

相控阵天线阵元失效的影响度分析及补偿措施

牛传峰¹

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)¹

摘要: 本文首先建立了 6×6 矩形平面相控阵天线 4 个阵元失效的 4 种不同类型的失效模型, 使用 HFSS 软件仿真了各个失效模型引起的天线增益、指向、副瓣等性能的恶化, 并给出了实际的测试结果, 结果证明当 10% 左右或超过 10% 的组件失效时, 系统虽然能照常或降级工作, 对系统的使用具有指导作用, 最后论述了失效单元的补偿措施。

关键词: 相控阵天线, 阵元失效, 补偿措施

Influence of Failed Elements on Phased Array Antenna and Its Compensation

Niu Chuan-Feng¹

(China Electronics Technology Group Corporation No. 54th Research Institute, Shijiazhuang 050081)¹

Abstract: The 4 different failed models are present for a 6×6 phased array planar antenna. The models are emulated with HFSS software, and the testing result is given for the influence of the failure elements on the phased array performances such as gain, pointing accuracy, sidelobes, together with giving compensation means. The conclusion is very useful for the phased array antenna system, and it's usable when the failed number of the elements is about 10 percent.

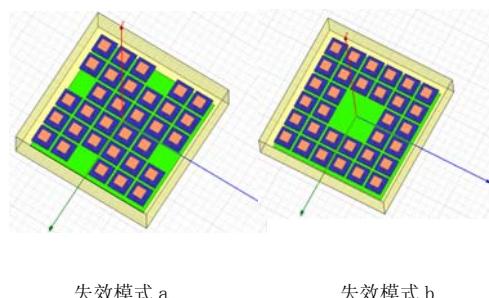
Keywords: Phased Array Antenna, element failure, compensation,

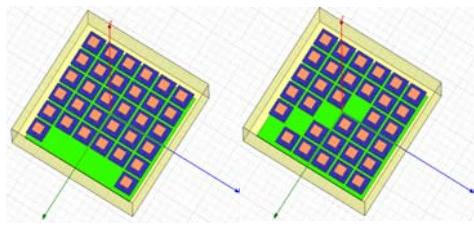
1 引言

相控阵天线一般都需要长时间无故障工作, 天线采用每个辐射单元与一个 T/R 组件相联接, 当阵面系统中的少量单元组件失效时, 并不会带来致命的后果^[1]。多个失效单元尤其当这些失效单元具有某种相关性, 如列相关时, 其影响更加严重^[2]。本文基于微带天线阵列模型, 作了大量阵元失效仿真研究, 仿真结果证明当阵元损坏数量 10% 时, 对天线整体指标没有较大影响, 略微超过 10% 的组件损坏系统仍然可以照常或降级运行。对于损坏单元或组件, 最直接的补偿办法是更换, 当数量较少或不方便更换时, 采用各种补偿算法进行补偿是非常简单实用的方法。

2 相控阵天线阵元失效模型

为了验证在所采用的阵列形式中阵元失效对天线性能的影响, 采用电磁场仿真工具 HFSS, 以 6×6 矩形平面阵的模型为基础, 分别仿真了 1 个、 2 个、 3 个和 4 个阵元失效情况下对波束性能的影响, 并与完好阵列的波束性能进行比较。对于最恶劣的 4 阵元失效情况, 4 种典型失效模式如图 1 所示。





失效模式 c 失效模式 d

图 1 阵元失效模式示意图 (续)

3 相控阵天线阵元失效仿真测试结果

通过对上述 4 种失效模型进行仿真，比较失效前后的方向图增益、波束主幅比、前后比（后瓣）等电性能参数如表 1 所示。阵元失效后的方向图如图 2 所示。

表 1 各失效模式电性能统计

失效模式	增益 (dB)	副瓣电平 (dB)	前后比 (dB)
0 失效	20.50	-13.8	29.33
模式 a	19.99	-12.57	29.83
模式 b	19.99	-9.70	28.68
模式 c	20.00	-11.87	29.58
模式 d	20.02	-12.28	28.89

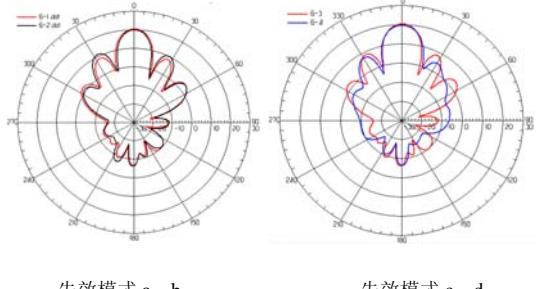


图 2 阵元失效后的方向图

从仿真结果可以得出以下结论：即使在 4 个阵元失效后（失效数>10%），在波束法线方向时，阵列的增益下降幅度不大（最大下降 0.51dB），波束的主副比和前后比略有变化（副瓣增高最大约 4.1dB；后瓣增大最多约 0.65dB，降低最多约 0.5dB）；当波束扫描 30 度、60 度时（与法线方向夹角），阵列的增益下降幅度最大为 0.84dB，主副比变化最大为 1.2dB，前后比变化最大为 2.2dB，这些变化并不影响阵列的使用。

为进一步验证阵元失效对波束合成方向图的影响，在专用天线测试场进行的基于 4×4 阵元线阵中 2 阵元的阵元失效专题试验。试验结果表明，阵元失效后增益略有下降，副瓣电平略有升高，波束指向基本没有影响，没有影响到系统的正常使用。

4 失效单元的补偿措施

当 10% 左右或超过 10% 的组件失效时，系统虽然能照常或降级工作，仍然需要对失效单元采取一些补偿措施。对失效单元的补偿首先要确定失效单元的位置，邵江达在“平面近场测量的‘诊断’技术”^[3]一文中详细介绍了确定阵列天线失效单元位置的理论依据和实现方法。平面近场测量不但可以获得被测天线的远场波瓣图，而且还可以采用反演技术重构被测天线的口径分布(辐射场部分)，实现对被测天线的“诊断”，找出阵列天线失效单元和组件的位置。

失效单元补偿措施主要有以下两点：

1. 直接更换单元

在天线单元更换方便且条件允许的情况下，可利用直接更换天线单元来进行失效单元补偿，这种方法从根本上解决了失效单元引起的误差问题，补偿的效果最佳。

2. 利用各种补偿算法进行补偿

失效单元并不是在各种条件下都适合利用更换单元进行校准，在一些维修不便、耗资巨大或非常费时的特殊环境和应用中，一般采用补偿算法对失效单元进行校准和补偿。王玲玲在“运用遗传算法结合 FFT 进行多单元失效阵列校准”^[4]一文中提出了利用遗传算法(GA)结合快速傅立叶变换(FFT)方法来进行阵列失效校准的方法。通过引入傅立叶变换的变换域和角域的映射，在变换域中利用 FFT 计算个体阵列的阵因子，减少了 GA 评估个体的时间，从而大大提高了失效校准的速度；高铁在“二维固态有源相控阵失效单元补偿新方法”^[5]一文中提出二维固态有源相控阵失效单元补偿的新方法，该方法基于失效单元的矩形切割和线性规划方法，可适用于有源阵列多单元任意失效分布的实时补偿。在保证失效补偿后两主平面副瓣性能完全恢复的情况下，用线性规划方法对空间平均副瓣进行了

优化。由于采用实数算法，仅需对非失效单元的幅度进行调整；汪一心在“阵列有源天线单元失效的影响与补偿”^[6]一文中首先分析了阵列天线因单元（或单元群）失效引起的副瓣恶化和增益损失情况，然后利用BFGS最优化算法对失效单元（或单元群）附近部分正常单元的幅相进行适当调整。结果表明，这种调整对于单元失效引起的副瓣电平恶化有一定的补偿效果。

5 结论

国内外相控阵设备研制和使用经验也表明，即使损坏10%的组件（通道），也不影响系统正常工作。本文实测结果也证明了这一点。这对相控阵天线的实际工程应用具有非常重要指导价值。更换单元补偿和利用算法补偿是两种实用有效的补偿措施，本文介绍了几种不同的算法补偿方法。

参 考 文 献

- [1] 高铁,王金元,金林.二维固态有源相控阵失效单元补偿新方法[J]现代雷达,2002,24(2):71-82.
- [2] 汪一心,李世智.阵列有源天线失效的影响与补偿[J]现代雷达,1998,20(4):58-62.
- [3] 邵江达.平面近场测量的“诊断”技术[J]现代雷达,1997,19(4):56-61
- [4] 王玲玲,方大纲.运用遗传算法结合FFT进行多单元失效阵列校准[J]电波科学学报,2005,20(5):561~565
- [5] 高铁,王金元,金林.二维固态有源相控阵失效单元补偿新方法[J]现代雷达,2002,24(2):71~82
- [6] 汪一心,朱桓,徐晓文等.阵列有源天线单元失效的影响与补偿[J]现代雷达,1998,20(4):58~62

作者简介：

牛传峰，男，硕士、工程师主要研究领域为天线理论研究，阵列天线、特种天线设计等。

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)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)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)，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>