

引用格式:朱赛,蔡金燕,韩春辉,等.失效阵元对阵列天线性能影响分析[J].电光与控制,2019,26(8):54-59. ZHU S, CAI J Y, HAN C H, et al. Influence of failed element on array antenna performance[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(8):54-59.

失效阵元对阵列天线性能影响分析

朱赛¹, 蔡金燕¹, 韩春辉¹, 安婷¹, 曲利峰²

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003; 2. 驻167厂军代室, 成都 610000)

摘要:由大量阵元组成的阵列天线广泛应用于现代雷达装备,实际应用中阵列天线不断出现失效阵元。针对这一问题,分析了不同规模阵列天线中不同数目阵元失效概率,设计了不同失效阵元组合下阵列天线性能分析流程。以不同规模的Chebyshev直线阵和Taylor直线阵为例,分析了阵列天线最大副瓣电平、平均副瓣电平、半功率波瓣宽度、第一零点波瓣宽度及方向系数与失效阵元激励、位置之间的关系,该分析结果为具有失效阵元的阵列天线自修复奠定了基础。

关键词:阵列天线;失效阵元;可靠性;性能影响

中图分类号: TN956; V240.2

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.08.011

Influence of Failed Element on Array Antenna Performance

ZHU Sai¹, CAI Jin-yan¹, HAN Chun-hui¹, AN Ting¹, QU Li-feng²

(1. Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China;

2. Military Representative Office in No. 167 Factory, Chengdu 610000, China)

Abstract: Array antennas consisting of a large number of array elements are widely used in modern radar equipment. In actual application, the array antennas are constantly experiencing failed elements. The failure probability of array elements of different numbers in array antennas of different sizes is analyzed, and the performance analysis process of array antennas under different combination modes of failure elements is designed. Taking the Chebyshev linear array and the Taylor linear array of different scales as examples, the relationship of maximum sidelobe level, average sidelobe level, half-power beamwidth, first nulls beamwidth, directivity coefficient of the array antenna with the failed elements' amplitude and position is analyzed. The analysis results provide a basis for self-repairing of array antennas with failed array elements.

Key words: array antenna; failed element; reliability; performance influence

0 引言

阵列天线因大功率、高增益、快速波束扫描等特点而被广泛应用于现代雷达装备^[1]。阵列天线结构复杂,阵元失效不易替换修复,特别在航空航天、战场等应用环境下,无法及时修复。因此,分析失效阵元对阵列天线性能的影响,在保证阵列天线性能的前提下进行阵列的自修复,就显得尤为重要。

国内外学者对阵列天线的失效阵元分析及自修复进行了研究。在阵元失效影响分析研究中,主要研究了阵元失效对方向图主瓣和副瓣电平^[2]、增益^[3]、最大

影副瓣电平^[4]以及不同区域阵元失效对副瓣电平的影响^[5];在阵列自修复研究中,通过智能算法进行阵元激励的重新分配,从而一定程度恢复阵列天线性能^[6-8]。在计算过程中,主要考虑阵列的最大副瓣电平^[9]、半功率波瓣带宽^[10]等性能。研究过程中,阵元失效情况设置较少,性能参数分析不够全面。

本文以Chebyshev直线阵和Taylor直线阵为例,详细分析了不同规模阵列在各种阵元失效情况下的性能变化,分析了不同数目、不同位置阵元失效对阵列最大副瓣电平、平均副瓣电平、半功率波瓣宽度、第一零点波瓣宽度、天线方向系数等参数的影响,分析结果为阵列天线的自修复研究奠定了基础。

1 阵列天线基础

1.1 阵列天线及其方向图

方向图是表征天线产生电磁场及其能量空间分布

收稿日期:2018-07-31 修回日期:2018-09-12

基金项目:国家自然科学基金(61601495)

作者简介:朱赛(1987—),男,河南周口人,博士,讲师,研究方向为阵列天线损伤评估与修正。

的性能参数,通常较为关心的是场强方向图。

在阵列天线分析中,经常假设阵列中天线单元同性并忽略单元之间互耦效应,按照方向图乘积定理进行叠加计算。对于结构形状、电流分布和安装姿态都一样的相似元组成的均匀直线阵,其辐射场为^[11]

$$E(\theta) = E_a(\theta)f_c(\theta) \quad (1)$$

式中: $f_c(\theta)$ 为单元因子; $E_a(\theta)$ 为阵因子,

$$E_a(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n \exp(j\varphi_n) \exp[jk(n-1)d\sin\theta] \quad (2)$$

式中: $I_n \exp(j\varphi_n)$ 为阵元 n 的激励复电流,线性变化的相位 φ_n 可以实现波束的空间扫描; $k=2\pi/\lambda$; d 为相邻阵元间距; $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$, 为俯仰角。

若直线阵中阵元为均匀同向天线,且初始相位均为零,则阵列方向图为

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n \exp[jk(n-1)d\sin\theta] \quad (3)$$

工程应用中,通常对方向图进行归一化并采用对数显示,其单位为 dB,

$$F_{dB} = 20 \lg \frac{|F(\theta)|}{|F(\theta)|_{\max}} \quad (4)$$

1.2 阵列天线关键性能参数

阵列天线方向图中,最大的波瓣称为主瓣,主瓣以外任何方向的辐射瓣通称为副(旁)瓣,其关键性能参数主要有副瓣电平、半功率波瓣宽度、第一零点波瓣宽度、方向系数等。

1) 副瓣电平(Side Lobe Level, SLL)指副瓣峰值与主瓣最大值之比,一般指主瓣旁边第一副瓣电平(通常是最大的副瓣电平),常用 dB 表示。

2) 半功率波瓣宽度(Half-Power Beamwidth, HP-BW),又称半功率波束宽度或 3 dB 波瓣宽度,主瓣最大值两边场强等于最大场强的 $1/\sqrt{2} = 0.707$ 的两辐射方向之间的夹角,也称为 3 dB 波束宽度。

3) 第一零点波瓣宽度(First Nulls Beamwidth, FN-BW)即零功率波瓣宽度,在包含主瓣的平面内,主瓣两侧第一零点间的夹角。

4) 天线方向系数是定量表示天线辐射的电磁能量集中程度以描述方向特性的一个参数,也称方向性系数,是天线在给定方向辐射强度与全空域平均辐射强度之比,即

$$D = \frac{|E(\theta_0, \varphi_0)|^2}{|E|_{av}^2} \quad (5)$$

2 失效阵元对性能影响分析流程

2.1 阵列天线可靠性分析

对于由 N 个阵元组成的阵列天线,若每个阵列的可靠性符合指数分布,即 $r(t) = e^{-\lambda t}$,且彼此独立,则

阵列中出现 n 个失效阵元的概率为

$$P_n(t) = C_N^n r(t)^{(N-n)} (1-r(t))^n \quad (6)$$

式中, $n=1, 2, \dots, N$, 则阵列天线中出现失效阵元的概率函数为

$$P(t) = \sum_{n=1}^N P_n(t) = \sum_{n=1}^N C_N^n r(t)^{(N-n)} (1-r(t))^n \quad (7)$$

则阵列天线平均无故障时间(Mean Time Between Failures, MTBF),即出现 1 个以上失效阵元的平均故障间隔时间为

$$T_{MTBF} = \int_0^{\infty} 1 - P(t) dt = \int_0^{\infty} 1 - \sum_{n=1}^N C_N^n r(t)^{(N-n)} (1-r(t))^n dt \quad (8)$$

对于不同规模的阵列,根据式(8)可求其出现不同数量失效阵元的平均故障间隔时间。设阵列规模 N 分别为 16, 32, 64, 128, 阵元失效率 $\lambda = 10^{-6}/h$, 其平均无失效阵元时间如表 1 所示。

表 1 不同规模阵列天线平均无失效阵元时间

Table 1 MTBF of different scales of array antennas

阵列规模 N	16	32	64	128
T_{MTBF}/h	6.25E4	3.13E4	1.56E4	7.81E3

由表 1 可以看出,随着阵列天线规模的增加,其平均无失效阵元的时间越来越短,即阵元失效越来越频繁。

对于固定规模的阵列天线,可由式(6)分析出现不同数量阵元失效的概率。对于规模 N 为 32 的阵列天线,分别计算 $n=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 时的 $P_n(t)$ 值,即阵列天线分别出现 1, 2, 3, 4, 5, 6 个阵元失效的概率函数,计算结果如图 1 所示。

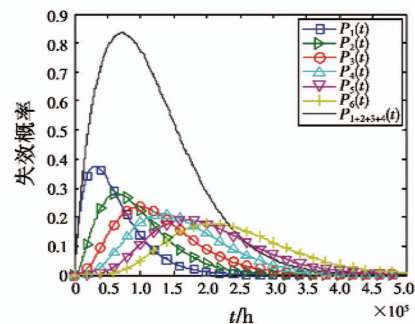


图 1 不同数量阵元失效概率

Fig. 1 Different number elements' failure probability

由图 1 可以看出,当 $t < 6.0E4$ 时, $P_1(t) > P_2(t) > P_3(t) > P_4(t) > P_5(t) > P_6(t)$, 即较小数量阵元失效概率大于大数量阵元失效概率;随着时间 t 的增加,在小数量阵元失效的基础上,较大数量阵元失效的概率逐渐增加。

在整个运行时间上, $\max P_1(t) > \max P_2(t) > \max P_3(t) > \max P_4(t) > \max P_5(t) > \max P_6(t)$, 出现 1, 2, 3, 4, 5, 6

个失效阵元的概率依次递减,即数量较小的失效阵元发生的概率较大。

图1中, $P_{1+2+3+4}(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t)$,即出现1,2,3,4个阵元失效的概率之和。由图1可以看出,当 $2.17E4 \text{ h} < t < 1.55E5 \text{ h}$ 时, $P_{1+2+3+4}(t) > 0.5$,即出现1,2,3,4个阵元失效的概率超过0.5; $P_{1+2+3+4}(t)$ 在 $t = 7.24E4 \text{ h}$ 时达到最大值0.83,即1,2,3,4个阵元失效的概率之和达到0.83;当 $1.55E5 \text{ h} < t$ 时, $P_{1+2+3+4}(t) < 0.5$,此时前面时间的累积使得失效阵元数量超过4,从而使得失效阵元数目大于4的概率增加。

2.2 不同阵元失效的阵列天线性能分析流程

由2.1节分析可知,阵列天线发生小数目阵元失效的概率较大,因此在分析阵元失效对阵列天线性能影响时,失效阵元数目设置较小。

对于给定的阵列天线,为了充分分析不同阵元失效情况下天线性能的变化,对最大失效阵元数目范围内所有失效阵元数目、所有失效阵元组合下的阵列天线性能进行遍历计算,根据遍历计算结果进行归纳分析,获得阵元失效对阵列天线性能影响规律。

对于给定的阵列规模 N 、阵元间距 d 及性能要求如SLL等的阵列天线,其性能分析流程如下:

1) 根据 N, d 和SLL进行方向图综合,确定阵元激励 I_i ;

2) 确定最大失效阵元数目 $\max FN$;

3) 对于失效阵元数目 i ($1 \leq i < \max FN$),计算其失效阵列组合的集合 $FC = \{fc_j\}$,其中, $1 \leq j \leq C_N^i$, fc_j 为失效阵元数目 i 下的第 j 个失效阵元组合;

4) 对于每一个失效阵列组合 fc_j ,根据式(3)计算其方向图;

5) 根据1.2节各性能参数定义,由方向图计算各性能参数,并记录;

6) 分析不同失效阵元组合下阵列天线性能变化,获得阵元失效对阵列天线性能影响规律。

上述分析流程中,步骤1)中方向图综合采用Dolph-Chebyshev法和Taylor法;步骤4)的方向图计算中,为了提高计算速度,采用基于IFT的阵列天线方向图快速计算方法^[12-13]。

上述分析流程伪代码如下:

```
A = getCoefficient(N, d, SLL);
max FN = getMaxFN(N);
for i = 1 : max FN
    FC = getFC(N, i);
    for j = 1 : length(FC)
        [F, FdB] = getPattern(A, FC(j));
        pVal = getPatternPara(F, FdB);
    end for
```

```
end for
record()。
```

其中: $getCoefficient()$ 为获得阵元激励函数; $getFC()$ 为获得失效阵元组合函数; $getPattern()$ 为方向图计算函数; $getPatternPara()$ 为阵列天线性能参数计算函数; $record()$ 为计算结果记录函数。

3 分析结果

根据2.2节所示分析流程,以Dolph-Chebyshev直线阵和Taylor直线阵为例,对不同规模的直线阵进行了分析。直线阵规模 N 分别设置为16,32和64,阵元间距 $d = 0.5\lambda$, λ 为辐射电磁波波长,最大副瓣电平为 -35 dB 。采用Dolph-Chebyshev法和Taylor法综合后,计算不同失效阵元组合下阵列天线的最大副瓣电平(L_{\max})、平均副瓣电平(L_{av})、半功率波瓣宽度(W_{HPBW})、第一零点波瓣宽度(W_{FNBW})及方向系数 D 。

3.1 Dolph-Chebyshev 直线阵分析

对3种规模的Dolph-Chebyshev直线阵进行性能分析。根据失效阵元数目不同,按单阵元失效和双阵元失效分别进行分析。

3.1.1 单个阵元失效

依次设置阵列天线中不同位置阵元失效,分别计算不同失效阵元下阵列天线的性能参数,以 $N = 16$ 的阵列天线为例,其不同失效阵元下阵列天线性能结果如表2所示。表2中第一行为无失效阵元,即正常阵列天线的性能参数值。

表2 不同失效阵元下Chebyshev阵列性能参数($N = 16$)
Table 2 Chebyshev array's performance parameters ($N = 16$) with different failed elements

失效阵元 序号 n	$L_{\max}/$ dB	$L_{\text{av}}/$ dB	$W_{\text{HPBW}}/$ ($^{\circ}$)	$W_{\text{FNBW}}/$ ($^{\circ}$)	D
无	-35.00	-35.00	8.46	24.01	12.94
1	-29.12	-32.47	8.74	23.84	12.52
2	-27.05	-28.94	8.79	24.58	12.39
3	-24.44	-25.73	8.79	25.96	12.18
4	-22.12	-23.15	8.74	27.17	12.02
5	-20.39	-20.84	8.51	27.92	11.95
6	-19.02	-19.37	8.29	29.30	11.96
7	-18.02	-18.46	8.06	20.36	12.02
8	-17.48	-17.91	7.95	19.51	12.07
9	-17.48	-17.91	7.95	19.51	12.07
10	-18.02	-18.46	8.06	20.36	12.02
11	-19.02	-19.37	8.29	29.30	11.96
12	-20.39	-20.84	8.51	27.92	11.95
13	-22.12	-23.15	8.74	27.17	12.02
14	-24.44	-25.73	8.79	25.96	12.18
15	-27.05	-28.94	8.79	24.58	12.39
16	-29.12	-32.47	8.74	23.84	12.52

以正常阵列性能参数为标准,对失效阵元下阵列

天线的性能参数变化进行归一化处理

$$P_{\text{normalize}} = \frac{P_{\text{failure}} - P_{\text{normal}}}{|P_{\text{normal}}|} \quad (9)$$

式中： P_{failure} 为失效阵元下阵列天线性能参数值； P_{normal} 为正常阵列天线性能参数值； $P_{\text{normalize}}$ 为归一化的性能参数变化量值。

按照式(9)归一化后的阵列天线性能参数变化量值随失效阵元序号变化如图 2 所示。 I_n 为阵元 n 的激励， L_{max} ， L_{av} ， W_{HPBW} ， W_{FNBW} ， D 的值分别为归一化后的值。

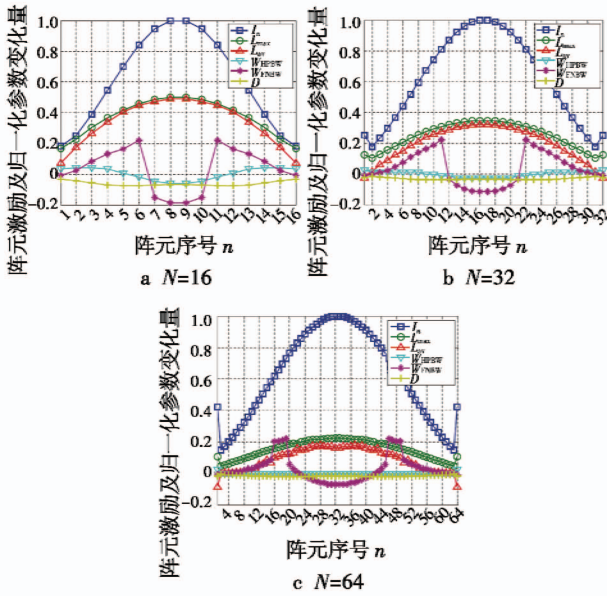


图 2 单失效阵元下 Chebyshev 阵列天线性能变化

Fig.2 Chebyshev array's performance changing under single failed element

对于归一化后的性能参数 L_{max} ， L_{av} ， W_{HPBW} ， W_{FNBW} 和 D ，当小于 0 时，失效阵元导致该性能参数值小于正常阵列天线值；当大于 0 时，失效阵元下该性能参数值大于正常值。

由图 2 可以看出，对于不同规模阵列天线，其性能参数随失效阵元不同有以下变化规律：

- 1) 最大副瓣电平 L_{max} 随着失效阵元激励的增加而提高，失效阵元激励越大，最大副瓣电平 L_{max} 与正常阵列相比增加越多；
- 2) 平均副瓣电平 L_{av} 随失效阵元激励的增加而上升，其上升幅度小于 L_{max} ；
- 3) 半功率波瓣宽度 W_{HPBW} 随着失效阵元位置不同而出现不同变化，随着失效阵元位置不断靠近阵列天线中心， W_{HPBW} 先增加超过正常阵列，而后降低小于正常阵列；
- 4) 第一零点波瓣宽度 W_{FNBW} 与 W_{HPBW} 的变化规律相同，但其变化幅度较大；
- 5) 方向系数 D 因为失效阵元而出现小幅下降，但

下降幅度较小。

由图 2 可以发现，随着阵列规模的增加，单个阵元失效对阵列性能参数的影响降低。

3.1.2 双阵元失效

设置阵列天线中两个阵元同时失效，计算阵列天线性能参数。规模分别为 16, 32, 64 的 Chebyshev 阵列天线性能变化如图 3 所示。图 3 中， x 轴、 y 轴分别为失效阵元序号 n ， (n_x, n_y) 对应点即为当阵列天线中 n_x, n_y 阵元同时失效时性能参数值，当 $n_x = n_y$ 时，即 $x = y$ 直线上为单阵元失效时阵列天线性能参数值。

对比图 3 中不同规模阵列天线的同一性能参数变化，可以发现性能参数变化的以下规律。

1) 最大副瓣电平 L_{max} ：图 3a 中不同规模阵列天线的 L_{max} 由于失效阵元的出现而大于正常阵列天线的 L_{max} ，其增加量在中心处最大，随着 (n_x, n_y) 远离中心 $(N/2, N/2)$ 而逐渐降低，且渐变边缘为直线，即 L_{max} 随着失效阵列激励之和的增加而提高。且 L_{max} 在 $x = y$ ， $x = -y$ 两个方向上的变化相同，即 L_{max} 与两失效阵元是否位于阵列中心同侧无关。

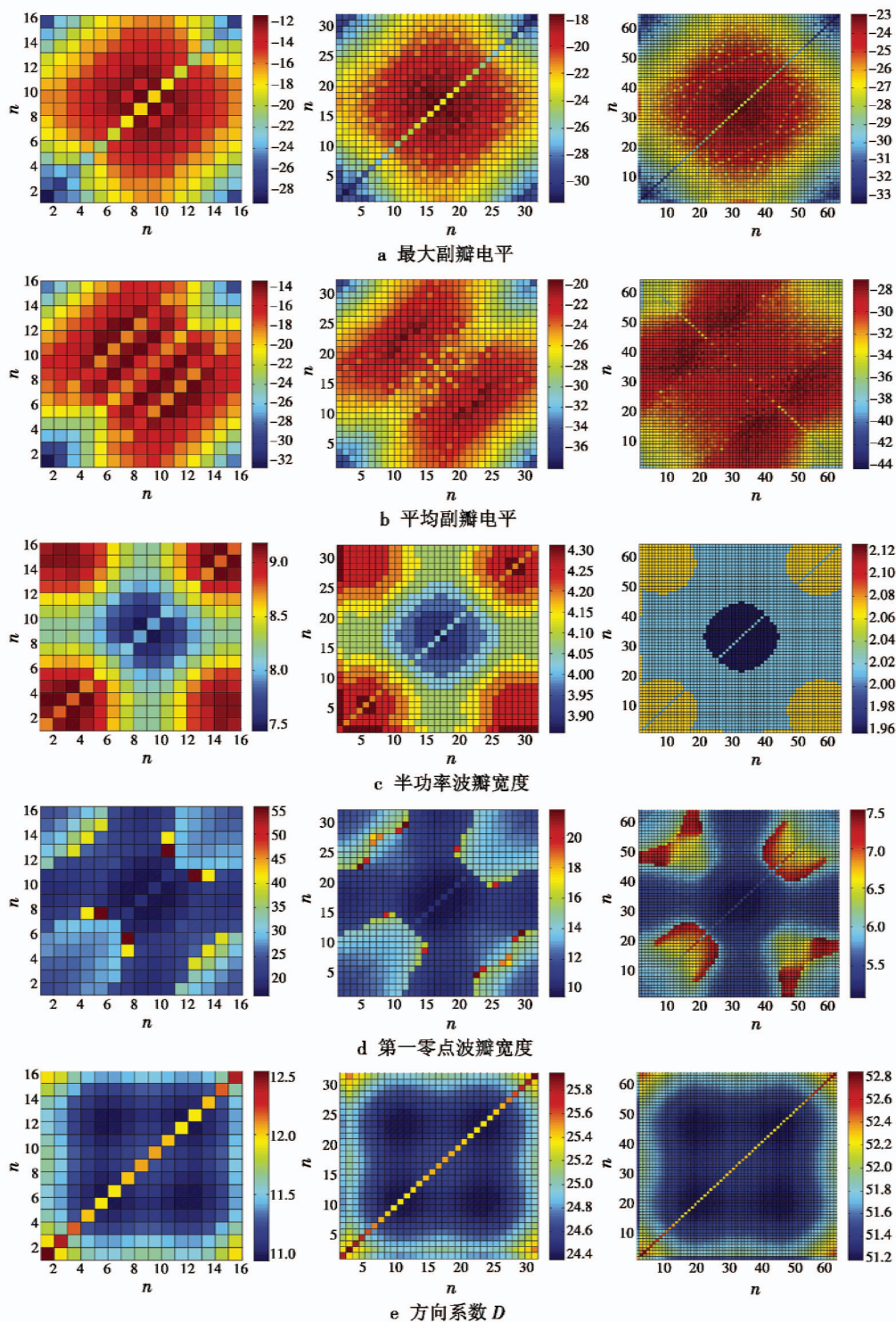
2) 平均副瓣电平 L_{av} ：图 3b 中不同规模阵列天线的 L_{av} 由于失效阵元的出现而大于正常阵列天线的 L_{av} ，其增加量在 $x = y$ 直线的上方、下方分别形成两个与 $x = y$ 直线平行的区域，该区域内 L_{av} 增加量较大，随着 (n_x, n_y) 远离该区域， L_{av} 的增加量逐渐降低。失效阵元激励之和较小时， L_{av} 的增加量较低。

3) 半功率波瓣宽度 W_{HPBW} ：图 3c 中不同规模阵列天线的 W_{HPBW} 随着 (n_x, n_y) 远离 $(N/2, N/2)$ 而逐渐增加，且渐变边缘为圆弧状，随着失效阵元激励能量之和的增加而降低，且 W_{HPBW} 在 $x = y$ ， $x = -y$ 两个方向上的变化相同，即 W_{HPBW} 与两个失效阵元相对于阵列中心位置无关，只与失效阵元激励能量有关。

4) 第一零点波瓣宽度 W_{FNBW} ：图 3d 中不同规模阵列天线的 W_{FNBW} 随着失效阵元变化较小，但在 $x = y$ ， $x = -y$ 两个方向上出现 4 个马蹄形区域，该区域内 W_{FNBW} 升高，且两个方向上马蹄形区域不完全相同，即 W_{FNBW} 不仅与失效阵元激励相关，还与失效阵元相对阵列中心位置有关， $x = y$ 上为两个失效阵元同侧， $x = -y$ 上为两失效阵元异侧。

5) 方向系数 D ：图 3e 中不同规模阵列天线的方向系数 D 随着失效阵元变化，在 $(N/3, N/3)$ ， $(N/3, 2N/3)$ ， $(2N/3, N/3)$ ， $(2N/3, 2N/3)$ 4 点附近出现 D 较低区域，随着失效阵元远离这 4 个区域， D 逐渐增加。

对比不同规模阵列的同一参数可以发现， L_{max} ， L_{av} ， W_{HPBW} ， W_{FNBW} 和 D 随着阵列规模的增加，其变化区间逐渐缩小。

图3 双失效阵元下 Chebyshev 阵列天线性能变化 ($N=16, 32, 64$)Fig. 3 Chebyshev array's performance changing under two failed elements ($N=16, 32, 64$)

3.2 Taylor 直线阵分析

采用 2.2 节所示分析流程,将 3 种规模的 Taylor 直线阵分为单阵元失效和双阵元失效分别进行性能分析。

1) 单个阵元失效。

依次设置阵列天线中不同位置阵元失效,分别计算不同失效阵元下阵列天线的性能参数,以正常阵列性能参数为标准,对失效阵元下阵列天线的性能参数进行归一化处理,归一化后的阵列天线性能参数随失效阵元序号变化如图 4 所示。

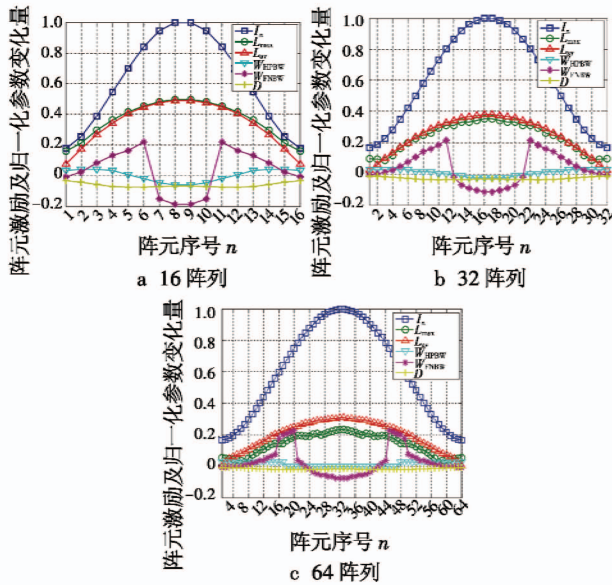


图4 不同失效阵元下 Taylor 阵列天线性能变化
Fig.4 Taylor array's performance changing under different failed elements

从图4中可以发现与图2相似的性能参数变化规律。

2) 双阵元失效。

在两个阵元同时失效情况下,分析了规模分别为16,32,64的 Taylor 阵列天线性能变化,其各参数随失效阵元位置(n_x, n_y)变化与图3保持一致,验证了3.1节中 $L_{max}, L_{av}, W_{HPBW}, W_{FNBW}, D$ 与失效阵元激励、位置之间的关系,不再赘述。

3.3 阵元失效对直线阵影响

综合3.1节和3.2节分析,可以得出阵元失效对直线阵列天线性能影响规律如下:

1) 最大副瓣电平随失效阵元激励之和而提高而增加,失效阵元激励之和越大,最大副瓣电平越高;

2) 平均副瓣电平受失效阵元位置影响,特定位置的阵元失效使得平均副瓣电平快速提高,同时失效阵元激励之和较小时,平均副瓣电平较低;

3) 半功率波瓣宽度随着失效阵元激励能量之和增加而降低;

4) 第一零点波瓣宽度随失效阵元变化幅度较小,但特定区域的阵元失效会增加第一零点波瓣宽度;

5) 方向系数受失效阵元位置影响,失效阵元位于阵列 $N/3, 2N/3$ 附近时,方向系数影响较小;

6) 阵列天线规模越大,失效阵元对阵列天线性能影响越小。

4 结束语

以 Chebyshev 直线阵和 Taylor 直线阵为例,分析了阵元失效对阵列天线性能参数的影响。分析结果指出

了最大副瓣电平、平均副瓣电平、半功率波瓣宽度、第一零点波瓣宽度和方向系数与失效阵元激励、位置之间的关系,为阵列天线的修复校正指明了方向。

本文分析了阵元失效对直线阵性能的影响,在实际应用过程中,平面阵应用较为广泛。下一步将在本文分析基础上,以平面阵为分析对象,研究阵元失效对平面阵列天线性能的影响。

参考文献

- [1] 吉阳,任宏滨,简金蕾,等.基于相控阵引信的自适应起爆控制算法[J].电光与控制,2017,24(5):65-67.
- [2] 高飞,陈辉,谢文冲,等.阵元失效情况下的 STAP 性能研究[J].电子学报,2009,37(9):2096-2101.
- [3] 周志增,刘洪亮,顾荣军,等.组件单元失效下的相控阵雷达暴露区研究[J].现代防御技术,2012,40(6):140-144,160.
- [4] 潘超,张任,李瑞.阵元失效对相控阵天线低副瓣的影响分析[J].舰船电子工程,2016,36(4):83-85,103.
- [5] 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):322-326,333.
- [6] KLHAN S U, QURESHI I M, SHOAI B. Recovery of failed element signal with a digitally beamforming using linear symmetrical array antenna[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2016, 32(3):611-624.
- [7] 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.
- [8] MIGLIORE M D, PINCHERA D, LUCIDO M, et al. A sparse recovery approach for pattern correction of active arrays in presence of element failures[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 14:1027-1030.
- [9] MURALIDHARAN R, VALLAVARAJ A, MAHANTI G K, et al. QPSO for failure correction of linear array of mutually coupled parallel dipole antennas with desired side lobe level and return loss[J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2017, 29(2):112-117.
- [10] ACHARYA O P, PATNAIK A. Antenna array failure correction[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2017, 59(6):106-115.
- [11] MAILLOUX R J. Phased array antenna handbook[M]. 2nd ed. Norwood:Artech House, 2005:109-128.
- [12] KEIZER W P M N. Low-sidelobe pattern synthesis using iterative Fourier techniques coded in Matlab[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009, 51(2):137-150.
- [13] YADAV K, RAJAK A K, SINGH H. Array failure correction with placement of wide nulls in the radiation pattern of a linear array antenna using iterative fast Fourier transform[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology, 2015:471-474.