

Analysis of Array Element Failure Simulation Based on MVDR Algorithm

Xiaoping Wang

Dalian Navy Academy, Dalian Liaoning
Email: 598202314@qq.com

Received: May 6th, 2018; accepted: May 22nd, 2018; published: May 29th, 2018

Abstract

The failure of the array element will destroy the amplitude and phase distribution of the uniform linear array, causing the beam sidelobe level to rise, the main lobe beam broadening and other issues, affecting the validity and reliability of the MVDR algorithm's position estimation [1]. In order to solve this problem, this paper starts from the perspective of continuous failure of multiple array elements, simulates and analyzes the effects of array element failure on the typical MVDR algorithm, and uses the two main indicators: the width of the main lobe and the height of the side lobe to obtain different failure modes. Based on the influence of the arity and the position of different failure elements on the MVDR algorithm, based on this, the law of the failure of the array element to the algorithm is explored to provide reference for the failure of the array element.

Keywords

Array Element Failure, MVDR Algorithm, Sidelobe Level

基于MVDR算法的阵元失效仿真分析研究

王小平

大连舰艇学院, 辽宁 大连
Email: 598202314@qq.com

收稿日期: 2018年5月6日; 录用日期: 2018年5月22日; 发布日期: 2018年5月29日

摘要

阵元失效会破坏均匀直线阵的幅相分布, 导致波束旁瓣级升高, 主瓣波束展宽等问题, 影响MVDR算法方位估计的有效性和可靠性[1]。针对这一问题, 本文从阵列连续多个阵元失效的角度出发, 就阵元失效

对典型的MVDR算法的影响进行仿真分析, 利用主瓣宽度以及旁瓣高度两个指标, 得出不同失效阵元数及不同失效阵元位置对MVDR算法的影响, 在此基础上, 探索阵元失效对算法影响的规律, 为阵元失效问题提供参考。

关键词

阵元失效, MVDR算法, 旁瓣级

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

MVDR 算法进行准确的目标方位估计建立在阵列阵元能正常工作的基础上, 而实际应用中, 器件老化、受外界物理损坏等因素都可能导致阵元失效, 若某阵元失效, 将会破坏均匀直线阵的幅相分布, 导致波束旁瓣级升高, 主瓣波束展宽等问题, 势必对估计算法准确测向造成影响[2]。因此, 掌握失效阵元数目及失效阵元位置对估计算法的影响规律, 对于实际中指导应对阵元失效的情况具有重要意义。本文围绕连续多个阵元失效, 探索失效阵元数目及不同位置分布对典型算法 MVDR 的影响规律, 为现实根据实际情况需要, 优化固定阵元数失效情况下阵列阵元配置提供指导。

2. MVDR 算法基本原理

MVDR (最小方差无畸变响应)算法是常规波束形成法(CBF) (又称为延迟相加法)的改进[3]。MVDR (最小方差无畸变响应)算法试图克服延迟相加法分辨率低的缺点, 使用部分(不是全部)自由度在期望观测方向形成一个波束, 同时利用剩余的自由度在干扰信号方向形成零陷, 从而使输出功率最小, 达到使非期望干扰的贡献最小的目的, 同时增益在观测方向保持为常数, 通常为 1, 从而使目标信号输出最大[4]。

为保证来自 θ_d 期望信号的正确接收, 并完全抑制其它 J 个干扰, 即使信号最大, 干扰最小, 得到关于权向量的约束条件:

$$\mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta_d) = 1 \quad (1)$$

$$\mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta_j) = 0 \quad (2)$$

推导得到最佳权向量:

$$\mathbf{W}_{opt} = \frac{\mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{a}(f_0, \theta_d)}{\mathbf{a}(f_0, \theta_d)^H \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{a}(f_0, \theta_d)} \quad (3)$$

$\mathbf{a}(f_0, \theta_d)$ 为在波束指向方向入射频率为 f_0 的信号为的信号的响应向量(或导向矢量); 为基阵输出的协方差矩阵。波束形成器的输出(θ_d 方向)为 $y(t) = \mathbf{W}_{opt}^H X(t)$, 相应的输出功率为:

$$P(f_0, \theta_d) = \mathbf{W}_{opt}^H \mathbf{R}_{XX} \mathbf{W}_{opt} = \frac{1}{\mathbf{a}(f_0, \theta_d)^H \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{a}(f_0, \theta_d)} \quad (4)$$

由式(4)得, MVDR 算法输出仅与导向矢量 $\mathbf{a}(f_0, \theta_d)$ 以及协方差矩阵

R_{xx} 有关。失效阵元对应快拍的导向矢量为零[5]。

3. 基于连续多个阵元失效的 MVDR 算法仿真分析

3.1. 阵列中单个阵元失效

考虑一阵元总数为 12 的均匀直线阵，阵元间隔为 0.5 倍波长，信噪比均为 10 dB，采样数为 2048，目标信号以角度 30° 入射。考虑到均匀直线阵的对称性，1 个阵元失效可得到六种情况，仿真结果如下图所示。

由图 1 可得单个阵元失效使旁瓣抬升，旁瓣级升高，影响了 MVDR 算法的性能。经多次仿真，均呈现上图结果。

将图 1 放大得到细节图 2。

由图 2 可得，第一个阵元失效使主瓣宽度变宽程度最大，第二至第六个阵元失效主瓣宽度变宽程度逐渐递减；由于旁瓣能量分布较均匀，旁瓣最大值分布在距主瓣不同距离的波峰处，通过取出各种阵元失效情况下谱图中旁瓣高度的最大值，定量地比对单个阵元失效的位置对旁瓣高度的影响。由于程序通过 randn 函数加入随机噪声，导致每次仿真结果具有随机性，经反复实验，无阵元失效情况下的旁瓣最大高度趋向一个常数(下文有关旁瓣最大高度的取值均是反复实验后得到的平均结果，下文不再赘述)。下表 1 为半波长条件下，多次仿真得到的平均结果。

在反复实验的每一次实验中，第一至第六个阵元失效，旁瓣最大高度均呈现不断增大的规律，上表的平均结果也反映了此规律。

同理，将阵元数拓展到其他阵元数目的等间隔线列阵，进行大量反复仿真，也得到了上述规律。

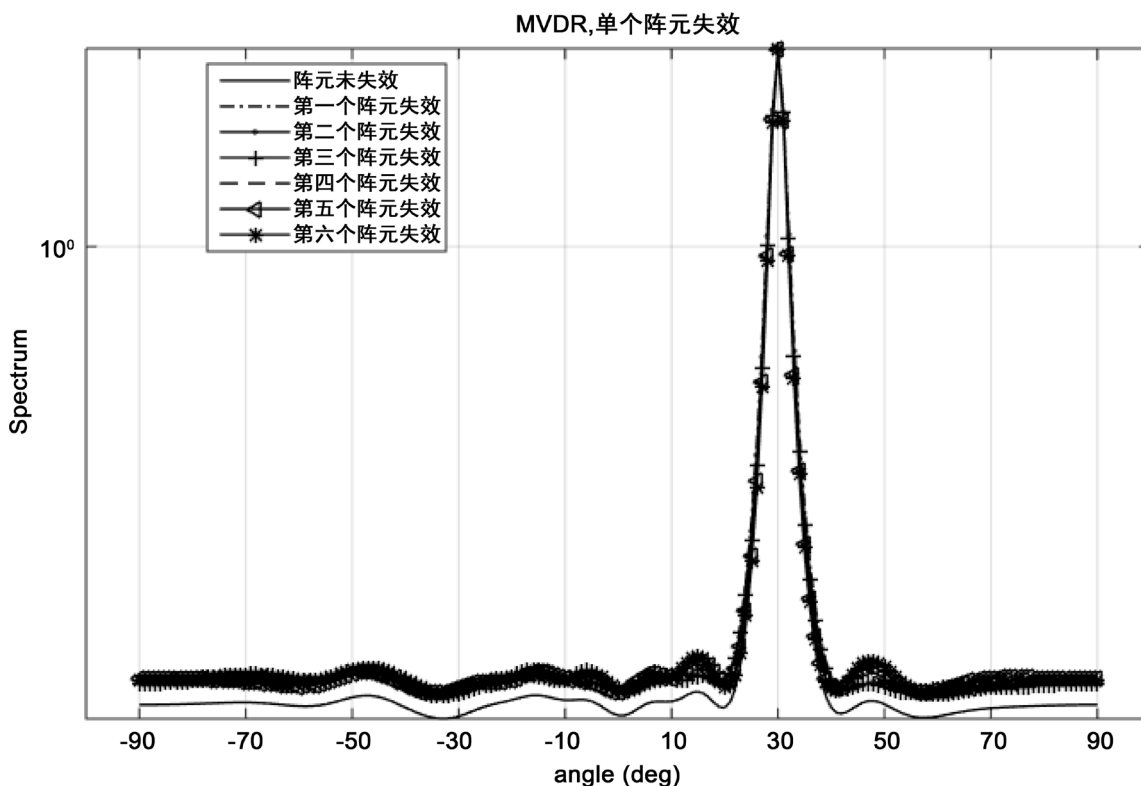


Figure 1. A space power spectrum contrast diagram of a single element failure

图 1. 单个阵元失效的空间功率谱对比图

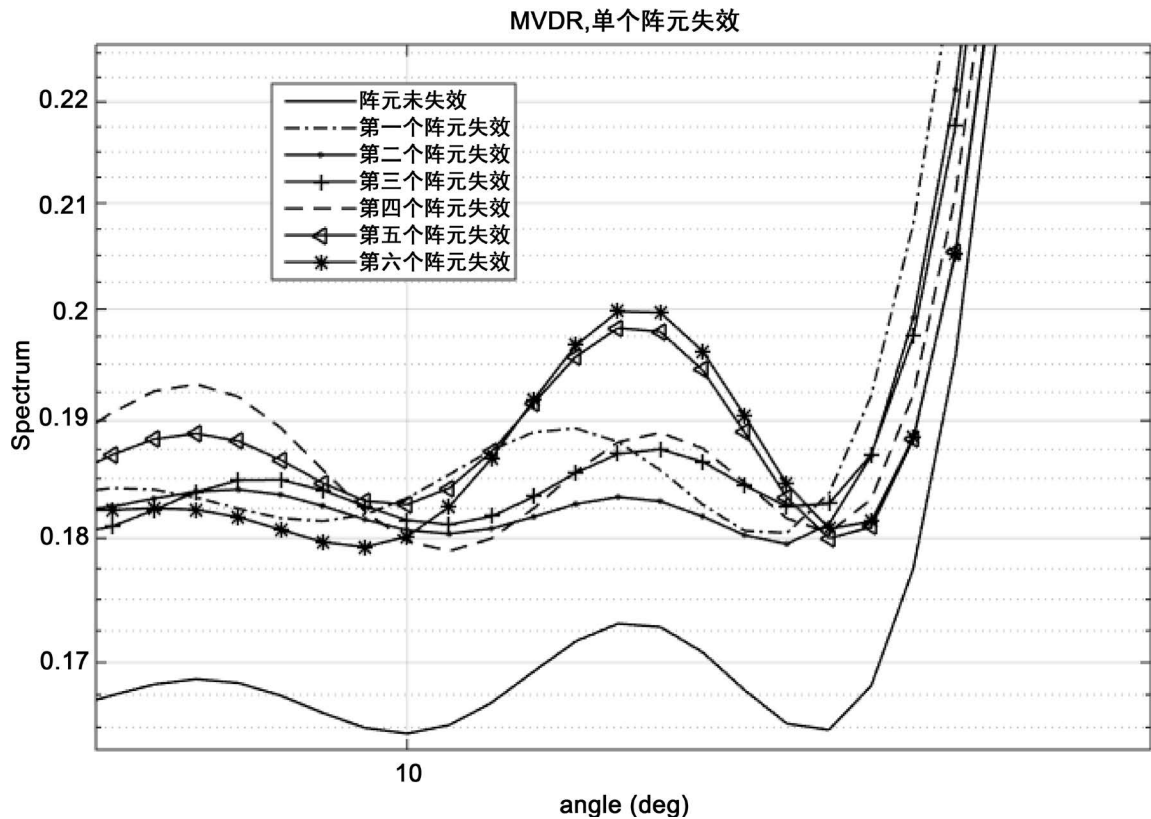


Figure 2. Detail drawing of space power spectrum of single array element failure (bottom)
图 2. 单个阵元失效的空间功率谱细节放大图(底端)

Table 1. Single element failure sidelobe maximum altimeter (average)

表 1. 单个阵元失效旁瓣最大高度表(平均)

第 n 个阵元失效	1	2	3	4	5	6	无阵元失效
旁瓣最大高度	0.1919	0.1923	0.1928	0.194	0.1983	0.2024	0.1624

3.2. 阵列中连续两个阵元失效

考虑一阵元总数为 12 的均匀直线阵，阵元间隔为 0.5 倍波长，信噪比均为 10 dB，采样数为 2048，目标信号以角度 30° 入射。考虑到均匀直线阵的对称性，两个连续阵元失效可得到六种情况，分别是第 1、2，2、3，3、4，4、5，5、6，6、7 个阵元失效，仿真结果如下图所示。

由图 3 可得，连续两个阵元失效使旁瓣升高，旁瓣级增大。由于图 3 仿真参数设置除失效数目与图 1 不同，其余参数设置均相同，因此，图 1 和图 3 的仿真结果中无阵元失效时旁瓣级相同，由图 1 和图 3 比对可得，连续两个阵元失效较单个阵元失效旁瓣级更高，对算法的负面影响更显著。

将图 3 进行局部放大，得到图 4。

由图 4 可得，主瓣宽度变宽程度按第 1、2，2、3，3、4，4、5，5、6，6、7 的顺序逐步减轻；旁瓣高度最大值主要分布在主瓣最近的波峰，第 2、3，3、4，分布在主瓣附近第二个波峰，第 1、2 失效时，旁瓣最大值分布在第三个波峰处。经反复仿真，均呈现上述效果。下表 2 为半波长条件下，多次仿真得到的平均结果。

由上表可得，旁瓣最大高度按第 1、2，2、3，3、4，4、5，5、6，6、7 的顺序逐步升高的规律，同

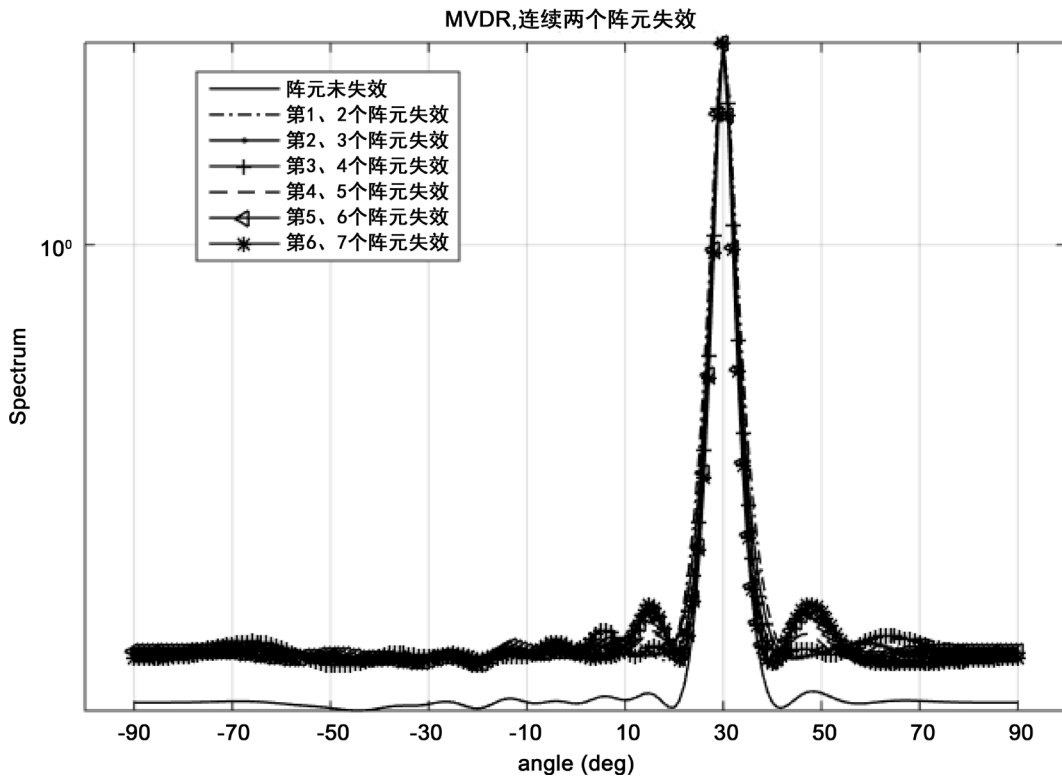


Figure 3. A space power spectrum contrast diagram of two continuous array elements failure
图3. 两个连续阵元失效的空间功率谱对比图

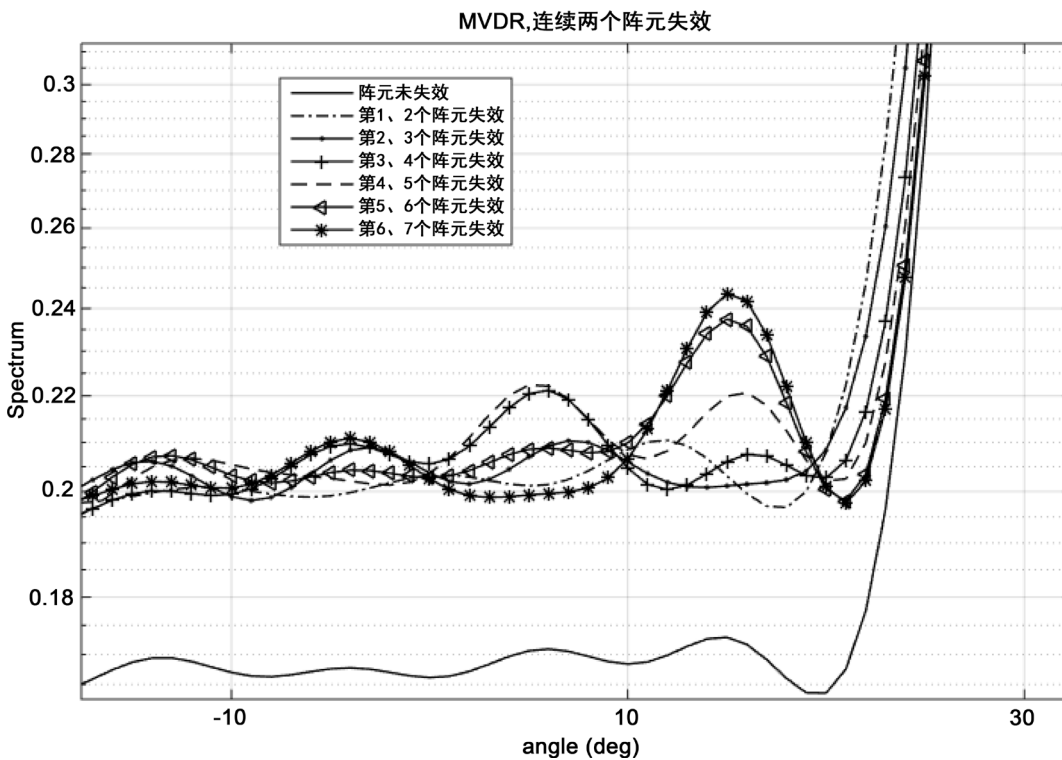


Figure 4. Detail drawing of space power spectrum of two continuous array elements failure (bottom)
图4. 两个连续阵元失效的空间功率谱细节放大图(底端)

时对比表 1 和表 2 的数据, 可以很直观地看出连续两个阵元失效较单个阵元失效的情况旁瓣最大高度更高, 对算法的负面影响更大。

同理, 将阵元数拓展到其他阵元数目的等间隔线列阵, 经大量反复仿真, 均可得到上述规律。

3.3. 阵列中连续三个阵元失效

考虑一阵元总数为 12 的均匀直线阵, 阵元间隔为 0.5 倍波长, 信噪比均为 10 dB, 采样数为 2048, 目标信号以角度 30° 入射。考虑到均匀直线阵的对称性, 三个连续阵元失效可得到五种情况, 分别是第 1、2、3, 2、3、4, 3、4、5, 4、5、6, 5、6、7 个阵元失效, 仿真结果如下图所示。

由图 5 可得, 连续三个阵元失效使波束旁瓣级显著增大, 比对图 1 和图 3, 旁瓣级升高现象更为明显, 程度递进式变化。以上结果经反复仿真, 效果相同。

将图 5 进行局部放大, 得到图 6。

由图 6 可得, 主瓣宽度变宽程度按第 1、2、3, 2、3、4, 3、4、5, 4、5、6, 5、6、7 的顺序逐步减轻; 旁瓣高度最大值主要分布在距离主瓣最近的第一个或第二个波峰, 第 3、4、5 个阵元失效分布在

Table 2. Two continuous array element failure sidelobe altimeter (average)

表 2. 两个连续阵元失效旁瓣最大高度表(平均)

第 n、n+1 个阵元失效	1、2	2、3	3、4	4、5	5、6	6、7	无阵元失效
旁瓣最大高度	0.2061	0.2087	0.2172	0.2228	0.2304	0.2381	0.1624

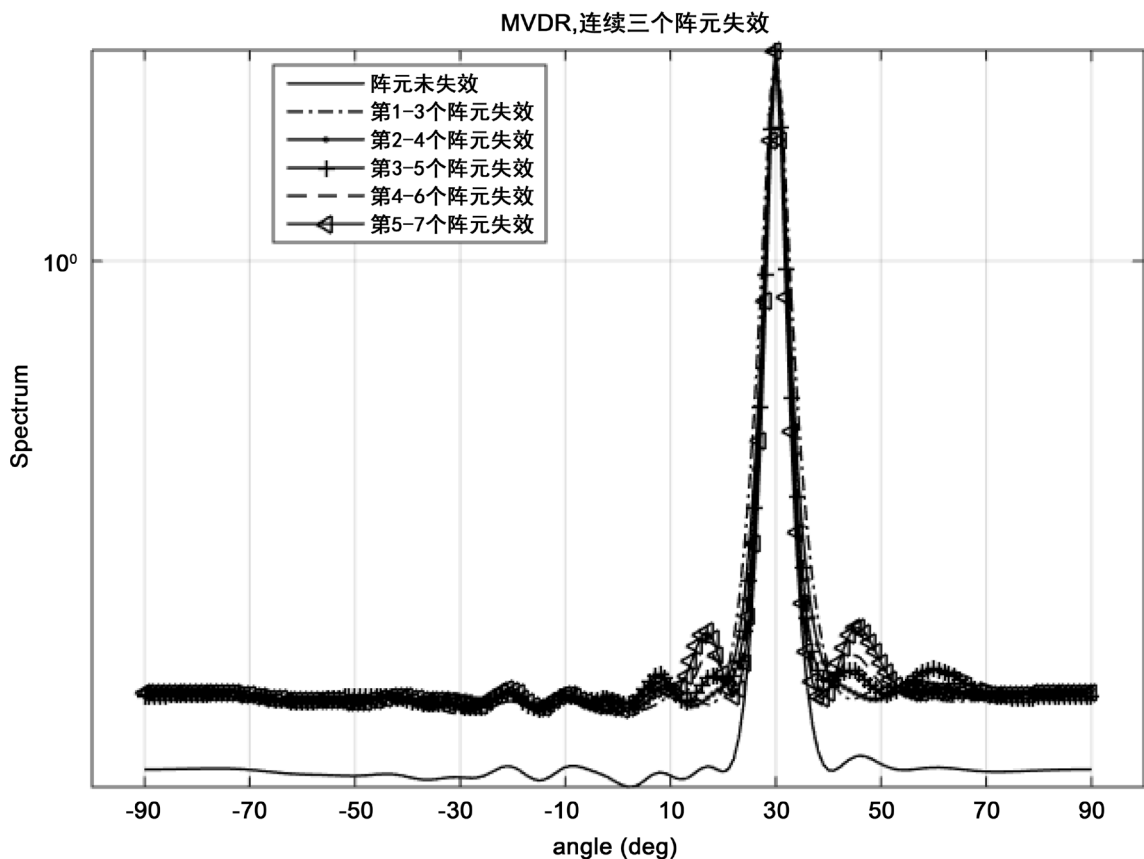


Figure 5. A space power spectrum contrast diagram of three continuous array elements failure

图 5. 三个连续阵元失效的空间功率谱对比图

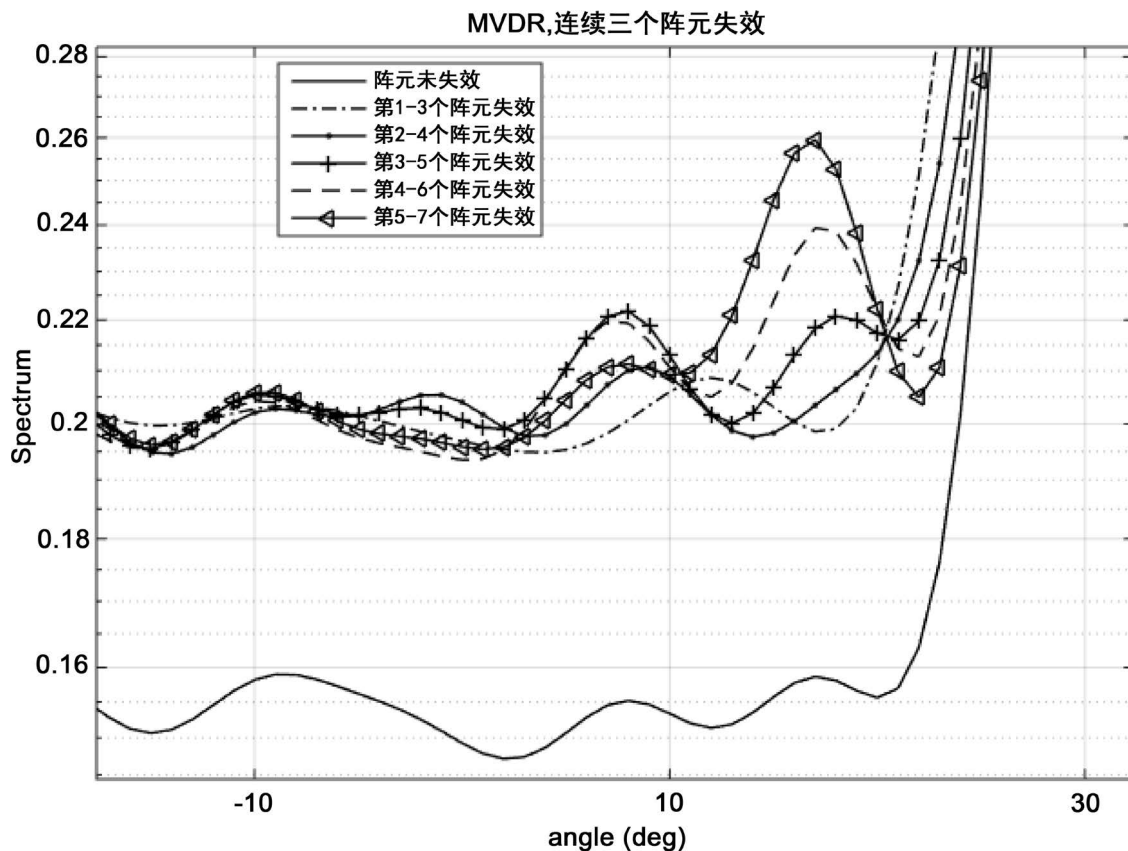


Figure 6. Detail drawing of space power spectrum of three continuous array elements failure (bottom)
图 6. 三个连续阵元失效的空间功率谱细节放大图(底端)

Table 3. Three continuous array element failure sidelobe altimeter (average)
表 3. 三个连续阵元失效旁瓣最大高度表(平均)

第 n、n+1 个阵元失效	1~3	2~4	3~5	4~6	5~7	无阵元失效
旁瓣最大高度	0.2108	0.2159	0.2255	0.2391	0.2619	0.1624

主瓣附近第二个波峰，其余情况旁瓣最大值均分布在距主瓣最近的波峰处。上述结果为反复仿真得到的一致现象。表 3 为半波长条件下，多次仿真得到的平均结果。

由上表可得，旁瓣最大高度按第 1、2、3，2、3、4，3、4、5，4、5、6，5、6、7 的顺序呈逐步升高的规律。同时将表 3 的数据与表 1 和表 2 进行对比，可看出单个阵元失效，连续两个阵元失效，连续三个阵元失效旁瓣最大高度呈递进式规律升高，对算法的负面影响越来越大。

同理，将阵元数拓展到其他阵元数目的等间隔线列阵，经大量反复仿真，均可得到上述规律。

同以上分析步骤，研究连续四个阵元失效及五个阵元失效情况，经反复大量仿真，得到与上文讨论情况相似的结论：

- 1) 失效阵元数越多，旁瓣级越高，对算法影响越大。
- 2) 失效阵元越靠近边缘，主瓣宽度越宽，失效阵元越靠近中心，主瓣宽度越窄，靠近边缘阵元失效对主瓣宽度影响大。
- 3) 失效阵元越靠近中心，旁瓣最大高度越高，失效阵元越靠近边缘，旁瓣最大高度越低，靠近中心阵元失效对旁瓣高度影响大。

4. 总结

通过对连续数个阵元失效的情况进行大量的仿真,从主瓣宽度,旁瓣高度(最大)两个角度对仿真结果进行分析归纳,得出以下几个结论:

1) 失效阵元数越多,旁瓣级越高,旁瓣能量过高将严重影响目标信号方位的准确识别。对于阵元数较多的阵列,少量阵元失效对 MVDR 算法的影响小,应及时发现并替换失效阵元,避免更多阵元失效,影响算法的作用。

2) 失效阵元越靠近中心,旁瓣最大高度越高,主瓣宽度越窄;失效阵元越靠近边缘,主瓣宽度越大,旁瓣最大高度越低。在实际应用中当无备用阵元时,可根据实际情况需要,调整失效阵元位置,以优化 MVDR 算法的性能。

参考文献

- [1] 张志涌, 杨祖樱. MATLAB 教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [2] (美)钱德兰, 编著. 波达方向估计进展[M]. 周亚建, 董春曦, 闫书芳, 译. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [3] 赵谦. 通信系统中 MATLAB 基础与仿真应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
- [4] 毛远. 智能天线中的 DOA 算法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [5] 王静. 智能天线中窄带相干信号二维 DOA 估计算法研究[D]: [硕士学位论文]. 山西: 山西师范大学, 2015.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8801, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: csa@hanspub.org