

基于阵面变形误差的有源相控阵天线电性能分析

王从思, 康明魁, 王 伟

(西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 有源相控阵天线(Active Phased Array Antenna, APAA)阵面安装产生随机误差, 振动冲击、热功耗等引起阵面变形, 二者产生的阵面结构变形误差会导致天线电性能的下降, 已成为实现高性能 APAA 的难点之一. 将阵面变形误差作为附加的相位因子引入到天线方向图函数中, 建立了平面矩形 APAA 阵面变形误差与电性能之间的结构-电磁耦合模型, 并仿真分析了天线阵元个数变化时, 阵面变形误差对天线电性能的影响规律.

关键词: 有源相控阵天线; 变形误差; 电性能; 耦合分析

中图分类号: TN821.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)12-2520-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.12.027

On Coupled Structural-Electromagnetic Model of Active Phased Array Antennas with Array Plane Structural Distortion Errors

WANG Cong-si, KANG Ming-kui, WANG Wei

(Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The electromagnetic performance of active phased array antenna (APAA) is obviously degraded because of plane distortion errors which include random errors generated in antenna plane assembling and structural distortion resulting from vibration, thermal power consumption, etc. It has become one of the difficulties to develop high-performance active phased array antennas. By introducing the plane distortion errors into the antenna pattern function as an additional phase factor, the coupled structural-electromagnetic model between the plane distortion errors and the performance of the planar rectangular APAA is established. The influence of the electromagnetic performances of antenna with the plane distortion errors is analyzed with the valuable results.

Key words: active phased array antenna; distortion error; electromagnetic performance; coupled analysis

1 引言

有源相控阵天线(Active Phased Array Antenna, APAA)因其可靠性高、功能多、探测和跟踪能力强、隐身性能好等无可比拟的优势, 已经广泛应用于各种雷达系统中^[1~3]. 随着世界军事技术的发展, 对有源相控阵雷达系统的战术、技术指标的要求越来越高, 而 APAA 的增益(Gain, G)、副瓣电平(Side Lobe Level, SLL)、3dB 波束宽度、波束指向等与其有着密切联系, 在很大程度上决定了有源相控阵雷达的性能. 而 APAA 阵面的加工、装配会导致阵面产生随机误差, 在天线工作时, 振动、冲击、高热功耗等又会引起阵面的变形, 最终使阵元位置产生变形误差, 导致 APAA 副瓣抬高、增益下降、指向精度变差等问题^[4,5], 严重制约了 APAA 的高增益、超低副

瓣电平电性能的实现. 因此, 必须深入研究 APAA 结构与电磁之间的耦合关系^[6~9]. 文献[10,11]从概率统计的角度分析了随机误差对阵列天线电性能的影响, 但未考虑随机误差的种类, 也没有综合考虑阵面大变形和随机误差的共同影响; 文献[12]从机电耦合的角度研究了 APAA 阵面随机误差对电性能的影响, 结论具有很好的应用价值, 但未结合阵面结构变形来分析变形和随机误差共同作用下, 天线电性能的变化; 文献[13]利用机电耦合的方法, 分析了弯曲和碗状两种典型的阵面结构变形对 APAA 电性能的影响, 但未分析随机误差的影响; 文献[14]基于概率统计的方法分析了大型相控阵天线阵面中间凹陷、正弦曲线状等四种阵面结构变形对天线电性能的影响, 得到了一系列结论, 但未将这四种变形与阵面随机误差结合起来分析, 未比较不同量级的误

收稿日期: 2013-06-13; 修回日期: 2014-01-14; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51035006, No. 51205301, No. 5147539); 国家 973 计划(No. 2015CB857102); 新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-09-0633); 高等学校学科创新引智计划(No. B14042); 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20120203110012); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. SPSZ011401, No. 72103389)

差的影响.另外,文献[9~14]均未分析 APAA 阵面尺寸变化时,误差对天线电性能的影响.

为此,本文建立了平面矩形 APAA 的结构-电磁耦合模型,将阵面随机误差和阵面变形结合起来,分析了阵面变形误差对 APAA 电性能的影响.在 APAA 阵面大小不变时,得到天线电性能随变形误差变化的曲线,并给出阵面变形和随机误差组合的临界值.当 APAA 阵面大小变化时,分析变形误差对电性能影响程度的变化趋势.文中的方法与结论,可为 APAA 的结构设计、公差合理分配等提供相应的理论指导.

2 结构与电磁耦合模型

假设 APAA 共有 $M \times N$ 个天线单元按等间距矩形栅格阵排列,方位向和距离向的间距分别为 d_x 与 d_y ,具体如图 1 所示.

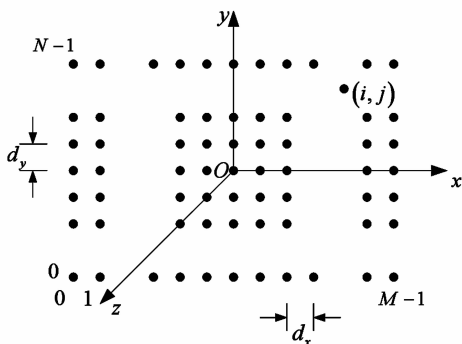


图1 平面矩形APAA的单元排列示意图

设定目标相对于坐标系 $Oxyz$ 所在的方向 (θ, ϕ) 以方向余弦表示为 $(\cos\alpha_x, \cos\alpha_y, \cos\alpha_z)$.则根据图 2 所示的空间几何关系,得到目标相对于坐标轴的夹角与方向余弦的关系为:

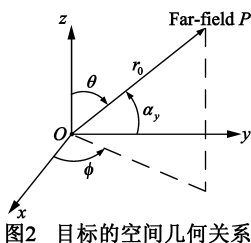


图2 目标的空间几何关系

$$\begin{cases} \cos\alpha_x = \sin\theta \cos\phi \\ \cos\alpha_y = \sin\theta \sin\phi \\ \cos\alpha_z = \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

由于阵面的制造公差和安装精度,导致第 (i, j) 单

元产生随机误差(如图 3),设 (i, j) 阵元的位置偏移量为 $(\Delta x'_{ij}, \Delta y'_{ij}, \Delta z'_{ij})$.而当 APAA 工作时,振动、冲击、热功耗等引起阵面变形.根据工程实践可知,对于平面 APAA,通常的天线安装方式使得天线子阵区域的变形为马鞍状(见图 4).通过数学曲线的特征分析,可知马鞍状变形平面阵天线上, (i, j) 单元相位中心的变形满足下式:

$$\Delta z''_{ij} = \Delta z''_{\max} \left(\frac{x_{ij}^2}{x_{\max}^2} - \frac{y_{ij}^2}{y_{\max}^2} \right) \quad (2)$$

式中, x_{\max}, y_{\max} 是矩形阵面口径长度的一半, $\Delta z''_{\max}$ 是辐射单元在 z 向的最大位移.

此时,天线阵面的实际变形如图 5 所示,天线第 (i, j) 单元实际的位置偏移量为 $(\Delta x'_{ij}, \Delta y'_{ij}, \Delta z'_{ij} + \Delta z''_{ij})$.

假设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.如图 1,第 (i, j) 单元 $(0 \leq i \leq M-1, 0 \leq j \leq N-1)$ 的位置偏移量为 $(\Delta x'_{ij}, \Delta y'_{ij}, \Delta z'_{ij} + \Delta z''_{ij})$,则该单元相对第 $(0, 0)$ 单元的相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{ij} = & k(id_x + \Delta x'_{ij} - \Delta x'_{0,0})\cos\alpha_x + \\ & k(jd_y + \Delta y'_{ij} - \Delta y'_{0,0})\cos\alpha_y + \\ & k(\Delta z'_{ij} + \Delta z''_{ij} - \Delta z'_{0,0} - \Delta z''_{0,0})\cos\alpha_z + \beta_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, β_{ij} 是第 (i, j) 单元相对第 $(0, 0)$ 单元的阵内相位差.

根据阵列天线的叠加原理,此时 APAA 的方向图函数,即结构与电磁之间的耦合模型为:

$$\begin{aligned} E(\theta, \phi) = & \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} E_e I_{ij} \exp\{jk[(id_x + \Delta x'_{ij} - \\ & \Delta x'_{0,0})\cos\alpha_x + (jd_y + \Delta y'_{ij} - \Delta y'_{0,0})\cos\alpha_y + \\ & (\Delta z'_{ij} + \Delta z''_{ij} - \Delta z'_{0,0} - \Delta z''_{0,0})\cos\alpha_z] + j\beta_{ij}\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, E_e 为天线单元的方向图函数, I_{ij} 是单元激励电流.在下面的实例仿真分析中,暂时只考虑阵因子方向图,且 I_{ij} 都采用幅度泰勒加权.

3 仿真结果与分析

随机误差和马鞍状变形对 APAA 电性能的影响程度不同,且随着 APAA 阵面尺寸的变化,同一量级的变

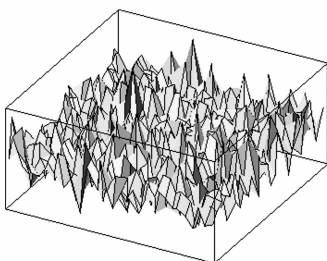


图3 阵面随机误差变形

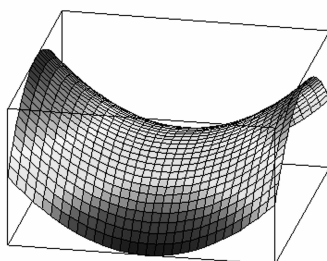


图4 阵面马鞍状变形

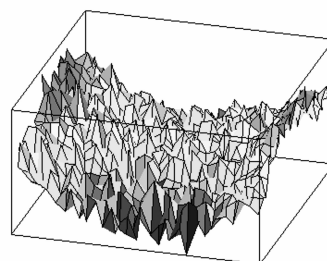


图5 阵面实际变形

形误差对电性能的影响也在变化. 因此, 不同阵面尺寸的 APAA, 在满足工程中对天线电性能的要求时的误差容限也不相同. 下面利用建立的结构-电磁耦合模型, 分析某矩形 APAA (其 x 轴与 y 轴方向的阵元间距均为 $\lambda/2$) 阵面尺寸固定和阵面尺寸变化两种情况下, 随机误差 σ_{xyz} 和马鞍状变形 σ_z 对天线电性能的影响规律.

3.1 阵面尺寸固定

此时, 天线阵面随机误差 σ_{xyz} 相当于在天线单元 x, y, z 方向加入均值为 0, 方差为 σ^2 的正态分布随机误差 $\Delta x', \Delta y', \Delta z'$. 同时, 马鞍状变形 σ_z 相当于在 z 方向取不同的最大变形值 z_{max} , 这时可由式(2)得到阵面马鞍状变形量, 将两类误差相加得到阵面实际变形误差量. 根据建立的耦合模型, 计算得到不同阵面随机误差和阵面马

鞍状变形时的增益损失(表 1)、 $\phi = 0^\circ$ 平面和 $\phi = 90^\circ$ 平面的最大副瓣电平和 3dB 波束宽度, 并基于大量数据计算绘制了它们随变形误差变化的关系曲线(图 6, 7, 8).

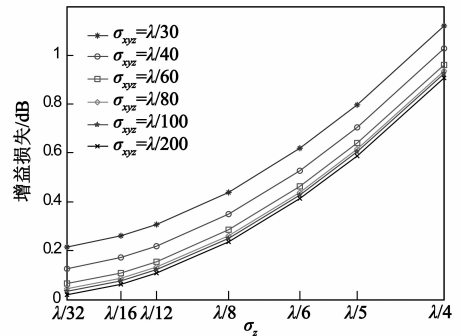


图6 增益损失与随机误差和马鞍状变形的关系

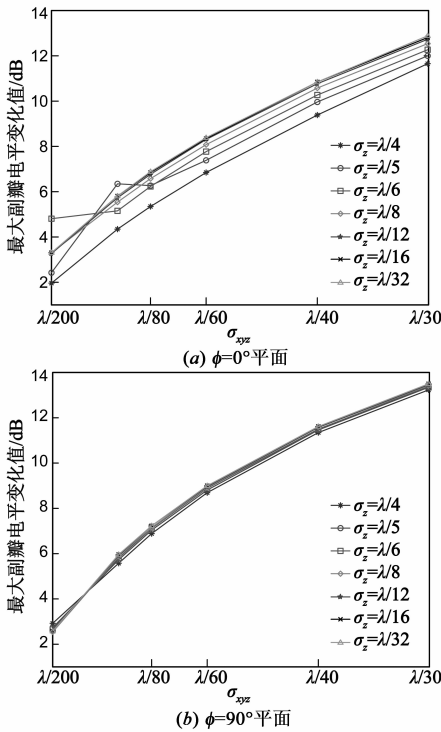


图7 最大副瓣电平与随机误差和马鞍状变形的关系

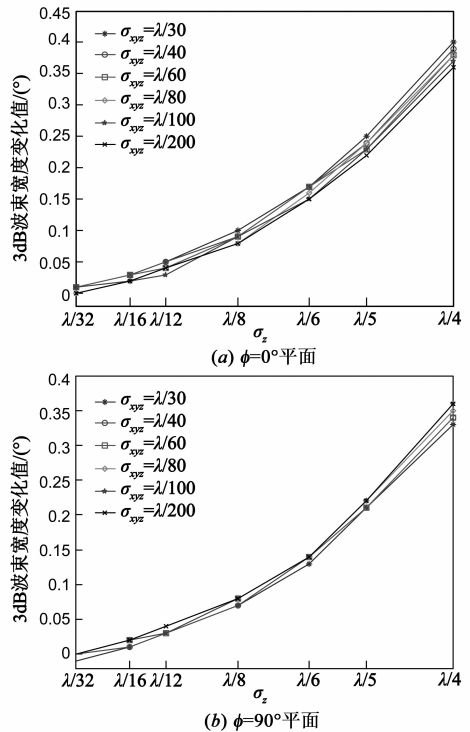


图8 3dB波束宽度变化值与随机误差和马鞍状变形的关系

表 1 增益损失与阵面随机误差和马鞍状变形的关系

随机误差	马鞍状变形							
	0	$\lambda/32$	$\lambda/16$	$\lambda/12$	$\lambda/8$	$\lambda/6$	$\lambda/5$	$\lambda/4$
0	0.0000	-0.0144	-0.0576	-0.1023	-0.2293	-0.4056	-0.5810	-0.8989
$\lambda/200$	-0.0044	-0.0193	-0.0630	-0.1080	-0.2356	-0.4125	-0.5883	-0.9068
$\lambda/100$	-0.0176	-0.0330	-0.0772	-0.1225	-0.2507	-0.4281	-0.6044	-0.9236
$\lambda/80$	-0.0275	-0.0431	-0.0875	-0.1330	-0.2616	-0.4393	-0.6158	-0.9353
$\lambda/60$	-0.0489	-0.0649	-0.1097	-0.1555	-0.2845	-0.4628	-0.6397	-0.9596
$\lambda/40$	-0.1100	-0.1269	-0.1725	-0.2187	-0.3488	-0.5280	-0.7057	-1.0268
$\lambda/30$	-0.1957	-0.2133	-0.2596	-0.3064	-0.4375	-0.6178	-0.7962	-1.1184

分析表 1、图 6、图 7 和图 8 可得:

结论 1 随着随机误差和马鞍状变形的增大,天线增益恶化,增益损失近似呈指数增大,且马鞍状变形对增益的影响更加显著,随机误差对增益的影响较小。

结论 2 当马鞍状最大变形为 $\lambda/6$, 随机误差为 $\lambda/60$ 时,增益损失 $0.4628\text{dB} (< 0.5\text{dB})$; 而当马鞍状最大变形 $\leq \lambda/8$ 时,随机误差取 $\leq \lambda/30$ 的任何值,增益损失均小于 0.5dB 。

结论 3 阵面随机误差主要影响天线的副瓣电平,随着随机误差的增大,天线副瓣电平不断升高,而马鞍状变形对副瓣电平的影响很小。

结论 4 天线的波束宽度主要由马鞍状变形影响,随着马鞍状变形的增大,波束宽度不断增大,而随机误差对波束宽度的影响很小。

结论 5 由于马鞍状变形是对称的,不改变天线波束指向,因而随着马鞍状变形和随机误差的增大,天线波束指向的变化很小,可忽略。

3.2 阵面尺寸变化

根据式(2), x_{\max} 和 y_{\max} 不同,马鞍状变形也不相同,即马鞍状变形与阵面形状相关. 因此,将阵面分为方阵 ($x_{\max} = y_{\max}$) 和长宽比不为 1 ($x_{\max} \neq y_{\max}$) 两种形状,再分析各自尺寸变化时,随机误差和马鞍状变形对天线电性能的影响规律。

3.2.1 阵面为方阵

在 3.1 节的分析基础上,使天线单元数 M 和 N 变化,且相等,不再是 32×32 . 根据耦合模型,计算不同尺寸的阵面在工况(随机误差 σ_{xyz} 和马鞍状变形 σ_z 的不同组合) 1~9 下,天线增益损失、最大副瓣电平、3dB 波束宽度和波束指向偏差的变化曲线(图 9, 10, 11, 12). 其中,工况 1~9 分别为:

- $(\sigma_{xyz}, \sigma_z) = (\lambda/40, \lambda/4), (\lambda/40, \lambda/8), (\lambda/40, \lambda/32),$
- $(\lambda/80, \lambda/4), (\lambda/80, \lambda/8), (\lambda/80, \lambda/32),$
- $(\lambda/200, \lambda/4), (\lambda/200, \lambda/8), (\lambda/200, \lambda/32).$

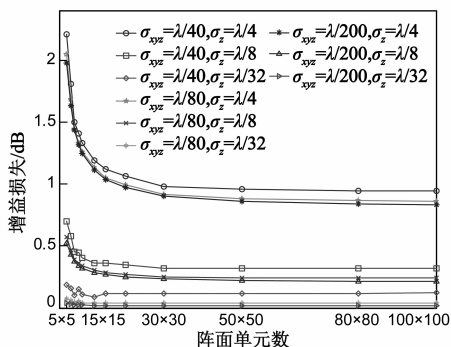


图 9 增益与阵面大小、随机误差和马鞍状变形的关系

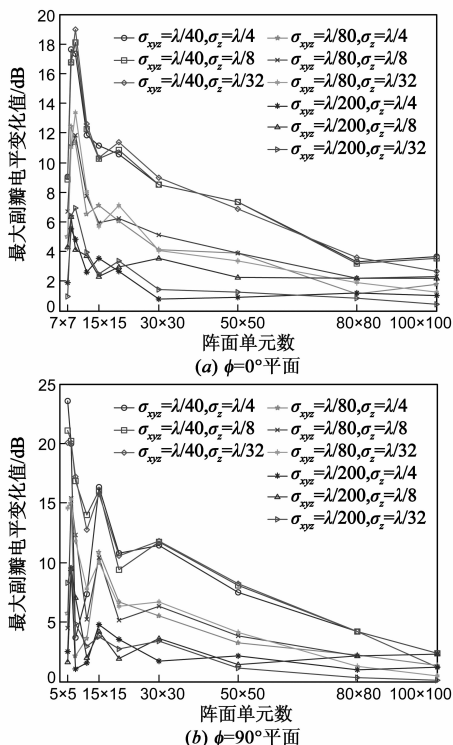


图 10 最大副瓣电平与阵面大小、随机误差和马鞍状变形的关系

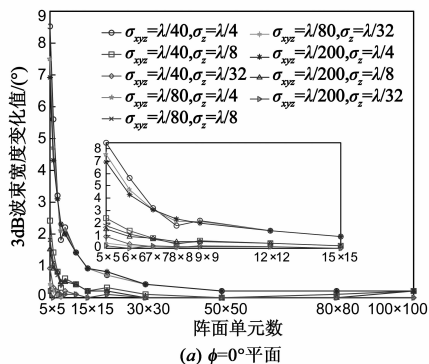
分析图 9、图 10、图 11 和图 12 可知:

(1) 随着阵面单元数的增多,阵面的变大,马鞍状变形和随机误差对天线增益的影响减弱. 从图 9 可以发现,阵面单元数大于 30×30 时,增益损失不再明显变化,说明单元数大于这个数量的大阵,对同等量级的误差不再敏感了. 而误差量级越大,对增益影响越大,且两误差的影响程度与 3.1 节中结论 1 一致。

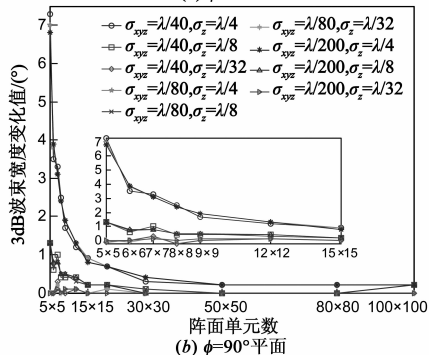
(2) 由图 10 可以发现,阵面单元数大于 30×30 时,随阵面的增大,变形误差对天线副瓣电平的影响不断减弱. 阵面单元小于 30×30 , 即阵面较小时,天线副瓣电平随单元数的增大,有降低也有升高. 但从整体来看,随着阵面的增大,同等量级的误差对副瓣电平的影响减弱,误差量级越大,对副瓣电平的影响越大. 图 10 中曲线也与 3.1 节中的结论 3 一致。

(3) 从图 11 可以看出,误差量级小时,波束宽度变化很小,可忽略. 误差量级大时,对阵面单元数小于 50×50 的 APAA,波束宽度变化很明显,且随着误差量级的增大,阵面的减小,波束宽度都在变大. 而阵面单元数大于 50×50 时,波束宽度不再明显变化. 图 11 中曲线也与 3.1 节中的结论 4 一致。

(4) 图 12 表明,阵面单元数大于 15×15 时,随着阵面的进一步增大,误差量级的增大,波束指向偏差都不再变化,且趋于零. 阵面单元数小于 15×15 时,波束指向对误差是比较敏感的。

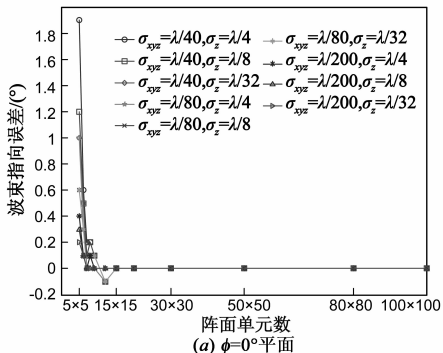


(a) $\phi=0^\circ$ 平面

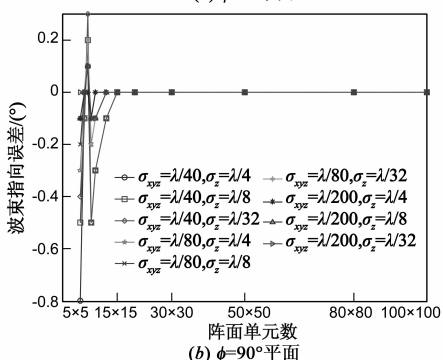


(b) $\phi=90^\circ$ 平面

图 11 波束宽度与阵面大小、随机误差和马鞍状变形的关系



(a) $\phi=0^\circ$ 平面



(b) $\phi=90^\circ$ 平面

图 12 波束指向偏差与阵面大小、随机误差和马鞍状变形的关系

3.2.2 阵面长宽比不为 1

令 x 轴方向阵元数 M 变化, y 轴方向阵元数 $N = 15$, 则阵面长宽比从小到大变化的同时, 阵面尺寸也由小到大变化。根据耦合模型, 计算不同阵面长宽比时, 在工况 1~9(见 3.2.1 节)下, 天线增益损失、最大副瓣电平、3dB 波束宽度和波束指向偏差的变化曲线(图 13,

14, 15, 16)。

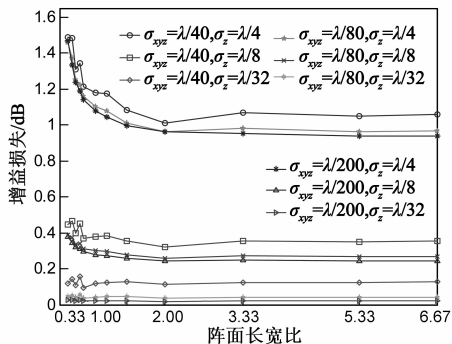
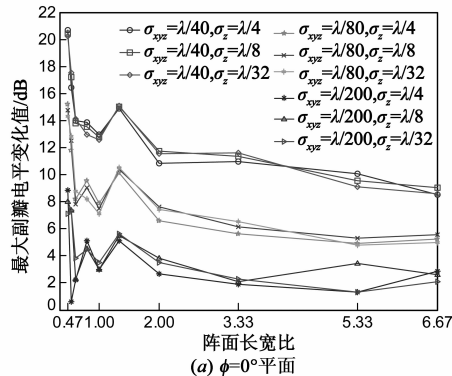


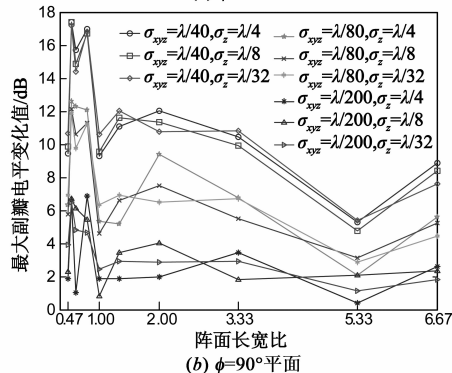
图 13 增益与阵面大小、随机误差和马鞍状变形的关系

分析图 13、图 14、图 15 和图 16 可知:

(1) 从图 13 可以看出, 当阵面长宽比大于 2 时, 增益损失不再明显变化, 说明长宽比大于 2 的大阵, 对同等量级的误差不再敏感了, 而误差量级越大, 对增益影响越大, 且两误差的影响程度与 3.1 节中的结论 1 一致。



(a) $\phi=0^\circ$ 平面



(b) $\phi=90^\circ$ 平面

图 14 最大副瓣电平与阵面大小、随机误差和马鞍状变形的关系

(2) 从图 14 可以看出, $\phi = 0^\circ$ 平面上, 阵面长宽比大 2 时, 天线副瓣电平虽有降低, 但不再明显, 阵面长宽比小于 2 时, 副瓣电平有升高也降低。 $\phi = 90^\circ$ 平面上, 随着阵面长宽比的增大, 误差量级的增大, 副瓣电平变化比较剧烈, 但整体呈降低趋势。在两个平面上, 都符合误差量级越大, 对副瓣电平的影响越大。

(3) 从图 15 可以看出, $\phi = 0^\circ$ 平面上, 阵面长宽比大于 3.33 时, 波束宽度不再明显变化, 且此时误差对波束宽度的影响也很小. 因为仿真时, 令 x 轴方向阵元数 M 变化, y 轴方向阵元数 $N = 15$ 不变, 所以在 $\phi = 90^\circ$ 平

面(即 O_{yz} 平面)上, 阵面长宽比对波束宽度几乎不产生影响, 但此时不同量级的误差, 对波束宽度的影响非常显著, 且主要是由马鞍状变形引起的.

(4) 从图 16 可以看出, 阵面长宽比小于 1, 即阵面较小时, 误差引起的 $\phi = 0^\circ$ 平面和 $\phi = 90^\circ$ 平面的波束指向偏差都比较严重, 阵面长宽比大于 1 时, 误差对 $\phi = 0^\circ$ 平面和 $\phi = 90^\circ$ 平面的波束指向影响都很大, 可忽略.

4 结论

将阵面随机误差和马鞍状变形统一作为衡量标准, 建立了平面 APAA 的结构-电磁耦合模型, 分别分析了 APAA 阵面大小不变和阵面大小变化时, 随机误差和马鞍状变形对天线电性能的影响. 通过大量数据计算, 给出了阵面马鞍状变形、随机误差、阵面大小与天线电性能的定量关系, 并绘制了影响关系曲线. 从关系曲线来看, 当 APAA 阵面单元数小于 30×30 时, 误差对天线增益和 3dB 波束宽度影响很大, 阵面单元数小于 15×15 时, 波束指向也将产生较大偏差. 整体上, 随着阵面的增大, 同等量级的误差对电性能的影响逐渐减弱. 另外, 随机误差主要影响天线的副瓣电平, 将会严重制约 APAA 低副瓣的实现, 而马鞍状变形主要影响增益和 3dB 波束宽度. 工程设计人员可依据文中的分析方法和结论, 准确预估天线性能, 减少天线结构的反复设计, 也可以在电性能允许的范围内对不同阵面大小的平面 APAA 的加工公差提出合理要求. 后续工作中, 我们拟进行更深入的研究, 争取建立阵面变形、随机误差对电性能影响的关系式, 以更简便快速地为天线结构设计提供定量依据.

参考文献

- [1] LAMBARD T, LAFOND O, HIMDI M, et al. Ka-band phased array antenna for high-data-rate SATCOM[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11(1): 256 - 259.
- [2] LUISON C, LANDINI A, ANGELETTI P, et al. Aperiodic arrays for spaceborne SAR applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(5): 2285 - 2294.
- [3] 张光义. 共形相控阵天线的理论与关键技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(4): 331 - 336.
ZHANG Guang-yi. Applications and key technologies of conformal phased array antenna[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2010, 5(4): 331 - 336. (in Chinese)
- [4] TAKAHASHI T, NAKAMOTO N, OHTSUKAM, et al. On-board calibration methods for mechanical distortions of satellite phased array antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(3): 1362 - 1372.
- [5] KAMODA H, TSUMOCHI J, KUKI T, et al. A study on anten-

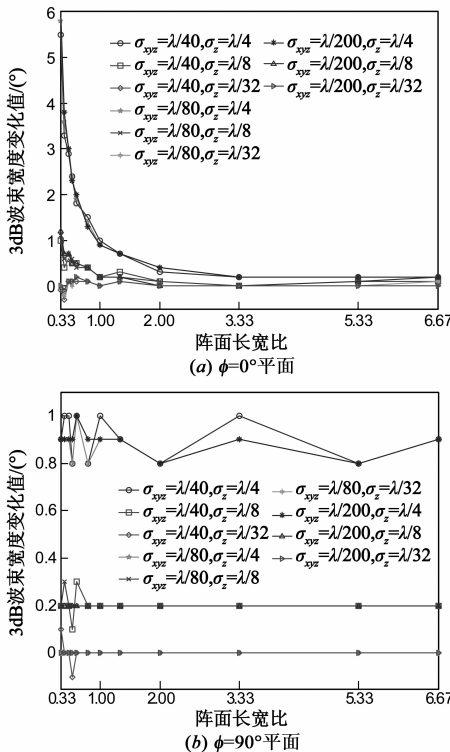


图 15 波束宽度与阵面大小、随机误差和马鞍状变形的关系

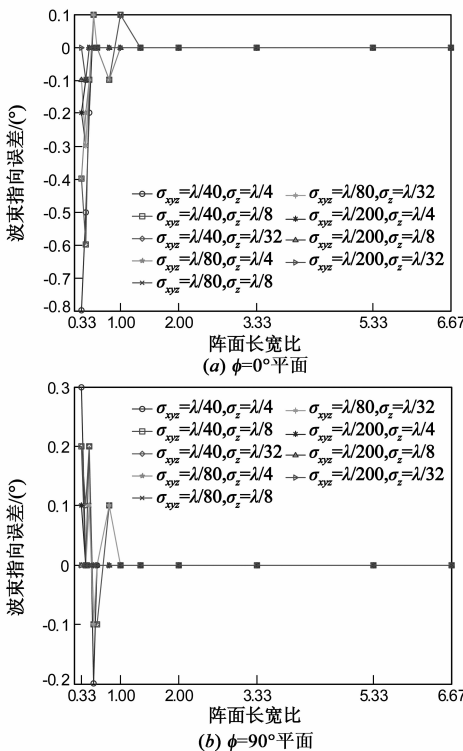


图 16 波束指向偏差与阵面大小、随机误差和马鞍状变形的关系

- na gain degradation due to digital phase shifter in phased array antennas[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, 53(8): 1743 – 1746.
- [6] DUAN Bao-yan, WANG Meng. Multidisciplinary optimization of microwave antennas[A]. 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference [C]. Massachusetts: AIAA, 2013.
- [7] 段宝岩. 电子装备机电耦合理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 1 – 18.
- [8] WANG Cong-si, DUAN Bao-yan, ZHANG Fu-shun, et al. Coupled structural-electromagnetic-thermal modeling and analysis of active phased array antennas[J]. *IET Microwaves, Antennas Propagation*, 2010, 4(2): 247 – 257.
- [9] DUAN Bao-yan. The multi-field-coupled model and optimization of absorbing material's position and size of electronic equipments[J]. *Journal of Mechatronics & Applications*, 2010, 1(1): 1 – 6.
- [10] HSIAO J K. Array sidelobes, error tolerance, gain and beamwidth[R]. Washington D C: Naval Research Lab, 1984.
- [11] WANG H S C. Performance of phased-array antennas with mechanical errors[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(2): 535 – 545.
- [12] 王从思, 平丽浩, 宋东升, 等. 基于相位差的平面相控阵天线阵元精度分析方法[A]. 全国天线年会论文集[C]. 北京: 电子工业出版社, 2009. 735 – 738.
WANG Cong-si, PING Li-hao, SONG Dong-sheng, et al. On analysis method of element precision of planar phased array antennas based phase error[A]. *National Conference on Antenna in China*[C]. Beijing: PHEI, 2009. 735 – 738. (in Chinese)
- [13] WANG Cong-si, DUAN Bao-yan, ZHANG Fu-shun, et al. Analysis of performance of active phased array antennas with distorted plane error[J]. *International Journal of Electronics*, 2009, 96(5): 549 – 559.

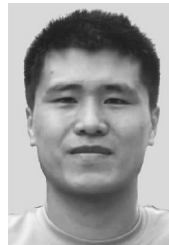
- [14] ZAITSEV E, HOFFMAN J. Phased array flatness effects on antenna system performance[A]. *IEEE international Symposium on Phased Array Systems & Technology*[C]. USA: IEEE, 2010: 121 – 125.

作者简介



王从思 男, 1980年10月出生于安徽凤阳. 西安电子科技大学教授、博士生导师. 中国电子学会、中国机械工程学会、IEEE高级会员, 中国宇航学会、IET会员. 中国电子学会青年工作委员会委员. 主要从事电子装备机电耦合、多场耦合建模与分析、天线结构与热设计等研究工作.

E-mail: congsiwang@163.com



康明魁 男, 1988年1月出生于甘肃临洮. 2010年毕业于西安电子科技大学机电工程学院. 现为硕博连读生. 从事天线机电耦合技术的研究.

E-mail: mingkui kang@163.com



王伟 男, 1980年5月生于安徽砀山. 博士, 副教授. 西安电子科技大学机电科技研究所, 研究方向为电子装备机电耦合、大型天线结构优化设计、型面变形预测及补偿等.

E-mail: wwang@xidian.edu.cn