

# T/R 组件故障对 DBF 影响分析及维护策略研究

彭芳<sup>1</sup>, 张兵<sup>2</sup>, 尚宝鹏<sup>3</sup>, 向建军<sup>1</sup>, 吴军<sup>4</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 93107 部队, 沈阳, 110141;  
3. 空军工程大学研究生院, 西安, 710051; 4. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051)

**摘要** 针对相控阵雷达 T/R 组件故障数低于总数 10% 时的可维护性和维护时机问题, 分析通道故障对数字波束形成的影响规律, 提出保持雷达性能不降级的维护策略。首先, 基于面阵结构分别建立发射数字波束形成 (DBF) 数学模型和基于最小均方 (LMS) 算法的接收数字波束形成数学模型。其次, 仿真验证 T/R 组件处于正常和部分失效 2 种状态时的波束形成性能, 采用 5 个指标对比分析故障数量和故障区域对接收 DBF 性能和雷达探测性能的影响。最后, 分析其内在规律, 提出维护策略, 为科学精细维修与作战效能发挥提供理论依据和决策支持。

**关键词** 相控阵雷达; T/R 组件; 发射波束形成; 接收波束形成; 维护策略

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.06.007

**中图分类号** TN95 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)06-0053-07

## Influence of T/R Component Fault on DBF and Maintenance Strategy

PENG Fang<sup>1</sup>, ZHANG Bing<sup>2</sup>, SHANG Baopeng<sup>3</sup>, XIANG Jianjun<sup>1</sup>, WU Jun<sup>4</sup>

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 93107, Shenyang 110141, China; 3. Graduate School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 4. Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract** In view of maintainability and maintenance timing for T/R components of phased array radar in which the fault number is less than 10%, a rule of channel fault forming the influence on DBF is analyzed, and a maintenance strategy to keep radar performance from degradation is proposed. First, mathematical models of transmitting DBF and receiving DBF based on LMS algorithm are established based on the structure of planar array. And then, the transmitting and receiving beam forming performance of T/R components are verified in both normal condition and partial failure through the simulation, and the influence of fault number and fault region on receiving DBF performance and radar detection performance is analyzed by using five indicators. Finally, its internal law is analyzed, and the maintenance strategy is putted forward, providing theoretical basis and decision support for scientific and precise maintenance and operational effectiveness.

**Key words** phased array radar; T/R component; transmitting beam forming; receiving beam forming; maintenance strategy

收稿日期: 2023-12-01

作者简介: 彭芳(1973-), 女, 湖南长沙人, 教授, 博士, 研究方向为机载预警探测。E-mail: pengfang09162022@163.com

通信作者: 吴军(1972-), 男, 湖南长沙人, 教授, 研究方向为作战筹划与任务规划。E-mail: wuboy0210@163.com

**引用格式:** 彭芳, 张兵, 尚宝鹏, 等. T/R 组件故障对 DBF 影响分析及维护策略研究[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(6): 53-59. PENG Fang, ZHANG Bing, SHANG Baopeng, et al. Influence of T/R Component Fault on DBF and Maintenance Strategy[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(6): 53-59.

T/R 组件是相控阵雷达的核心部件,因其具有电路集成度高、装备数量多的特点,容易成为多发故障,其故障数量和故障位置直接影响雷达系统的空间功率合成、数字波束合成(digital beam forming, DBF)、定位跟踪、多目标分辨力、接收灵敏度等重要指标,如果出现多路或重要位置的 T/R 组件故障将会严重影响到接收与发射效果,导致雷达功能降级<sup>[1]</sup>。通常工程中认为故障数低于 T/R 组件总数的 10%,对雷达探测性能不会产生较大影响,可等待集中一次处理,而在该冗余值之内,T/R 组件故障数量与故障位置对发射与接收波束形成仍有一定的影响,可能会导致雷达性能降级。然而对于何时开展换件维修、维修时全部更换故障组件还是部分更换等有关维修决策问题尚无具体标准<sup>[2]</sup>,维护人员在日常维护时主要依靠主观判断。如何判断合理维护时机,为日常维护工作提供科学合理的策略指导,以保证雷达系统正常效能发挥,成为预防维修和精细维修的难点问题。

对 T/R 组件维护的相关研究主要集中在维修决策、故障预测、故障诊断、幅相校正等方面<sup>[3-11]</sup>,形成了一系列研究成果。文献[2]对故障数据建模现状及维修策略优化进行分析。文献[3]根据 BIT 自检数据对故障件进行状态评估,形成维修策略。文献[4]在分析 T/R 组件故障规律的基础上,建立定期维修与视情维修模型。文献[5]研究了矩形和三角形阵列结构中阵元失效对低副瓣特性的影响,为阵元失效修复提供一定依据。文献[6]研究了阵元失效对克罗内克积波束形成性能的影响,提出了一种低复杂度的信号恢复方法,文献[8]针对平面相控阵天线进行损伤分析,利用方向图形状的变化进行损伤评估,文献[9]针对相控阵雷达二维天线阵的维修策略进行研究,引入了天线增益、主瓣展宽和主副瓣比等指标评估探测效能,提出相应的装备维修策略。T/R 组件是发射 DBF 与接收 DBF 的重要物理通道,接收 DBF 的实质是空域滤波,实现增强期望信号,抑制干扰信号的目的,通过自适应算法实现权集寻优,以适应信号环境的变化,该过程对雷达的目标检测性能和抗干扰能力提升有重要作用,因此研究接收 DBF 算法的文献较多,如采用群智能算法来提高雷达对电磁干扰的抑制性能和算法的鲁棒性,以及开展抗主瓣干扰的波束形成算法研究等<sup>[12-15]</sup>。上述研究依托故障数据分析,建立状态评估模型,为预防性维修策略制定提供一定的理论支撑,相关文献分析了阵元失效对天线性能的影响,但影响因素考虑不全面,不同数量、不同位置 T/R 组件对接收波束形成性能及雷达抗干扰性能的影响研究还有待深入<sup>[16]</sup>。

本文以机载雷达常用面阵结构为例,基于发射与接收波束形成基本原理,建立接收信号模型与传

统优化算法模型,构建阵元级 T/R 通道故障数量低于 10%阈值的场景,仿真验证故障数量与故障区域对发射及接收波束形成性能的影响,针对通道故障对接收波束形成性能影响较大的现象,从主瓣增益、主瓣宽度、主副瓣比、干扰方向零陷深度、输出信噪比等 5 个指标对接收波束形成性能进行分析,总结不同故障条件下的影响规律,形成装备维护策略,为精细化主动维修提供有效遵循。

## 1 基于面阵的发射与接收波束形成方向图

### 1.1 面阵及接收信号模型

假设均匀面阵位于  $XOZ$  面内,阵元数目为  $M \times N$ ,排列结构如图 1 所示,水平向、垂直向的阵元间距分别为  $d_x$  与  $d_z$ ,信源数为  $K$ 。 $\Theta_i = (\theta_i, \varphi_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, K$ ), $\theta_i$  和  $\varphi_i$  分别为第  $i$  个信源的俯仰角和方位角,其含义如图 2 所示。其中, $0 \leq \theta_i < 90^\circ, 0 \leq \varphi_i < 360^\circ$ 。

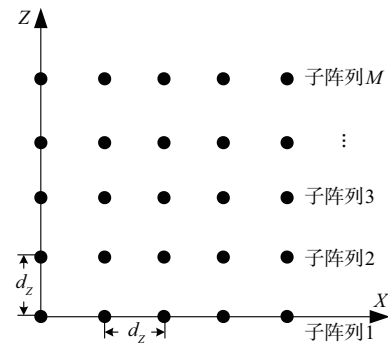


图 1 均匀面阵模型

Fig. 1 Uniform planar array model

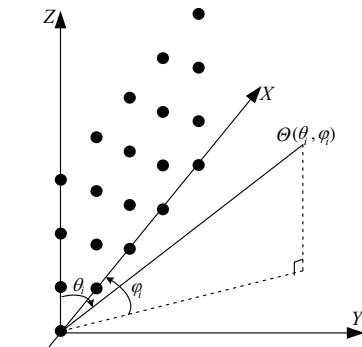


图 2 入射角定义

Fig. 2 Definition of incident angle

由均匀线阵的阵列响应向量可知, $X$  轴与  $Z$  轴上的方向矩阵分别为:

$$\mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{j \frac{2\pi d_x \cos \varphi_1 \sin \theta_1}{\lambda}} & e^{j \frac{2\pi d_x \cos \varphi_2 \sin \theta_2}{\lambda}} & \cdots & e^{j \frac{2\pi d_x \cos \varphi_K \sin \theta_K}{\lambda}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j \frac{2\pi d_x (N-1) \cos \varphi_1 \sin \theta_1}{\lambda}} & e^{j \frac{2\pi d_x (N-1) \cos \varphi_2 \sin \theta_2}{\lambda}} & \cdots & e^{j \frac{2\pi d_x (N-1) \cos \varphi_K \sin \theta_K}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{\frac{j2\pi d_z \cos \theta_1}{\lambda}} & e^{\frac{j2\pi d_z \cos \theta_2}{\lambda}} & \cdots & e^{\frac{j2\pi d_z \cos \theta_K}{\lambda}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{\frac{j2\pi d_z (M-1) \cos \theta_1}{\lambda}} & e^{\frac{j2\pi d_z (M-1) \cos \theta_2}{\lambda}} & \cdots & e^{\frac{j2\pi d_z (M-1) \cos \theta_K}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由图 1 可知,子阵列 1 的方向矩阵为  $\mathbf{A}_x$ ,子阵列 2 的方向矩阵等同于将子阵列 1 向  $z$  方向整体推移  $d_z$ ,因此增加了  $z$  方向的相位差  $j2\pi d_z \cos \theta/\lambda$ ,以此类推,第  $M$  个子阵列的方向矩阵为  $\mathbf{A}_M = \mathbf{A}_x \mathbf{D}_M(\mathbf{A}_z)$ ,其中,  $\mathbf{D}_M(\mathbf{A}_z)$  为由矩阵  $\mathbf{A}_z$  的第  $M$  行构造的一个对角矩阵,可得:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_x \mathbf{D}_1(\mathbf{A}_z) \\ \mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_x \mathbf{D}_2(\mathbf{A}_z) \\ \vdots \\ \mathbf{A}_M = \mathbf{A}_x \mathbf{D}_M(\mathbf{A}_z) \end{cases} \quad (3)$$

面阵方向矩阵  $\mathbf{A}(\Theta)$  为:

$$\mathbf{A}(\Theta) = [\mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \cdots \mathbf{A}_M] \in \mathbf{C}^{MN \times K} \quad (4)$$

也可以表示为:

$$\mathbf{A}(\Theta) = [\mathbf{a}(\varphi_1, \theta_1), \mathbf{a}(\varphi_2, \theta_2), \cdots, \mathbf{a}(\varphi_K, \theta_K)] \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{a}(\varphi, \theta) \in \mathbf{C}^{MN \times 1}$  即为面阵的方向矢量。

面阵接收信号模型为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\Theta) \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{S}(t) \in \mathbf{C}^{K \times L}$  为空间源信号;  $\mathbf{N}(t) \in \mathbf{C}^{MN \times L}$  为阵列接收通道的高斯白噪声矩阵;  $L$  为快拍数。

### 1.2 发射波束形成方向图

在发射波束形成中,面阵的静态方向图  $G_1(\varphi, \theta)$  为方向矢量各元素直接相加,取绝对值并归一化,有:

$$G_1(\varphi, \theta) = 20 \lg \left\{ \frac{\left| \sum_{i=1}^{MN} a_i(\varphi, \theta) \right|}{\max \left[ \left| \sum_{i=1}^{MN} a_i(\varphi, \theta) \right| \right]} \right\} \quad (7)$$

如要形成波束指向为  $(\varphi_0, \theta_0)$  的方向图,则需要对阵列进行加权,此时动态方向图  $G_2(\varphi, \theta)$  为:

$$G_2(\varphi, \theta) = 20 \lg \left\{ \frac{\left| \sum_{i=1}^{MN} a_i^*(\varphi_0, \theta_0) a_i(\varphi, \theta) \right|}{\max \left[ \left| \sum_{i=1}^{MN} a_i^*(\varphi_0, \theta_0) a_i(\varphi, \theta) \right| \right]} \right\} \quad (8)$$

根据雷达扇区指令及波位编排设置,相应改变阵列权值,即可实现天线波束在方位与仰角 2 个方向上的相控扫描。

### 1.3 接收波束形成方向图

在众多波束形成算法中,LMS 算法作为一种传统最优自适应波束形成算法,在信号处理中广泛应用。算法用最小均方误差为代价函数,采用梯度下降法进行迭代,沿着代价函数的负梯度方向搜索权

向量,最终得到代价函数的最优解即为最佳权向量。

LMS 算法的代价函数为:

$$\min_w J(\mathbf{W}) = E[|e(n)|^2] = E[|d(n) - y(n)|^2] \quad (7)$$

式中:阵列输出信号为  $y(n) = \mathbf{W}^H(n) \mathbf{X}(n)$ ,  $\mathbf{X}(n) \in \mathbf{C}^{MN \times L}$ ,  $\mathbf{W}(n) \in \mathbf{C}^{MN \times 1}$ ;  $d(n)$  为期望信号;  $e(n)$  为误差信号。

展开式(7),有:

$$J(\mathbf{W}) = E[|d(n)|^2] - 2\mathbf{W}^H \mathbf{r}_{xd} + \mathbf{W}^H \mathbf{R}_X \mathbf{W} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{r}_{xd}$  为  $\mathbf{X}(n)$  与  $d(n)$  的互相关矢量;  $\mathbf{R}_X$  为  $\mathbf{X}(n)$  的自相关矩阵。利用梯度下降法,得到 LMS 算法的权矢量更新为:

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) + 2\mu e^*(k) \mathbf{X}(k) \quad (9)$$

式中:  $\mu$  为步长参数,当满足  $0 < \mu < 1/\text{tr}(\mathbf{R}_X)$  时,迭代算法收敛。

## 2 T/R 组件对 DBF 性能与探测效能的影响分析

现代机载雷达中,T/R 组件的发射通道通常由直接数字频率合成器(direct digital synthesier, DDS)、上变频和功率放大器组成。根据发射信号的要求,系统确定基本频率和幅/相控制字,并考虑低旁瓣的幅度加权、波束扫描的相位加权和幅/相误差校正所需的幅/相加权因子,形成统一的频率和幅/相控制字来控制 DDS 的工作。将参考时钟信号和上述数字控制信号送入各阵元 DDS 中,产生的基带信号经上变频、高功率放大和收/发转换开关后,传送到阵列天线辐射单元,在空间合成所需的发射波束,实现波束扫描。

接收时,天线阵面接收的回波信号经微波限幅、微波小信号低噪声放大、下变频、滤波、A/D 转换、数字正交鉴相等阵元级处理,各接收通道输出正交的 I/Q 数字信号,通过光纤系统传输到信号处理模块的数字波束形成器中进行接收 DBF,即对各阵元的 I/Q 数字信号进行复加权和求和运算处理,形成所需波束,该过程实质为空域滤波,通过自适应调整权值实现对噪声的抑制及干扰置零功能。

T/R 组件是发射 DBF 与接收 DBF 的重要物理通道,在日常维护时需借助整机 BIT,将 T/R 组件故障数量及位置信息实时显示出来,并用醒目颜色区分故障件,供维修决策人员参考。

### 2.1 组件正常条件下 DBF 仿真分析

在发射 DBF 仿真过程中,只考虑相位加权实现波束指向,忽略幅度加权因素。仿真条件 1 为: XOZ 竖直面阵,阵元数目  $M = N = 16$ ,阵元间距  $d_x = d_z = 0.5\lambda$ ,工作波长  $\lambda = 0.1 \text{ m}$ ,令波束二维指向角为:俯仰角  $\theta_0 = 40^\circ$ ,方位角  $\phi_0 = 50^\circ$ ,图 3 为波束形成方向图。

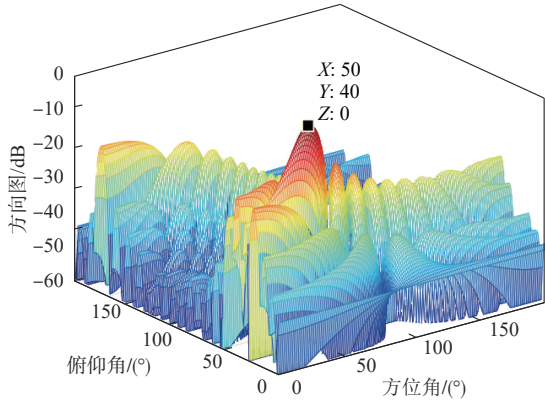


图3 带指向的发射波束形成方向图

接收 DBF 仿真过程中,主要对阵列接收信号  $\mathbf{X}(n)$  按照式(6)进行仿真建模,忽略两路正交变换过程。仿真条件 2 如下:面阵结构参数同条件 1;目标与 2 个干扰信号的俯仰角均为  $\theta = 60^\circ$ ,方位角  $\phi$  设置:目标为  $20^\circ$ 、干扰 1 为  $40^\circ$ 、干扰 2 为  $60^\circ$ ,均为旁瓣干扰。信噪比  $\text{SNR} = 25 \text{ dB}$ ,干噪比  $\text{JNR1} = 10 \text{ dB}$ , $\text{JNR2} = 20 \text{ dB}$ ,快拍数  $L = 700$ 。

接收 DBF 如图 4 所示。由图可知,接收方向图的主波束正确指向了目标来波方向,且对 2 个旁瓣干扰信号实现了自适应调零,即在干扰方向形成置零,幅度达到  $-60 \text{ dB}$  左右。

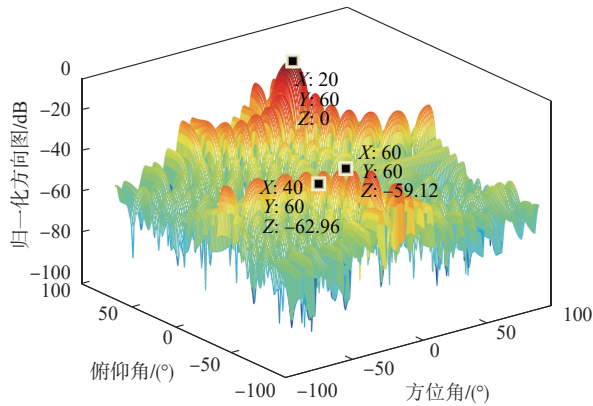


图4 正常接收波束形成方向图

Fig. 4 Normal receive beamforming pattern

## 2.2 组件部分失效条件下发射 DBF 性能分析

数字阵列雷达中每个面阵有成百上千个辐射阵元,与阵元连接的 T/R 组件具有很好的重复性、一致性和可靠性。基于仿真条件 1 中的面阵参数,当所有组件的 T 通道全部正常时,发射波束形成方向图如图 5 所示,主瓣指向  $(90^\circ, 90^\circ)$ ,电平为  $48.16 \text{ dB}$ ,第一旁瓣处于  $(100^\circ, 90^\circ)$ ,电平为  $34.94 \text{ dB}$ 。

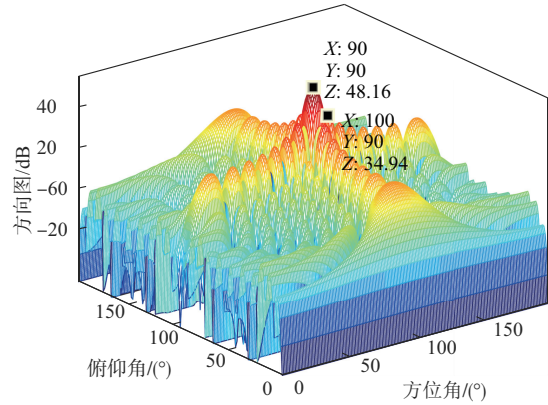


图5 正常发射波束形成方向图

Fig. 5 Normal transmit beamforming pattern

设 T/R 组件故障为 24 个,对应面阵中心区域,具体位于子阵列 7~子阵列 10 的第 6~11 通道,该故障条件下的发射波束形成方向图如图 6 所示。主瓣电平为  $47.31 \text{ dB}$ ,比正常方向图下降了  $0.85 \text{ dB}$ ,第一旁瓣电平为  $37.57 \text{ dB}$ ,比正常方向图提升了  $2.63 \text{ dB}$ ,由此可知,当 T/R 组件失效数目接近 10% 的维护阈值时,天线增益降低了不到  $1 \text{ dB}$ ,对发射天线方向图的影响不大。

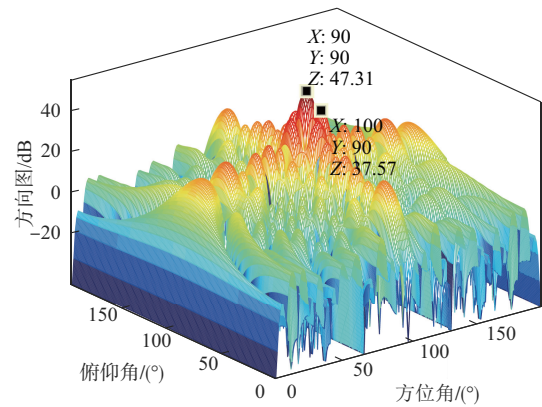


图6 T/R 部分失效时的发射波束方向图

Fig. 6 Transmit beam pattern of partially failed T/R components

## 2.3 组件部分失效条件下接收 DBF 性能分析

T/R 组件中 R 通道故障会导致接收波束形成方向图性能的恶化,主要集中在主瓣增益下降、主瓣宽度增加、第一旁瓣电平抬高、干扰方向零陷深度减小、输出信干噪比减小等方面,这些变化均对雷达探测效能产生不利影响,如主瓣增益、输出信干噪比影响目标的探测概率,主瓣宽度影响角度分辨率和测角精度,第一旁瓣电平、干扰零陷深度和输出信干噪比影响雷达的抗干扰性能。

仿真参数同仿真条件 2,设置 2 类典型仿真场景:一类是故障均在周边区域,但数量不同;另一类是故障数量相同,位置分布区域不同。

2.3.1 周边区域故障、数量不同时的仿真对比

对在周边区域分别设置 8 个和 24 个故障的情形进行对比分析,如图 7 所示。标红点为当前阵元所对应的接收通道故障,仿真结果如图 8 和图 9 所示。

周边区域故障数量为 8 时,与正常接收方向图相比,干扰 1 与干扰 2 的零陷深度分别上升约 7.55 dB 和 2.92 dB,上升率分别约为 12% 和 4.94%。当故障数量增加至 24 时,干扰 1 与干扰 2 的零陷深度分别上升约 8.31 dB 和 7.69 dB,上升率分别约为 13.2% 和 13%。由此可知,周边区域接收通道故障虽然对目标指向无影响,但对干扰的抑制能力减弱,数量较少时,对临近目标的干扰影响较大,数量增加后,对 2 个干扰抑制能力的影响基本一致。

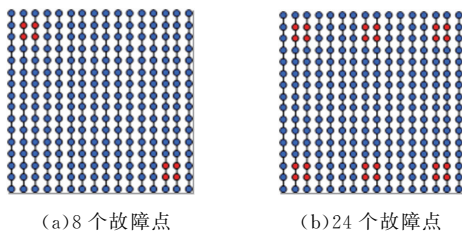


图 7 周边区域故障点设置

Fig. 7 Peripheral area fault point set

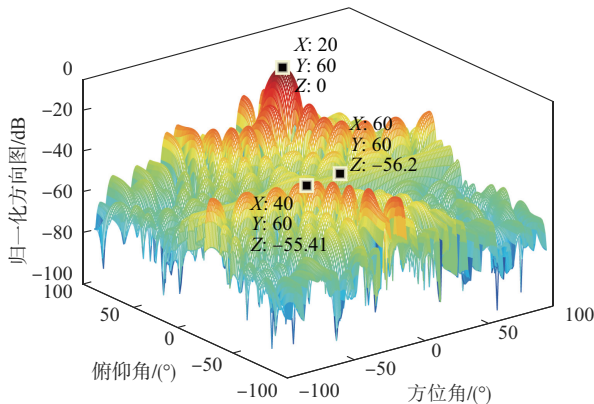


图 8 接收波束形成(周边 8 个故障点)

Fig. 8 Receive beamforming (with 8 peripheral faults)

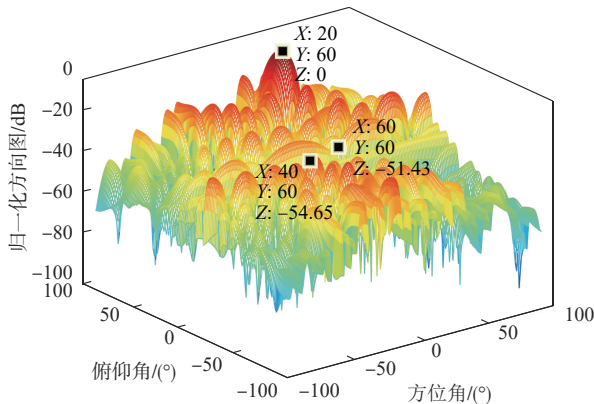


图 9 接收波束形成(周边 24 个故障点)

Fig. 9 Receive beamforming (with 24 peripheral faults)

当周边区域故障数量从 4~24 个逐步增加时,接

收波束形成方向图各指标的变化情况如表 1 所示。其中数量增加规则为图 7(b)中左下角 4 个标红的故障通道开始,按照逆时针方向逐步增加至 24 个。

表 1 周边区域故障数量与各指标关系

Tab. 1 Relationship between the number of peripheral area faults and various indicators

数量	主瓣增益/ dB	主瓣宽度/ °	主副瓣比/ dB	干扰 1 零陷深度/ dB	干扰 2 零陷深度/ dB	输出 SINR/ dB
0	0.016 04	7.31	-13.31	-62.96	-59.12	41.98
4	-0.007 89	7.30	-13.93	-63.97	-62.49	38.49
8	-0.004 93	7.33	-12.89	-56.33	-56.34	39.60
12	0.010 91	7.49	-13.38	-53.99	-59.59	39.78
16	-0.034 69	7.38	-13.73	-53.75	-51.00	36.21
20	-0.000 67	7.49	-13.16	-53.01	-51.18	35.51
24	0.009 63	7.62	-13.56	-54.65	-51.43	34.45

由表 1 可知,当周边区域故障数量由 4 个逐渐增加到 24 个时,主瓣增益均低于正常值,但振荡幅度不大,约为 0.05 dB;主瓣宽度随数量增加呈展宽趋势,振荡幅度为 0.32°;主副瓣比无明显变化规律,振荡幅度较小约为 1 dB;2 个干扰的归一化零陷深度在故障数量较少时变化不明显,甚至出现零陷加深的现象,但数量逐步增加时,干扰零陷大致呈上升趋势,上升幅度约为 11 dB;输出信干噪比均低于正常值,基本呈下降趋势,变化幅度为 5.33 dB。

2.3.2 故障数量相同、分布区域不同时的仿真对比

设故障数量均为 24,分别处于阵列的周边和中心区域,如图 10 所示。周边区域故障仿真结果如图 9 所示,中心区域故障仿真结果如图 11 所示。

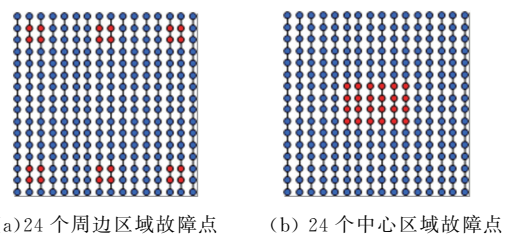


图 10 不同区域故障点设置

Fig. 10 Fault point setup in different areas

当故障数量均为 24 个时,由图 4、图 9 和图 11 的方向图对比可知,中心区域故障下干扰 1 的零陷深度上升约 14.6 dB,干扰 2 上升约 13.69 dB,变化率基本一致,约为 23.2%。比周边区域故障相比,其零陷深度分别上升约 6.29 dB 和 6.0 dB,上升率分别约为 11.5% 和 11.7%。可以看出,当故障集中在中心区域时,随着零陷深度的进一步抬高,对干扰的抑制能力进一步下降,对 2 个干扰源抑制能力的影响基本相当。

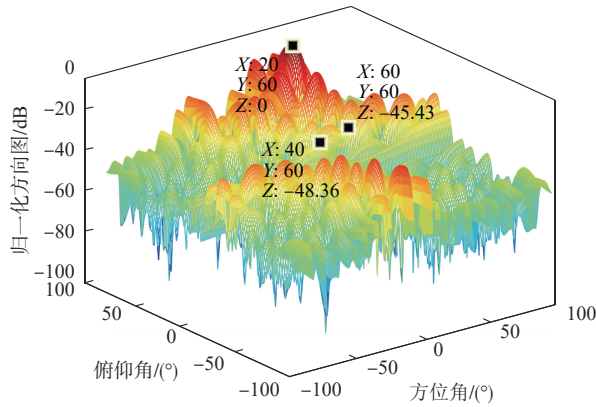


图 11 接收波束形成(中心 24 个故障点)

Fig. 11 Receive beamforming (with 24 central faults)

当中心区域故障数量从 4~24 个逐步增加时,接收波束形成方向图各指标的变化情况如表 2 所示。数量增加规则为图 10(b)中左侧第 1 列红色的 4 个故障点开始,按照列顺序逐步增加至 24 个。

表 2 中心区域故障数量与各指标的关系

Tab. 2 Relationship between the number of central area faults and various indicators

故障数量	主瓣增益/dB	主瓣宽度/(°)	主副瓣比/dB	干扰 1 零陷深度/dB	干扰 2 零陷深度/dB	输出 SINR/dB
0	0.016 04	7.31	-13.31	-62.96	-59.12	41.98
4	-0.015 21	7.22	-12.99	-55.36	-50.94	35.41
8	0.001 96	7.18	-12.46	-52.72	-51.22	35.29
12	-0.010 99	7.09	-11.81	-51.87	-53.68	35.10
16	-0.008 84	7.03	-11.03	-49.63	-48.09	35.99
20	-0.034 47	6.94	-10.52	-52.51	-48.46	34.59
24	-0.012 69	6.91	-10.27	-48.36	-45.43	33.91

由表 2 可知,当中心区域故障数量增多,主瓣增益仍无明显变化。主瓣宽度随故障数量增加呈变窄趋势,最大变化量为  $0.4^\circ$ ,该变化趋势与周边区域故障有所不同;主副瓣比逐步减小,变化幅度约 3 dB;2 个干扰的归一化零陷深度均高于正常值,振荡幅度约为 8 dB。输出信干噪比呈下降趋势,变化幅度约为 2.1 dB。

将表 1 与表 2 进行对比,当故障数量相同时,中心区域故障下的主副瓣比高于周边区域。在主瓣宽度方面,周边区域故障会导致主瓣展宽,中心区域故障会导致主瓣变窄。在干扰零陷深度方面,中心区域故障导致的零陷抬高更明显。在输出信干噪比方面,中心区域故障下的数值小于周边区域。综上,中心区域故障对方向图性能及雷达探测性能的影响要大于周边区域,特别是抗干扰能力下降明显。

### 3 T/R 组件的维护准则

根据仿真结果,如果故障单元集中在中心区域,即使 T/R 组件故障数低于 10%,还会对发射与接收的 DBF 性能会产生一定的影响,如第一旁瓣电平

抬高,主瓣展宽、对旁瓣干扰的抑制能力减弱等。除 T/R 组件内部故障,供电、射频通道、传输网络、控制等其他因素导致的故障,也会产生同等效果,维护人员,需要深入了解故障影响机理,T/R 组件的维护准则如下:

1)通常维护规程规定,日常维护时如通过全机 BIT 自检、定检或排故发现 T/R 组件故障数量超过总数的 10%,或者超出设计冗余范围,将对雷达的探测性能造成显著影响,必须按照维护规程对全部故障件进行更换。

2)T/R 组件故障数低于 10%时,在可更换件不足的情况下,优先更换位于中心区域的 T/R 故障件。

3)T/R 组件故障数低于 10%时,在没有可更换件的情况下,可将边缘区域正常的 T/R 组件替换中心区域故障的 T/R 组件。

维护流程如图 12 所示。通常工程应用中若干 T/R 组件会合成一个 T/RU 模块(外场可更换单元,即 LRU),为减少传输损耗,根据就近安装原则,会形成一个集中区域。如果某个模块内故障通道数目较多,优先更换,其他原则同上。

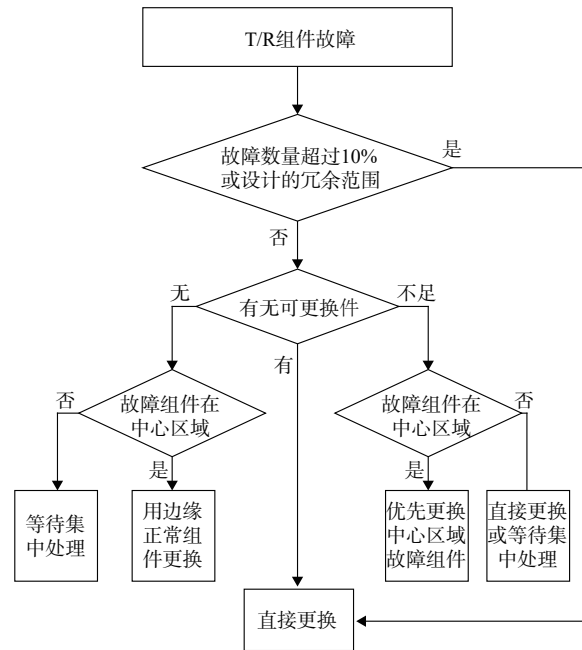


图 12 T/R 组件的维护流程

Fig. 12 Maintenance process of T/R modules

## 4 结论

本文基于数字波束形成原理进行数学建模与仿真,分析了 T/R 通道故障数目低于通道总数的 10%条件下,故障数量与位置关系对波束形成性能及雷达探测效能的影响,仿真结果表明,发射及接收波束形成性能与 T/R 组件故障数目和是否处于中心区域等因素紧密相关,主要结论如下:

1)由于接收通道主要完成对雷达回波信号的接收处理,然后再进行目标检测与跟踪,故接收通道故障对雷达性能的影响程度要大于发射通道,因此,对于T/RU单元,如出现接收通道故障数较多的情形,要优先更换备件。阵列中心区域的故障对波束形成性能影响较大,会导致旁瓣抬高、旁瓣干扰抑制能力下降等现象,要优先更换。

2)在雷达系统BIT自检、定检、排故时发现T/R组件故障,即使T/R组件故障数量低于通道总数的10%,仍要积极遵循以上维护准则,主动找准维护时机,防止出现接近雷达性能指标下限的情况,以保证战训任务的顺利执行。

3)如出现的T/R组件故障对雷达性能影响较小的情况,在等待故障集中处理期间,雷达可采用副瓣匿影、工作模式调整等手段以应对复杂电磁环境下的探测与跟踪。

### 参考文献

- [1] 陈毓坤,于晖,陆宁云.基于半监督深度学习的雷达收发组件故障诊断[J].系统工程与电子技术,2023,45(10):3329-3337.  
CHEN Y K, YU H, LU N Y. Fault Diagnosis of Radar T/R Module Based on Semi-Supervised Deep Learning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(10): 3329-3337. (in Chinese)
- [2] 蒋伟,盛文,祁炜,等.大型相控阵雷达T/R组件维修决策问题综述[J].系统工程与电子技术,2022,44(1):127-138.  
JIANG W, SHENG W, QI W, et al. Survey on Maintenance Decision of Large-Scale Phased Array Radar's T/R Module[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(1): 127-138. (in Chinese)
- [3] 蒋伟,王挺,盛文,等.基于状态评估的相控阵雷达T/R组件维修策略研究[J].兵工学报,2019,40(1):182-188.  
JIANG W, WANG T, SHENG W, et al. Research on Condition-Assessment-Based Maintenance Strategy for T/R Module of Phased Array Radar[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(1): 182-188. (in Chinese)
- [4] 李文祥,于兴伟,鲁力,等.某大型相控阵雷达T/R组件故障规律及维修策略分析[J].空军预警学院学报,2017,31(2):98-101.  
LI W X, YU X W, LU L, et al. Analysis of Fault Law and Maintenance Strategy of T/R Modules in Phased Array Radar[J]. Journal of Air & Space Early Warning Research, 2017, 31(2): 98-101. (in Chinese)
- [5] 万康.矩形与三角布阵阵元失效影响对比[J].舰船电子工程,2022,42(1):67-72.  
WAN K. Comparison of the Effects of the Failure of Rectangular and Triangular Grid Planar Array Element [J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(1): 67-72. (in Chinese)
- [6] 戴金洲,沙硕,厉剑,等.阵元失效对克罗内克积波束形成性能的影响[J].声学技术,2022,41(4):586-593.  
DAI J Z, SHA S, LI J, et al. The Impact of Invalidated Microphones on the Performance of Kronecker Product-Based Beamformer[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(4): 586-593. (in Chinese)
- [7] 范梦恒,赵宁,张宇.T/R组件故障预测技术研究[J].雷达与对抗,2022,42(1):30-32.  
FAN M H, ZHAO N, ZHANG Y. Research on Fault Prediction Technology of T/R Module[J]. Radar & ECM, 2022, 42(1): 30-32. (in Chinese)
- [8] 张宏伟,董盛蓝,吕波.平面相控阵天线损伤分析[J].雷达科学与技术,2017,15(3):322-326.  
ZHANG H W, DONG S L, LYU B. Damage Analysis of Planar Phased Array Antenna[J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(3): 322-326. (in Chinese)
- [9] 韩伟,陈传生,宋亚伟,等.基于阵元故障影响评估的相控阵雷达维修策略[J].火控雷达技术,2021,50(4):20-25.  
HAN W, CHEN C S, SONG Y W, et al. The Maintenance Strategies of Phased Array Radar Based on Influence Evaluation of Array Element Fault[J]. Fire Control Radar Technology, 2021, 50(4): 20-25. (in Chinese)
- [10] ACHARYA O P, PATNAIK A. Antenna Array Failure Correction[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2017, 59(6): 106-115.
- [11] CHEN Y S, TSAI I L. Detection and Correction of Element Failures Using a Cumulative sum Scheme for Active Phased Arrays[J]. IEEE Access, 2018, 6: 8797-8809.
- [12] SUN G, LIU Y H, LI H, et al. An Antenna Array Sidelobe Level Reduction Approach through Invasive Weed Optimization[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2018(4): 1-16.
- [13] 彭芳,吴军,王帅,等.基于SVRGD的机载预警雷达自适应波束形成算法[J].系统工程与电子技术,2021,43(1):83-90.  
PENG F, WU J, WANG S, et al. Adaptive Beamforming Algorithm for Airborne Early Warning Radar Based on SVRGD[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(1): 83-90. (in Chinese)
- [14] PENG F, WU J, WANG S, et al. An Anti-Main-Lobe Jamming Algorithm for Airborne Early Warning Radar Based on APC-SVRGD Joint Optimization[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022, 33(1): 134-143.
- [15] YANG Z, WANG C, ZHANG Z M, et al. Accelerated-Stochastic Gradient Descent with Step Size Selection Rules[J]. Signal Processing, 2019, 159(6): 171-186.
- [16] XIAO D H, JIANG P Y, BIN D, et al. A Remaining Useful Life Prediction Method for T/R Module Based on Index Similarity[C]// 2018 Prognostics and System Health Management Conference. Chongqing: IEEE, 2018: 647-654.

(编辑:徐楠楠)