可能性。为此, 文献[1]导出了采用新的树联表决结构的可靠性模型, 以适应固态放大链组成的天线阵模型。

自机载相控阵雷达面世以来, 为了保障天线的超低副瓣特性, 国外首先是美国提出了缩减天线阵中冗余射频收发组件占整个天线阵组件总数的比例。地面相控阵雷达有源天线中一般设置占总量 10% 的冗余组件, 而在机载相控阵雷达中则降低到 2%。

## 1 引言

在各种雷达系统中, 相控阵雷达获取的信息量大, 虽然系统复杂, 但却可以采取简单的措施, 就能实现很高的任务可靠性。这是其他雷达不能比拟的。其原因在于在复杂的有源天线阵中设置若干射频组件冗余单元, 就能够大幅度提高天线阵的任务可靠性。

传统的有源天线阵可靠性模型, 是  $n$  中取  $k$  的表决模型, 即在天线阵总数为  $n$  的射频收发组件中, 如有  $k$  个或多于  $k$  个组件正常工作, 则天线阵应能实现规定的功能。换句话说, 容许天线阵中有  $n-k$  个或少于  $n-k$  个组件失效而不影响天线阵的

但这种单纯的组件冗余量的压缩,仍不能保证天线超低副瓣特性的需要,从而严重影响机载雷达的下视能力。在同一比例的冗余组件情况下,组件在天线结构位置上的相对集中失效和相对分散失效,对天线波瓣的影响是完全不同的。尽管容许失效的射频收发组件数即冗余组件数为天线射频收发组件总量的2%,但这一数量的组件如果集中在天线的某个狭窄区域失效,则必然引发天线方向图明显改变,而这种明显改变必将导致天线超低副瓣性能的恶化。

因此,在机载相控阵雷达有源天线阵的可靠性设计中,必须导出既与冗余射频收发组件数有关,又与失效射频收发组件所处天线结构位置有关的可靠性模型,才能正确解决机载相控阵雷达有源天线阵的设计问题。否则,设计中的盲目性将招致严重的风险和后果。本文即试图解决这一问题。

## 2 失效射频收发组件的分布和间隔

综上所述,在相控阵雷达有源天线阵中冗余射频收发组件数量确定的条件下,要保持机载雷达的超低副瓣特性,就必须正确设定射频收发组件在天线阵面上的失效分布的约束条件。这一约束条件可以用失效单元之间容许的最小间距来表示。两个失效单元(实际上是与天线单元相联结的失效射频收发组件)之间的最小间距(即两个失效单元之间间隔多少个正常工作单元)可以由天线设计师根据天线理论和超低副瓣电平的要求计算得到。

问题的关键在于,失效单元的最小间距约束条件如何体现在天线阵的可靠性模型之中。超低副瓣有源天线阵的总体可靠性模型仍然可以使用 $n$ 中取 $k$ 的表决模型<sup>[2]</sup>,即:

$$R_s(t_s) = \sum_{i=0}^{n-k} q(n, i) R_0^{n-i}(t_s) [1 - R_0(t_s)]^i \quad (1)$$

式中,  $R_s(t_s)$  为射频收发组件的可靠度,  $t_s$  为执行一次任务的持续时间,  $n$  为有源天线阵中射频收发组件的总数,  $k$  为保障天线阵实现规定功能所必须的正常工作的射频收发组件数,  $q(n, i)$  为失效状态的组合系数。

完全可以设法使表决模型中的组合系数  $q(n, i)$  反映失效单元之间的最小间距,因为组合系数  $q(n, i)$  是表示天线阵  $n$  个射频收发组件中发

生  $i$  个失效时的各种失效状态的组合数。当失效单元之间的间隔没有约束条件时,这种失效状态的组合数是众所周知的:

$$q(n, i) = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (2)$$

这样,建立失效单元之间的间隔有约束条件时的失效状态组合系数的模型,就成为建立机载相控阵雷达有源天线阵可靠性模型的关键。

## 3 机载相控阵雷达有源天线阵的可靠性新模型

设  $n$  为相控阵雷达有源天线阵中射频收发组件的总数,  $f$  为天线阵中容许失效的射频收发组件的数量,即射频收发组件的冗余数,  $b$  为失效单元之间的最小间隔数。

我们用失效状态枚举图示法来观察组件失效状态的组合规律。为减少篇幅,这里设  $n = 10$ ,  $f = 2$ ,  $b = 2$ 。由此得到 28 种失效状态的组合如图 1 所示。

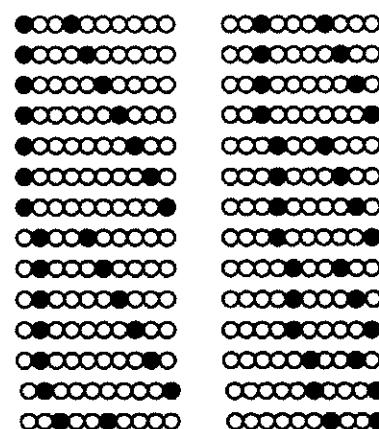


图 1 容许的组件失效状态的组合  
( $n = 10, f = 2, b = 2$ )

图中的黑圈表示失效单元,白圈表示正常工作单元,图中每一行表示可能出现的系统容许的两个单元发生失效的一种失效状态,因为其每一行的两个失效单元之间的最小间距均满足等于或大于 2 的要求。

还有 17 种两个单元失效的状态是不容许的,其失效状态的组合情况如图 2 所示。因为它们不满足两个失效单元之间最小间距的要求。

如果对两个失效单元之间的间距没有要求,则其失效状态的组合数为

$$q(10, 2) = \frac{10!}{(10-2)!2!} = 45 \quad (3)$$

这正好是上述两种失效状态数之和。

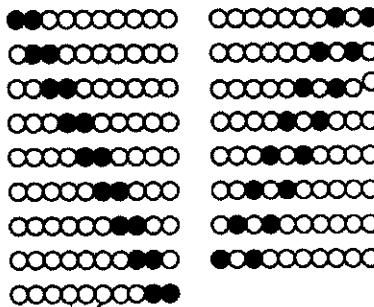


图2 不容许的组件失效状态的组合  
( $n = 10, f = 2, b = 2$ )

由此可见,对失效单元之间的间距有了约束条件之后,容许的失效状态组合数就要减少,系统的可靠度因而下降。

为了分析图1失效状态组合的规律,我们对10个单元进行编号,用编号代表失效单元,于是图1可以表示为

14	15	16	17	18	19	110
25	26	27	28	29	210	
36	37	38	39	310		
47	48	49	410			
58	59	510				
69	610					
710						

同理,如果容许3个单元发生失效,且容许的失效单元之间的最小间距也等于2,则失效状态的组合可以表示为

147	148	149	1410
158	159	1510	
169	1610		
1710			
258	259	2510	
269	2610		
2710			
369	3610		
3710			
4710			

在相同条件下,如容许4个单元发生失效,则失效状态的组合为14710。

通过以上数据和更多数据排列规律的分析、抽象和推断,最终得到系统容许的失效状态的组

合数的模型为

$$q(n, f = 2, b) = \sum_{i=1}^{m(n, f, b)} i \quad (4)$$

$$q(n, f = 3, b) = \sum_{i=0}^{m(n, f, b)-1} \sum_{j=1}^{m(n, f, b)-i} j \quad (5)$$

$$q(n, f \geq 4, b) = \sum_{k_1=0}^{m(n, f, b)-1} \sum_{k_2=k_1}^{m(n, f, b)-1} \sum_{k_3=k_2}^{m(n, f, b)-1} \cdots \sum_{k_{f-2}=k_{f-3}}^{m(n, f, b)-1} \sum_{k_{f-1}=1}^{m(n, f, b)-k_{f-2}} k_{f-1} \quad (6)$$

式中,  $q(n, f, b)$  是系统容许的失效状态的组合数,它是系统所含阵列单元的总数、系统容许的失效单元数和失效单元之间最小间距的函数。 $m(n, f, b)$  是式中各累加项的上界值的主要因子,它也是系统所含阵列单元的总数、系统容许的失效单元数和失效单元之间最小间距的函数。

$\overbrace{\sum \sum \cdots \sum}^k i$  则表示有  $k$  个  $\sum$ 。其中,

$$m(n, f, b) = n - (f-1)(b+1)$$

注意,以上表达式的前提是失效单元之间的最小间距必须大于等于1。当天线阵容许两个相邻组件发生失效,或三个相邻组件发生失效,但与其他失效单元之间的间隔却有最小间距的约束要求时,容许的失效状态的组合数可由式(7)模型给出:

$$q(n, f(\overbrace{1, 1, \cdots, 1}^i, j, k), b) = q((n - (j-1) - (k-1)), f(\overbrace{1, 1, \cdots, 1}^{i+2}), b) \cdot \frac{(i+2)!}{i! \cdot (b-1)!} \quad (7)$$

式中,  $q(n, f(\overbrace{1, 1, \cdots, 1}^i, j, k), b)$  表示天线阵的射频单元总数为  $n$  个,容许的失效单元数为  $i+j+k$  个,其中有  $i$  个失效单元相互最小间距为  $b$ ,有  $j$  个和  $k$  个单元容许无间隔相邻失效,但它们之间或与单个失效单元之间的最小间距也必须为  $b$ 。

$q((n - (j-1) - (k-1)), f(\overbrace{1, 1, \cdots, 1}^{i+2}), b)$  实际上就是前面建立的不容许相邻单元发生失效的状态组合数的表达式,只不过它的单元总数和容许的失效单元数都减少了,即无间隔相邻失效的  $j$  和  $k$  个单元均分别等效为 1 个单元。

必须指出,上述天线阵可靠性模型中的射频收发组件总数  $n$  是指与天线单元相联的输出级组件,并不包括激励级和中间级放大组件。但当存

在层间放大链时,要同时按照树联模型<sup>[1]</sup>对中间级的可靠性进行综合。

## 4 数字示例

这里作为数字示例的有源天线阵,其射频收发阵列单元总数  $n = 100$ ,射频收发阵列单元在规定的任务持续时间内的可靠度  $R_0 = 0.985$ ,系统容许的失效单元数  $f$  为  $2 \sim 8$ ,失效单元之间的最小间距  $b$  为  $0 \sim 8$ ( $b = 0$  实际上是现在通行的常规可靠性模型)。

下面以  $f = 4, b = 2$  为例列出其可靠度表达式为

$$\begin{aligned} R_s(t_s) = & R^{100}(t_s) + \frac{100!}{99!} R^{99}(t_s) [1 - R_0(t_s)] + \\ & q(100, 2, 2) R^{98}(t_s) [1 - R_0(t_s)]^2 + \\ & q(100, 3, 2) R^{97}(t_s) [1 - R_0(t_s)]^3 + \\ & q(100, 3, 2) R^{96}(t_s) [1 - R_0(t_s)]^4 = \\ & 0.91536 \end{aligned} \quad (8)$$

式中,

$$\begin{aligned} q(100, 2, 2) &= \sum_{i=0}^m = \sum_{i=0}^{97} i = 4753 \\ q(100, 3, 2) &= \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=1}^{m-i} j = \sum_{i=0}^{93} \sum_{j=1}^{94-i} j = 142880 \\ q(100, 4, 2) &= \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=i}^{m-1} \sum_{k=1}^{m-j} k = \sum_{i=0}^{90} \sum_{j=1}^{90} \sum_{k=1}^{91-j} k = 3049501 \end{aligned}$$

当上述天线阵的副瓣特性容许失效的 4 个单元中还容许有 1 组 2 个单元无间隔相邻失效,其他条件相同时,天线阵的可靠性模型为

$$\begin{aligned} R_s(t_s) = & R^{100}(t_s) + \frac{100!}{99!} R^{99}(t_s) [1 - R_0(t_s)] + \\ & \frac{100!}{98!} R^{98}(t_s) [1 - R_0(t_s)]^2 + \\ & [q(100, 3, 2) + q(100, 3(1, 2), 2)] \cdot \\ & R^{97}(t_s) [1 - R_0(t_s)]^3 + \\ & [q(100, 4, 2) q(100, 4(1, 1, 2), 2)] \cdot \\ & R^{96}(t_s) [1 - R_0(t_s)]^4 = 0.97129 \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $q(100, 3(1, 2), 2) = \frac{2!}{1!} q(99, 2, 2) = 2 \times 4656 = 9312$

$$q(100, 4(1, 1, 2), 2) = \frac{3!}{2!} q(99, 3, 2) = 3 \times 138415 = 415245$$

上列两组数据说明:在容许失效单元数和失效单元之间的最小间距条件相同的情况下,容许

不容许少量单元无间隔相邻失效,其可靠性也有重大差别。

表 1 所列数据分别是不同条件下有源天线阵的可靠度。表中数据说明,当  $b = 0$  和  $b \neq 0$  时两者的可靠度差别是十分明显的。这说明,如果不考虑超低副瓣性能对失效单元间隔的约束,那么用常规的可靠度模型来分析机载相控阵雷达系统的可靠度,得到的数据是不真实的,这将增大工程反复的风险。

表 1 不同条件下有源天线阵的可靠度

$f$	$b = 0$	$b = 2$	$b = 4$	$b = 6$	$b = 8$
$f = 2(1,1)$	0.80980	0.79973	0.78985	0.78018	0.77072
$f = 3(1,1,1)$	0.93578	0.91104	0.88769	0.86567	0.84495
$f = 4(1,1,1,1)$	0.98231	0.94722	0.91536	0.88642	0.86017
$f = 4(1,1,2)$				0.97129	
$f = 5(1,1,1,1,1)$	0.99591	0.95611	0.92093	0.88976	0.86205
$f = 6(1,1,1,1,1,1)$	0.99919	0.95782	0.92176	0.89013	0.86219
$f = 7(1,1,1,1,1,1,1)$	0.99986	0.95809	0.92185	0.89015	0.86220
$f = 8(1,1,1,1,1,1,1,1)$	0.99998	0.95812	0.92186	0.89015	0.86220

## 5 结束语

本文建立的适用于超低副瓣机载相控阵雷达天线阵的可靠性新模型,还适用于高可靠的微波中继接力、增压油气管道的可靠性设计。从数学模型来说,本文新模型对组合数学也有所拓展。

### 参考文献:

- [1] 丁定浩. 固态相控阵雷达天线阵列可靠度的数学模型[J]. 电子学报, 1982, 10(6): 44-50.
- [2] 丁定浩. 可靠性与维修性工程——系统与电路结构的分析和设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1986.

### 作者简介:



丁定浩 男,1927 年生于江苏吴江,现为华东电子工程研究所客座研究员,主要进行系统可靠性、维修性和保障性的理论和工程研究,出版专著 2 本,发表论文 50 余篇。



李 健 男,1964 年生于陕西户县,现为华东电子工程研究所高级工程师,主要从事质量与可靠性工程管理,感兴趣领域是质量与可靠性工程管理,质量控制与可靠性分析,环境试验与可靠性试验技术等,发表论文 10 余篇。

## 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](http://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](http://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](http://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>