

# 基于相位差的平面相控阵天线阵元精度分析方法

王从思<sup>1,2</sup> 平丽浩<sup>1</sup> 宋东升<sup>2</sup> 王 猛<sup>2</sup>

(南京电子技术研究所, 南京 210039)<sup>1</sup> (西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071)<sup>2</sup>

**摘 要:** 分析阵元位置精度对电性能的影响, 对研制高性能相控阵天线具有重要意义。基于阵面辐射单元的相位误差分析, 建立了平面矩形相控阵天线阵元位置误差对电性能影响的结构与电磁耦合模型, 并分析了阵面平面度与安装精度对天线电性能的影响。工程设计人员可在电性能变化允许范围内, 依据该方法对天线的加工公差提出合理的要求。

**关键词:** 相控阵天线; 结构变形; 电性能; 耦合分析

## On Analysis Method of Element Precision of Planar Phased Array Antennas based Phase Error

Wang Cong-Si<sup>1,2</sup> Ping Li-Hao<sup>1</sup> Song Dong-Sheng<sup>2</sup> Wang Meng<sup>2</sup>

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039)<sup>1</sup>

(School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)<sup>2</sup>

**Abstract:** The analysis of electromagnetic performances of rectangle active phased array antennas with distorted plane errors is important to the engineering development of high-performance antennas. A coupled structural-electromagnetic model of active phased array antenna is developed based on the errors in the plane element positions caused by antenna structural distortion. The application of the model to a plane array antenna demonstrates the degradation of the sidelobe level and gain of antenna with the different distortion grade. The good analysis results can provide a theoretical guidance for the engineer to determine the structural tolerance.

**Keywords:** phased array antenna; structural distortion; electromagnetic performance; coupled analysis

## 1 引言

相控阵天线(Phased Array Antenna, PAA)技术能同时满足高性能、高生存能力要求, 亦是降低雷达研制成本的重要途径<sup>[1-3]</sup>。PAA 的电性能指标影响着雷达整机的性能指标, 其加工周期直接制约雷达的制造周期<sup>[4-5]</sup>。PAA 结构误差与环境载荷导致的阵面变形将会导致天线阵列单元之间的距离和每

一个单元的位置发生相对变化, 从而引起单元上的电流和口径场的相位分布等发生变化, 以致引起天线增益下降、副瓣电平升高和波束指向不准确等, 即降低相控阵天线的电性能。实际上, 结构误差也会引起馈电方面的误差(馈电阻抗的变化、极化方向的不一致等)。在分析误差影响方面, 文献[6]对阵列天线随机误差对相控阵天线性能的影响进行了研究, 但是基于概率方法的统计分析; 文献[7]研究了相控阵天线阵面变形误差对天线电性能的影响, 但仅把阵面不平度(RMS)作为衡量标准; 文献[8-9]研究了阵列单元失效、幅相误差和横向与纵向馈源位移等对远区辐射电场的影响, 但未考虑结构误差的影响。因此, 为准确掌握天线阵面变形与电指标的关系, 基于阵面辐射单元的相位误差分析,

---

基金项目: 国家自然科学基金项目(50805111, 50775170);  
陕西省自然科学基金项目(SJ08E203); 973 项目; 武器装备预研项目

建立了矩形平面 PAA 阵面辐射单元位置误差对电性能影响的结构与电磁耦合模型, 进而分析了阵面平面度与安装精度对天线电性能的影响, 给出了在电性能变化的工程允许范围内对天线结构变形公差的要求。

## 2 结构与电磁耦合模型

假设相控阵天线的阵元按等间距矩形栅格阵排列, 具体如图 1 所示。此天线共有  $M \times N$  个阵元, 位于  $O-xy$  平面上, 阵元方位向和距离向的间距分别为  $d_x$  与  $d_y$ 。设定目标相对于坐标系  $O-xyz$  所在的方向  $(\theta, \phi)$  以方向余弦表示为  $(\cos \alpha_x, \cos \alpha_y, \cos \alpha_z)$ 。第  $(i, j)$  个单元的设计坐标为  $(i \cdot d_x, j \cdot d_y, 0)$ , 当 PAA 存在结构变形时, 令该单元的偏移量为  $(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, \Delta z_{ij})$ 。

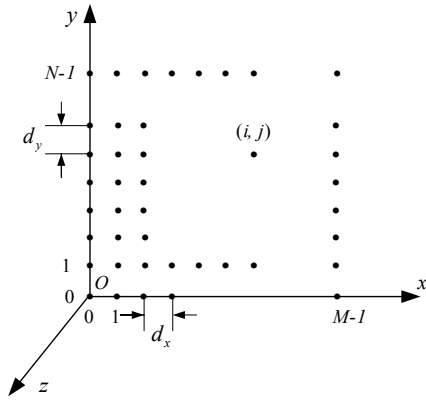


图 1 平面矩形 PAA 的单元排列示意图

由电磁理论可知, 天线阵面结构变形误差只影响阵元的电场相位, 不改变幅度大小, 所以可把阵元的位置偏移作为附加的相位因子引入到天线方向图函数中。则阵列天线相邻两单元间在目标处沿  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的空间相位差分别为:

$$\begin{cases} \Delta \varphi_x = k(dx + \Delta x_{ij}) \cos \alpha_x \\ \Delta \varphi_y = k(dy + \Delta y_{ij}) \cos \alpha_y \\ \Delta \varphi_z = k\Delta z_{ij} \cos \alpha_z \end{cases} \quad (1)$$

因此, 第  $(m, n)$  单元  $(0 \leq m \leq M-1, 0 \leq n \leq N-1)$  相对第  $(0, 0)$  单元的相位差为

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_{mn} &= \sum_{i=1}^m \Delta \varphi_x + \sum_{j=1}^n \Delta \varphi_y + \Delta \varphi_z + mn\beta \\ &= km dx \cdot \cos \alpha_x + k \sum_{i=0}^m \Delta x_{ij} \cdot \cos \alpha_x + \\ &\quad kndy \cdot \cos \alpha_y + k \sum_{j=0}^n \Delta y_{ij} \cdot \cos \alpha_y + \\ &\quad k\Delta z_{ij} \cos \alpha_z + mn\beta \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\beta$  是相邻单元间的固有相位差。

这里暂只考虑阵因子方向图, 则 PAA 结构与电磁间的机电耦合模型, 即天线方向图函数为

$$\begin{aligned} E(\theta, \varphi) &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} E_e I_{mn} \\ &\exp \left\{ jk \left[ \left( m dx + \sum_{i=0}^m \Delta x_{ij} \right) \sin \theta \cos \varphi + \right. \right. \\ &\quad \left. \left( ndy + \sum_{j=0}^n \Delta y_{ij} \right) \sin \theta \sin \varphi + \Delta z_{ij} \cos \theta \right] + jmn\beta \left. \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $E_e$  为天线阵单元的方向函数,  $I_{mn}$  是单元激励电流。

## 3 仿真结果与分析

利用 PAA 结构——电磁耦合模型, 下面分析某天线阵列的平面度与安装精度对其电性能的影响。天线工作频率为 X 波段 ( $f = 9.375\text{GHz}$ ),  $x$  轴、 $y$  轴阵列单元为 32,  $x$  轴、 $y$  轴阵列单元间距为  $\lambda/2$ 。

### 3.1 平面度分析

对于平面阵列天线, 阵面平面度主要体现在  $z$  方向, 在加入了一个均值为 0, 方差为  $\sigma$  的一个正态分布随机误差  $\Delta z$  后, 仿真分析得到了如图 2 所示的  $\varphi = 0^\circ$  和  $\varphi = 90^\circ$  平面的增益方向图, 和表 1 的天线副瓣电平与增益等随阵面平面度的变化关系。

分析图 2 和表 1 可知: (1) 天线的方向增益随着平面度公差的增大而减小, 近似可以看作是呈指数变化; (2) 对于  $32 \times 32$  的天线平面阵列, 当平面度公差为  $\lambda/15$  ( $2.13\text{mm}$ ) 时, 天线的增益损失为  $0.454\text{dB}$  ( $< 0.5\text{dB}$ ); (3) 对于天线的副瓣电平, 从图表中可以看出, 天线的加工精度对副瓣的影响主要体现在远区副瓣上, 远副瓣电平会随着平面度公差的增大而升高 (最大变化量为  $23.81\text{dB}$ ), 而第一

副瓣电平最大变化为 0.92dB，第二副瓣电平最大变化为 1.13dB，第三副瓣电平最大变化为 4.17dB。

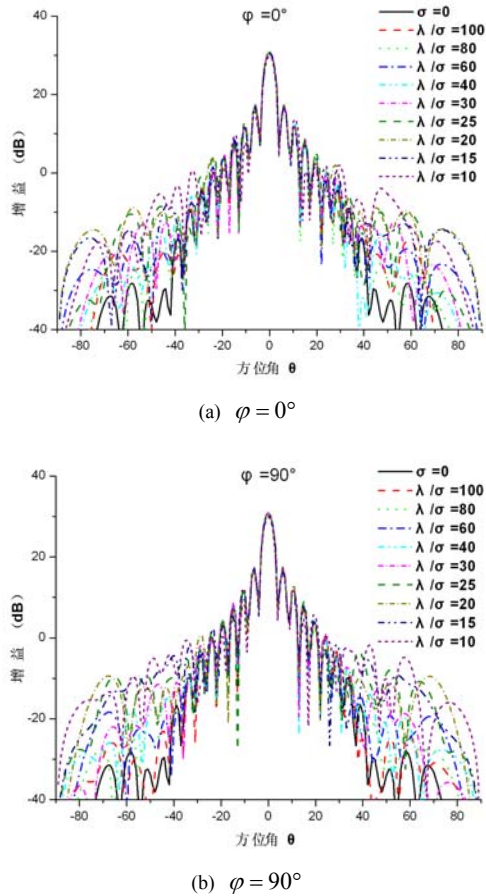


图 2 不同平面度下的天线增益方向图

3.2 安装精度分析

对于平面阵列天线，天线安装精度主要体现在 x 和 y 方向，在加入均值为 0，方差为  $\sigma$  的一正态分布随机误差  $\Delta x$  和  $\Delta y$  后，仿真分析得到了如图 3 所示的  $\varphi=0^\circ$  和  $\varphi=90^\circ$  平面的增益方向图，和表 2 的天线副瓣电平与增益等随阵面安装精度的变化关系。

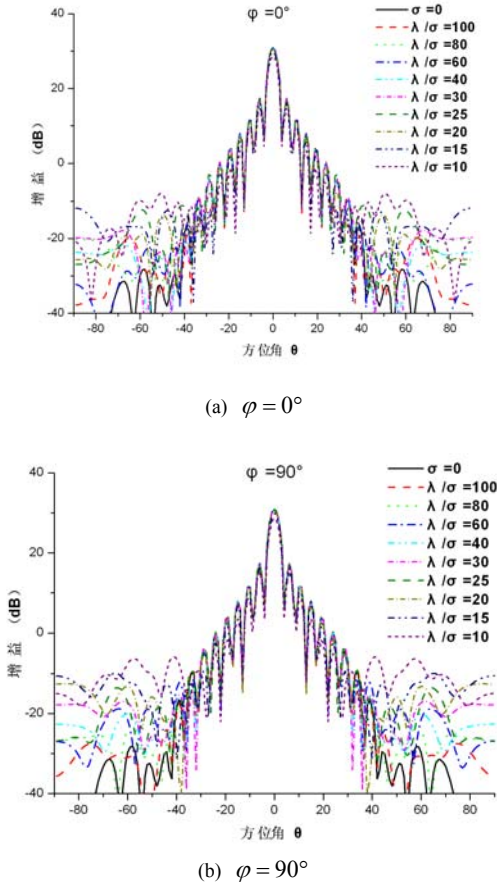


图 3 不同安装精度下的天线增益方向图

分析图 3 和表 2 可知：（1）天线的增益随着安装精度公差的增长而减小，近似可以看作是呈指数变化；（2）对于  $32\times 32$  的天线平面阵列，当加工公差为  $\lambda/20$ （1.6mm）时，天线的增益损失为 0.471dB（ $<0.5\text{dB}$ ）；（3）对于天线的副瓣电平，从图表中可以看出，天线的加工精度对副瓣的影响主要体现在远区副瓣上，远区副瓣电平会随着加工公差的增长而升高(最大变化量为 26.74dB)；近区副瓣电平的变化比较小，而第一副瓣电平变化在 0.36dB，第三副瓣电平变化最大值为 0.94dB。

表 1 天线最大增益和副瓣电平与平面度的关系

电性能 (dB)	0	$\lambda/100$	$\lambda/80$	$\lambda/60$	$\lambda/40$	$\lambda/30$	$\lambda/25$	$\lambda/20$	$\lambda/15$	$\lambda/10$
增益最大值	31.0	31.0	31.003	30.992	30.963	30.902	30.855	30.770	30.565	30.003
增益损失值	0	-0.0	-0.016	-0.027	-0.056	-0.117	-0.164	-0.249	-0.454	-1.106
第 1 副瓣电平 变化值	0	0.24	0.776	0.131	0.1307	0.1026	-0.197	0.4147	-0.4465	0.9202
第 2 副瓣电平 变化值	0	-0.10	0.01	0.48	0.41	0.14	0.25	1.39	-0.01	1.13
第 3 副瓣电平 变化值	0	0.26	-0.14	0.06	-0.48	-0.60	1.10	1.39	2.25	4.17

表 2 天线最大增益和副瓣电平与安装精度的关系

电性能 (dB)	0	$\lambda/100$	$\lambda/80$	$\lambda/60$	$\lambda/40$	$\lambda/30$	$\lambda/25$	$\lambda/20$	$\lambda/15$	$\lambda/10$
增益最大值	31.0	31.0	31.003	30.992	30.963	30.902	30.855	30.770	30.565	30.003
增益损失值	0	-0.0	-0.016	-0.027	-0.056	-0.117	-0.164	-0.249	-0.454	-1.106
第 1 副瓣电平 变化值	0	0.24	0.776	0.131	0.1307	0.1026	-0.197	0.4147	-0.4465	0.9202
第 2 副瓣电平 变化值	0	-0.10	0.01	0.48	0.41	0.14	0.25	1.39	-0.01	1.13
第 3 副瓣电平 变化值	0	0.26	-0.14	0.06	-0.48	-0.60	1.10	1.39	2.25	4.17

## 4 结束语

天线结构误差与环境载荷导致的阵面变形都会直接降低相控阵天线的电性能。因此, 基于阵面辐射单元的相位误差分析, 建立了矩形平面相控阵天线阵面变形对电性能影响的结构与电磁耦合模型,

并分析了阵面平面度与安装精度对天线电性能的影响。工程设计人员可在电性能变化允许范围内, 依据该方法对天线加工公差提出合理要求。实际的天线阵面变形是非常复杂的, 可利用天线有限元仿真分析与实验结果, 来准确得到阵面结构变形, 从而进一步分析实际工作中的天线结构变形对其电性能的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Lacomme P, Syst T A, Elancourt F. New trends in airborne phased array radars. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 14-17 Oct. 2003
- [2] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术. 北京: 电子工业出版社, 2006
- [3] 束咸荣, 何炳发, 高铁. 相控阵雷达天线. 北京: 国防工业出版社, 2007
- [4] Hans Hommel, Heinz-Peter Feldle. Current status of airborne active phased array (AESA) radar systems and future trends. 1st European Radar Conference, Netherlands, Oct 14, 2004
- [5] 蒋庆全. 有源相控阵雷达技术发展趋势. 国防技术基础. 2005, (4): 9-11
- [6] Wang H S C. Performance of phased-array antennas with mechanical errors. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 535-545
- [7] 陈杰, 周荫清. 星载 SAR 相控阵天线热变形误差分析. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(9): 839-843
- [8] 李建新, 高铁. 固态有源相控阵天线中的单元失效与容差分析. 现代雷达, 1992, 14(6): 36-44
- [9] Jiang W, Guo Y C, Liu T H, et al. Comparison of random phasing methods for reducing beam pointing errors in phased array. IEEE Trans. Antennas Propag., 2003, 51(4): 782-787

作者简介:

王从思, 男, 博士后, 主要研究领域为相控阵天线机电热耦合、先进制造等。

## 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](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,一直致力和专注于微波、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>