

基于机电耦合的有源相控阵天线辐射 和散射特性综合优化

王从思^{1,2}, 王伟锋¹, 段宝岩¹, Liwei Lin², 王 伟¹, 平丽浩³, 余 涛¹

(1. 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;

2. Berkeley Sensor and Actuator Center, Department of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, CA94720, USA;

3. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210039)

摘 要: 针对有源相控阵天线的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)计算复杂、缩减困难,以及 RCS 与辐射性能难以兼顾问题,基于阵面结构变形与安装引起的辐射单元位置偏移分析,利用辐射单元相位误差,建立了有源相控阵天线阵列散射因子 RCS 的机电耦合模型.并基于该耦合模型,应用粒子群优化算法,优化阵面所有辐射单元的安装高度,以实现有源相控阵天线辐射性能和散射性能的全优.仿真结果表明,所建立的耦合模型及综合优化方法能够在保证有源相控阵天线辐射性能的前提下,有效缩减其 RCS,具有重要的工程应用价值.

关键词: 有源相控阵; 机电耦合; 雷达散射截面; 辐射性能; 单元位置; 相位误差

中图分类号: TN821.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)06-1185-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.06.022

Integrated Radiation-Scattering Optimization of Active Phased Array Antennas Based Structural-Electromagnetic Coupling Method

WANG Cong-si^{1,2}, WANG Wei-feng¹, DUAN Bao-yan¹, LIN Liwei², WANG Wei¹, PING Li-hao³, YU Tao¹

(1. Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an, Shaanxi710071, China;

2. Berkeley Sensor and Actuator Center, Department of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, CA94720, USA;

3. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu210039, China)

Abstract: To efficiently compute and reduce radar cross section (RCS) of active phased array antenna, and to balance the performance of the radiation and scattering, a novel coupled structural-electromagnetic model of the array RCS factor of active phased array antenna is developed based on the phase errors of the array elements caused by antenna structural distortion and installation. According to the coupled model, the particle swarm optimization method is used to obtain the optimal installation height of all the array elements for the better radiation and scattering performances of active phased array antenna. The simulation results prove that the developed model and the integrated optimization method can effectively reduce the RCS of active phased array antenna with good radiation performances, which demonstrates an important application value in engineering.

Key words: active phased array antenna; structural-electromagnetic coupling; radar cross section; radiation performance; element position; phase error

1 引言

有源相控阵天线(Active Phased Array Antenna, APAA)因其可靠性高、功能多、探测和跟踪能力高、隐身性能好等优势,已经广泛应用于各种雷达系统中^[1].其辐射场和散射场的分析与计算是天线领域的一类重要课题.雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)是表征目

标散射强弱的物理量.天线作为辐射元件的散射机理比普通目标更为复杂^[2],且其 RCS 缩减的同时,须满足天线最基本的辐射性能的要求^[3].所以,天线的雷达散射截面缩减的核心问题就是如何兼顾天线的辐射性能与散射性能.国内外学者们至今也没有找到一种理想的途径,可以在完全不影响天线辐射性能的情况下显著地缩减天线 RCS^[4].

收稿日期:2013-09-27;修回日期:2014-01-08;责任编辑:覃怀银

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51035006, No. 51205301, No. 50805111);新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-09-0633);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. K50510040001, No. K5051304009, No. 72103389);高等学校学科创新引智计划(No. B14042)

有源相控阵天线的散射场可分为结构模式项散射和天线模式项散射两部分,两者矢量叠加构成了有源相控阵天线的 RCS.通常,要解析确定结构模式项散射场、天线模式项散射场以及两者之间的相位差是十分困难的^[5].近些年,有些学者依据经典的阵列天线辐射方向图乘积定理,结合遗传算法^[6]、粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[7]、克隆免疫算法^[8]等多种智能优化算法,对其辐射性能进行分析与综合,而对其散射方向图分析和综合的研究较少.文献[9]使用类似辐射方向图乘积定理,在不考虑辐射单元之间互耦和边缘效应的情况下推导出阵列天线散射场可表示为单元因子和阵列散射因子的乘积,进而通过优化单元之间的间距,对阵列天线的辐射和散射性能进行优化.同样,文献[10]结合矩量法计算阵列天线的 RCS,并应用差分进化法优化阵列天线的单元间距,进而实现辐射和散射性能的兼顾.然而,这两种方法都只是从传统的阵列天线综合角度,通过调整辐射单元间距来综合优化天线辐射和散射性能,优化结果仅对阵列天线 RCS 方向图的散射峰值有所缩减,而对其 RCS 的主瓣几乎没有缩减.另外,上述方法得到的不规则的辐射单元间距,给阵面结构设计、散热设计,以及工艺加工等具体实施过程带来了很大的困难.同时,文献[10]采用电场积分方程及 RWC^[11]基函数的矩量法来分析阵列天线的辐射场和散射场,不仅计算过程复杂,而且不易求解.

由于机械加工设备精度和装配精度限制,以及受到振动、热功耗等环境载荷的影响,有源相控阵天线辐射单元位置会偏离理想设计位置,从而导致天线辐射性能恶化明显^[12~14].而辐射单元位置的变化对于散射性能的影响却难以预估和减弱.为此,本文基于阵面辐射单元的相位误差分析,在不考虑辐射单元之间互耦和边缘效应的情况下,研究了有源相控阵天线辐射单元位置误差对散射性能影响的阵列散射因子 RCS 结构与电磁耦合问题.然后基于具有搜索速度快、效率高、算法简单等优点的 PSO 优化算法,对有源相控阵天线的辐射单元安装高度进行优化,并兼顾天线辐射性能,达到缩减其 RCS 的目的,从而给出一种简单、有效、快速的兼顾辐射和散射性能的有源相控阵天线综合设计方法.

2 APAA 结构与散射因子耦合模型

假设有源相控阵天线的辐射单元按如图 1 所示的等间距矩形栅格阵排列,共有 $M \times N$ 个辐射单元,且辐射单元以等间距 d_x 、 d_y 排列在 xOy 平面.

假设目标相对于坐标系 $Oxyz$ 所在的方向 (θ, φ) 以方向余弦表示为 $(\cos \alpha_x, \cos \alpha_y, \cos \alpha_z)$,根据图 2 所示的

空间几何关系,可得到目标相对于坐标轴的夹角与方向余弦的关系为

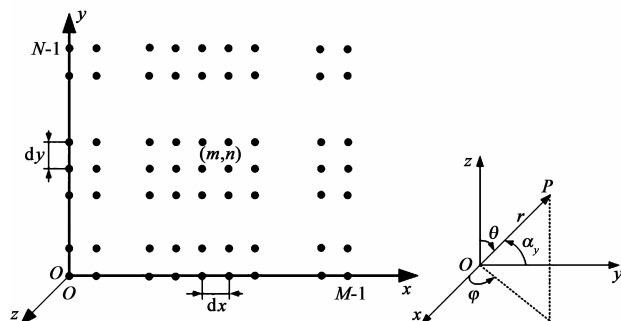


图1 平面阵列天线单元排列示意图

图2 空间几何关系

$$\begin{cases} \mu = \cos \alpha_x = \sin \theta \cos \varphi \\ \nu = \cos \alpha_y = \sin \theta \sin \varphi \\ \omega = \cos \alpha_z = \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

当有源相控阵天线的结构发生变形时,令其辐射单元的位置偏移量为 $(\Delta x_{mn}, \Delta y_{mn}, \Delta z_{mn})$,则第 (m, n) 单元相对于第 $(0, 0)$ 单元的空间相位差为

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_{mn} = & k(m d_x + \Delta x_{mn} - \Delta x_{00}) \cdot \mu \\ & + k(n d_y + \Delta y_{mn} - \Delta y_{00}) \cdot \nu \\ & + k(\Delta z_{mn} - \Delta z_{00}) \cdot \omega \end{aligned} \quad (2)$$

因此,基于上述辐射单元的相位误差分析,根据雷达散射截面的计算原理和散射场方向图乘积理论^[9],在不考虑辐射单元之间互耦和边缘效应的情况下,可得到有源相控阵天线阵列散射因子 σ_a 的方向图函数,也就是有源相控阵天线散射场的阵列散射因子 RCS 结构与电磁耦合模型为

$$\begin{aligned} \sigma_a = & \left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \exp \{ 2 \times j [k(m d_x + \Delta x_{mn} - \Delta x_{00}) \cdot \mu \right. \\ & + k(n d_y + \Delta y_{mn} - \Delta y_{00}) \cdot \nu \\ & \left. + k(\Delta z_{mn} - \Delta z_{00}) \cdot \omega] \} \right|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

下面对结构与电磁耦合模型进行验证.

分别以 1×25 线阵和 7×7 面阵为例,取有源相控阵天线中每个辐射单元的 z 向安装高度分别为 $[-\lambda/10, \lambda/10]$ 之间生成的随机数,将耦合模型计算的有源相控阵天线阵列散射因子 RCS 结果和电磁仿真软件 FEKO 仿真的天线总 RCS 结果进行比较(如图 3 所示).

分析图 3 可以看出,辐射单元安装高度方向加入误差后,耦合模型计算的有源相控阵天线阵列散射因子 σ_a 的结果和 FEKO 软件仿真的有源相控阵天线总的 RCS 的结果虽然在数值上不相同(前者是后者的一部分),但是耦合模型计算的阵列散射因子 RCS 方向图中主瓣和散射峰值出现的位置与幅度、散射峰值的个数,以及副瓣和总体变化趋势与 FEKO 软件仿真的总 RCS 方向图保持一致.因此,在不考虑辐射单元之间互耦和

边缘效应的情况下,可基于此耦合模型,研究辐射单元位置误差与有源相控阵天线总 RCS 的关系,进一步通

过优化辐射单元的安装高度,在兼顾天线辐射性能的前提下,实现有源相控阵天线 RCS 的缩减.

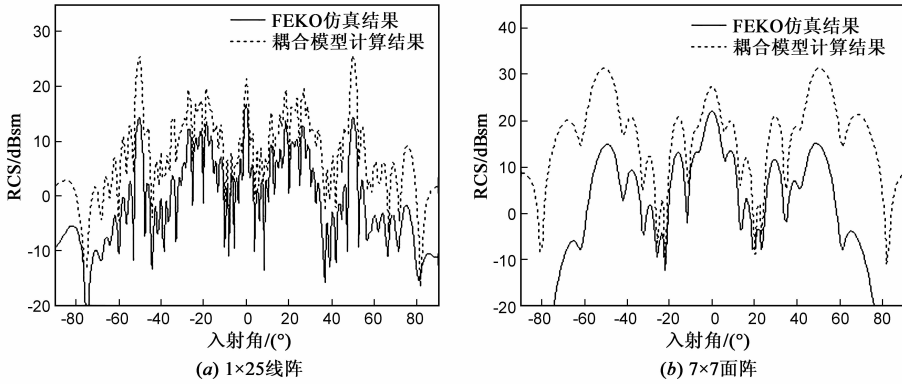


图3 z 向加入误差后耦合模型和FEKO仿真结果比较

3 辐射和散射特性综合优化方法

3.1 APAA 辐射和散射特性的计算方法

在有源相控阵天线 RCS 缩减中,不仅要考虑其 RCS 的减少量,同时要考虑其辐射性能的损失.而有源相控阵天线的增益在很大程度上决定了有源相控阵雷达的性能.散射性能中,危险最大区域的是 RCS 方向图中主瓣和副瓣的峰值所出现的区域.所以,本文考虑其增益损失量最小和 RCS 主瓣、散射峰值缩减量最大为综合优化目标.

文献[15,16]基于阵面辐射单元的相位误差分析,建立了平面矩形有源相控阵天线辐射单元位置误差对电性能影响的结构与电磁耦合模型,据此可分析单元位置误差对于有源相控阵天线辐射性能的影响.当不计入 x 、 y 方向误差,且天线单元等间距排列、等幅同相馈电时,有源相控阵天线电场方向图函数为

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} E_e I_{mn} \cdot \exp\{jk[m dx \cdot \cos\alpha_x + ndy \cdot \cos\alpha_y + \Delta z_{mn} \cdot \cos\alpha_z]\} \quad (4)$$

其中, E_e 为天线单元的方向图函数, I_{mn} 为馈电幅度,本文所研究阵列中的单元均为等幅同相馈电.同样条件下,有源相控阵天线的阵列散射因子 RCS 结构与电磁耦合模型可以简化为

$$\sigma_a = \left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[2jk(m dx \cdot \cos\alpha_x + ndy \cdot \cos\alpha_y + \Delta z_{mn} \cdot \cos\alpha_z)] \right|^2 \quad (5)$$

综合式(4)和式(5),可以看出,在不计入辐射单元间距误差的影响,而只考虑 z 向安装高度的影响时,有源相控阵天线的辐射场方向图函数和阵列散射因子 RCS 方向

图函数均为单元安装高度矢量 Δz_{mn} 的函数.因此,本文以有源相控阵天线中每个辐射单元的 z 向安装高度为优化变量,以有源相控阵天线的增益损失量最小时,其阵列散射因子 RCS 方向图中主瓣和散射峰值的缩减量最大为优化目标,应用粒子群优化算法(PSO),来实现有源相控阵天线辐射和散射特性的全优.

3.2 粒子群优化算法

标准粒子群优化算法最早是由 Kennedy 和 Eberhart 等人于 1995 年通过对鸟群觅食行为的研究,提出的基于群体的优化算法^[17].在求解问题的最优解时,首先初始化一群随机粒子(随机解),在每一次迭代中,在搜索空间中以一定的速度飞行,粒子通过跟踪两个极值来更新自己;一个极值是粒子本身所找到的最优解,这个解称为个体极值;另一个极值是整个种群目前找到的最优解,这个解称为全局极值.在找到这两个最优值时,粒子根据如下公式来分别更新自己的速度 v_{id} 和位置 x_{id} ^[18].

$$v_{id} = v_{id} \omega + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (6)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (7)$$

其中: ω 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子,其取值均设为 2; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数; p_{id} 代表的是个体极值; p_{gd} 代表的是全局最优值.粒子在空间中不断学习个体极值和全局极值的经验更新粒子速度和位置直至找到最优解.

3.3 粒子生成

以 $dz = \{dz_{00}, dz_{01}, \dots, dz_{mn}\}$ 表示辐射单元的安装高度矢量(即一个粒子),对 $M \times N$ 个单元的每个辐射单元安装高度进行优化排布,寻求满足适应度函数的最优解.

3.4 适应度函数

综上,本文以有源相控阵天线中每个辐射单元的

安装高度为变量,以优化前后辐射方向图中增益损失最小、耦合模型计算的阵列散射因子 RCS 的主瓣、散射峰值的缩减量最大为目标函数,定义的适应度函数(目标函数)为

$$\text{fitness}(dz_{ij}) = \min\{\omega_1[20\lg(\text{Gain} - \text{Gain}')] + \omega_2 \max[10\lg\sigma_a(\varphi_{al}, \varphi_{a0}, \varphi_{ar})]\} \quad (8)$$

其中,第一项表示优化前后有源相控阵天线的增益损失量, Gain 为优化前的天线增益, Gain' 为优化后的天线增益;第二项表示优化后有源相控阵天线的 RCS 最大值,也就是其 RCS 方向图中的主瓣和散射峰值. $\sigma_a(\varphi_{al}, \varphi_{a0}, \varphi_{ar})$ 为基于所提出的结构与电磁耦合模型计算的有源相控阵天线阵列散射因子 RCS 方向图中左散射峰值、主瓣、右散射峰值的最大值,其中 $(\varphi_{al}, \varphi_{a0}, \varphi_{ar})$ 分别是这三个峰值出现时对应的角度. ω_1 和 ω_2 代表辐射和散射特性的加权值.

4 计算实例与结果分析

下面以对称振子为有源相控阵天线的辐射单元,分别以线阵和面阵为例,利用耦合模型和综合优化方法研究辐射单元 z 向安装高度对天线辐射和散射特性的综合影响,并将辐射单元高度优化结果在电磁仿真软件 FEKO 中进行建模仿真,验证综合优化的结果.考虑机载天线工程的要求,本文有源相控阵天线单元间距均取 0.65λ .

4.1 线阵

如图 4 所示,取辐射单元个数为 $N = 25$ 的等间距直线阵列进行综合优化分析.

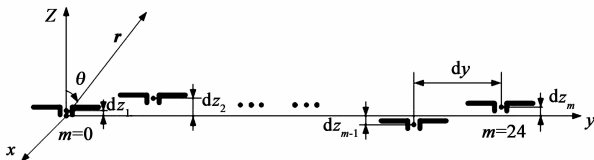
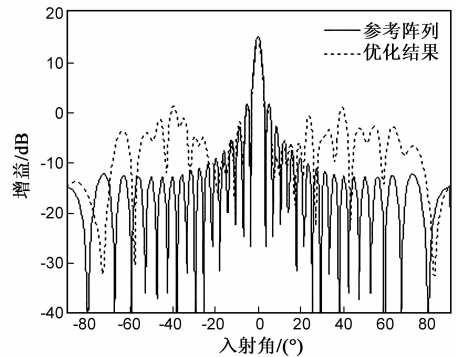


图4 1×25等间距直线阵列单元排布示意图

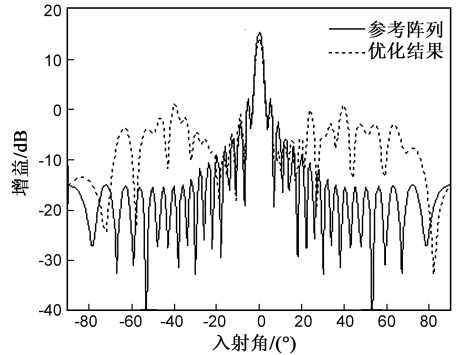
对每个单元的安装高度在 $[-\lambda/10, \lambda/10]$ 范围内进行优化.应用本文提出的耦合模型和综合优化方法得到 z 向安装高度的最优值为: $dz_m = \{-0.0895\lambda, 0.0885\lambda, -0.09967\lambda, 0.087423\lambda, 0.091156\lambda, -0.072137\lambda, 0.06756\lambda, -0.07562\lambda, 0.08632\lambda, -0.08987\lambda, -0.08567\lambda, 0.08378\lambda, -0.096134\lambda, -0.09156\lambda, 0.08986\lambda, -0.07563\lambda, 0.06675\lambda, -0.09934\lambda, 0.08997\lambda, -0.07973\lambda, 0.08863\lambda, -0.09637\lambda, 0.0876\lambda, 0.0869\lambda, -0.0865\lambda\}$.

图 5 为优化前后,辐射性能的变化,图 6 优化前后 RCS 的变化.图中实线代表的是以等间距, z 向无安装高度的 1×25 线阵为参考阵列的辐射和 RCS 方向图,虚

线代表优化后的辐射和 RCS 方向图.天线主要辐射性能和散射性能的具体优化数值如表 1 所示.表中数据是优化前后的天线电性能对比结果,其中耦合模型计算结果指基于机电耦合模型计算的天线阵因子增益和阵列散射因子 RCS, FEKO 仿真结果是基于 FEKO 软件中天线的实体建模的仿真计算结果.



(a) 阵因子增益方向图



(b) FEKO仿真的增益方向图

图5 优化前后有源相控阵天线辐射性能的比较

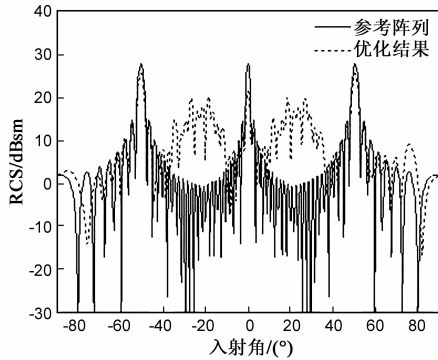
对图 5、图 6 以及表 1 数据进行分析,可以看出:对于 1×25 线阵,优化前后,阵列辐射因子和阵列散射因子 RCS 结构与电磁耦合模型计算结果表明,阵因子增益损失 1.24dB 时,阵列散射因子 RCS 主瓣可以缩减达 6.58dBsm,三个峰值总的 RCS 缩减量可达到 11.20dBsm;而在 FEKO 中以优化数据实体建模进行仿真,结果表明,优化后增益损失为 1.20dB,阵列天线总的 RCS 主瓣缩减量可达 8.49dBsm,而三个峰值总的 RCS 缩减量达 18.42dBsm.可以看出,该方法在保证辐射性能的情况下,通过调整安装高度优化线阵的阵列散射因子 RCS 的主瓣和两个散射峰值,进而使得线阵总的 RCS 的主瓣和散射峰值得到缩减,证明了该方法对于线阵的正确性和有效性.

4.2 面阵

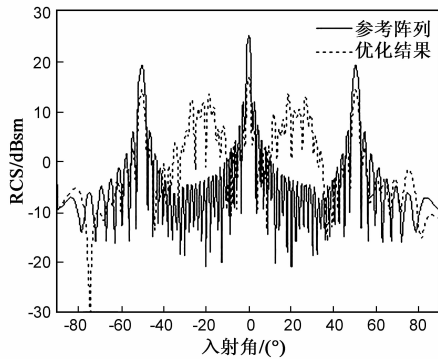
如图 7 所示,取 x, y 方向等间距排列的 7×7 面阵,对每个辐射单元的安装高度进行综合优化分析,得到 z 向最优安装高度为

表 1 1×25 线阵优化结果

	耦合模型计算结果				FEKO 计算结果			
	增益 (dB)	阵列散射因子 RCS(dBsm)			增益 (dB)	总 RCS(dBsm)		
		左散射峰值	主瓣	右散射峰值		左散射峰值	主瓣	右散射峰值
优化前	15.09	27.81	27.96	27.81	15.45	19.26	25.25	19.26
优化后	13.85	25.47	21.38	25.53	14.25	14.27	16.76	14.32
改变量	1.24	2.34	6.58	2.28	1.20	4.99	8.49	4.94



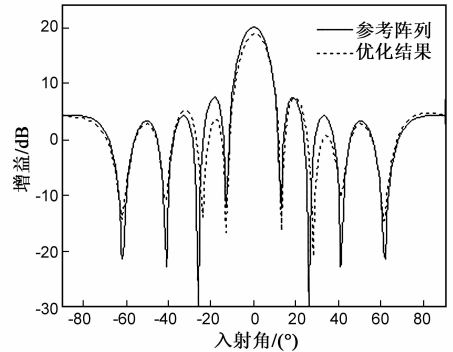
(a) 耦合模型计算的阵列散射因子RCS方向图



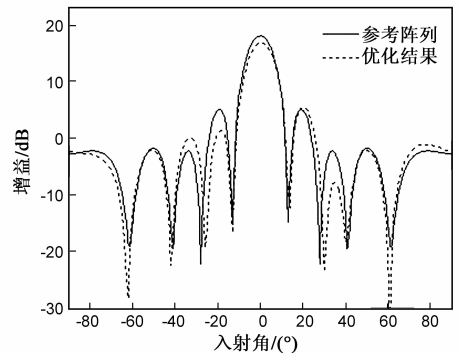
(b) FEKO仿真的总RCS方向图

图6 优化前后有源相控阵天线RCS变化的比较

分析图 8、图 9 以及表 2 数据,可以看出:对于 7×7 面阵,优化前后阵列辐射因子和阵因子 RCS 散射结构与电磁耦合模型计算结果表明,阵因子增益损失为 1.29dB 时,主瓣 RCS 可以缩减达 6.33dBsm,三个峰值总的 RCS 缩减量可达到 10.90dBsm,而在 FEKO 中以优化数据实体建模进行仿真,结果表明,优化后增益损失 1.22dB,主瓣 RCS 缩减量可达 8.43dBsm,而三个峰值总的 RCS 缩减量可达 20.06dBsm. 因此,可知该方法在保证辐射性能的情况下,通过调整安装高度优化面阵的阵列散射因子 RCS 的主瓣和两个散射峰值,进而使得面阵的总的 RCS 的主瓣和散射峰值得到抑制,证明了该方法对于面阵的正确性和有效性.



(a) 辐射阵因子E面增益方向图



(b) FEKO仿真的E面增益方向图

图8 优化前后有源相控阵天线辐射性能变化

综上,可以看出,本文在建立的阵列散射因子 RCS 结构与电磁耦合模型的基础上,提出的通过优化辐射单元 z 向安装高度,同时兼顾辐射和散射性能的综合设计方法,不仅可以快速估计有源相控阵天线 RCS 峰

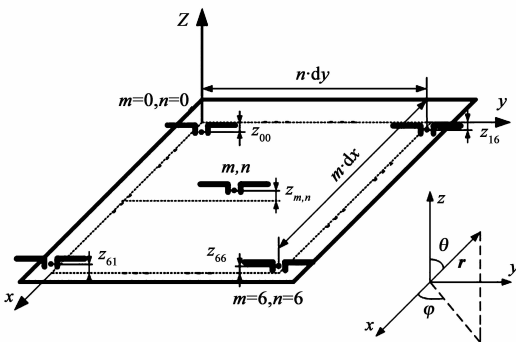


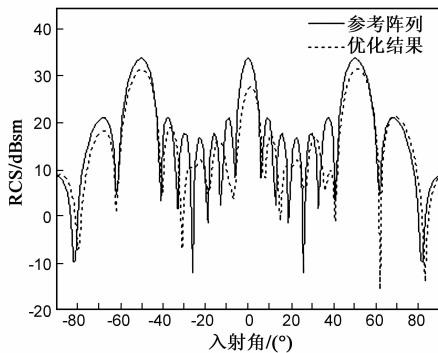
图7 7×7等间距面阵单元排布示意图

$$Z_{nm} = \begin{bmatrix} 0.1336 & 0.1623 & -0.1107 & 0.1531 & 0.1355 & -0.0566 & 0.1023 \\ 0.0955 & -0.0831 & 0.1535 & 0.1388 & 0.2042 & 0.0398 & 0.0919 \\ 0.0316 & 0.0902 & -0.0019 & 0.0939 & 0.1378 & -0.1146 & -0.0459 \\ -0.0517 & 0.0208 & 0.0954 & 0.0562 & 0.1593 & 0.1509 & 0.0341 \\ 0.0759 & 0.0792 & 0.1636 & 0.0039 & 0.0369 & -0.0369 & 0.1871 \\ -0.0636 & 0.1208 & -0.0336 & 0.1491 & 0.1663 & 0.1008 & -0.0446 \\ -0.0592 & -0.0239 & 0.2076 & 0.0734 & -0.0137 & 0.1396 & -0.0553 \end{bmatrix} \cdot \lambda$$

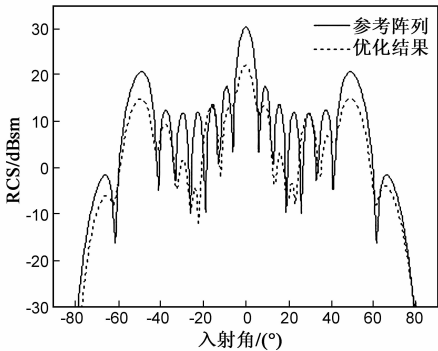
值出现的危险区域,且简单、有效,并能实现辐射和散射性能的全优.

表 2 7×7 面阵优化结果

	耦合模型计算结果				FEKO 计算结果			
	增益 (dB)	阵列散射因子 RCS(dBsm)			增益 (dB)	总 RCS(dBsm)		
		左散射峰值	主瓣	右散射峰值		左散射峰值	主瓣	右散射峰值
优化前	20.28	33.73	33.80	33.73	18.08	20.77	30.60	20.77
优化后	18.99	31.32	27.47	31.57	16.86	14.96	22.17	14.95
改变量	1.29	2.41	6.33	2.16	1.22	5.81	8.43	5.82



(a) 耦合模型计算的阵列散射因子 RCS 方向图



(b) FEKO 仿真的总 RCS 方向图

图 9 优化前后有源相控阵天线 RCS 变化

该方法的正确性和有效性. 据此, 实际天线工程设计中, 利用本文方法通过调整有源相控阵天线的辐射单元安装高度, 可同时实现 RCS 的缩减与辐射性能的保证, 不仅简单有效, 而且具有明显的工程应用价值.

参考文献

- [1] Stutsman W L, Thiele G A. Antenna Theory and Design[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. 10 - 15.
- [2] Knott E F, Shaeffer J F, Tuley M T. Radar Cross Sections[M]. Raleigh: SciTech Publishing, 2004. 21 - 49.
- [3] Michael Joseph Aspinwal, Morris W R. Design, Simulation and Analysis of a Low Radar Cross Section UHF Circular Microstrip Patch Antenna and Radome for United States Naval Fleet Broadcast Applications[M]. Ann Arbor: Proquest, Umi Dissertation Publishing, 2011. 10 - 81.
- [4] 龚书喜, 刘英, 等. 天线雷达截面预估与减缩[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010. 1 - 137.
GONG S X, LIU Ying, et al. Prediction and Reduction of Antenna Radar Cross Section[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2010. 1 - 137. (in Chinese)
- [5] 阮颖铮, 等. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 30 - 306.
RUAN Ying-zheng, et al. Radar Cross Section and Stealth Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 30 - 306. (in Chinese)
- [6] Calvete H I, Gale C, Mateo P M. A new approach for solving linear bilevel problems using genetic algorithms[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 188(1): 14 - 28.
- [7] LI W T, SHI X W, XU L, et al. Improved GA and PSO culled hybrid algorithm for antenna array pattern synthesis[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008, 80: 461 - 476.
- [8] 池越, 张鹏奎, 陈国鹰, 等. 基于免疫克隆选择算法的天线方向图综合技术研究[J]. 通信技术, 2009, 42(5): 71 - 74.
CHI Yue, ZHANG Peng-lei, CHEN Guo-ying, et al. Pattern synthesis based on immune clone selection algorithm[J]. Communication Technology, 2009, 42(5): 71 - 74. (in Chinese)
- [9] LU B, GONG S X, ZHANG S, et al. Optimum spatial arrangement of array elements for suppression of grating-lobes of radar

5 结束语

有源相控阵天线辐射性能与散射性能的兼顾, 是其 RCS 缩减的难点. 相对于以往论文中仅通过单元间距综合辐射和散射性能, 只能对 RCS 散射峰值进行缩减而对主瓣优化效果不佳, 且所得不规则排布的单元间距给机械结构设计与制造加工带来额外困难, 本文基于辐射单元相位误差分析, 在不考虑辐射单元之间互耦和边缘效应的情况下, 建立了有源相控阵天线阵列散射因子 RCS 结构与电磁耦合模型, 并利用 PSO 优化算法对辐射单元安装高度进行优化调整, 在满足辐射性能要求同时大幅缩减有源相控阵天线 RCS. 同时, 与电磁仿真软件 FEKO 的仿真结果进行了比较, 验证了

cross section[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 38(9): 114 – 117.

- [10] WANG W, GONG S X, WANG X, et al. Differential evolution algorithm and method of moments for the design of low-RCS antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 295 – 298.
- [11] Rao S, Wilton D, Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(3): 409 – 418.
- [12] 段宝岩, 王猛. 微波天线多场耦合理论模型与多学科优化设计的研究 [J]. 电子学报, 2013, 41(10): 2051 – 2060. DUAN Bao-yan, WANG Meng. Research of the theoretical model of multi-field coupling and multidisciplinary optimization design on microwave antennas [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(10): 2051 – 2060. (in Chinese)
- [13] 王从思, 康明魁, 王伟, 普涛. 结构变形对相控阵天线电性能的影响分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(8): 1644 – 1649. WANG Cong-si, KANG Ming-kui, WANG Wei, PU Tao. Analysis of electrical performances of phased array antennas with structural deformations [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(8): 1644 – 1649. (in Chinese)
- [14] 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. 19 – 70. DUAN Bao-yan. Theory and Method of Structural-Electromagnetic Coupling of Electronic Equipments and Its Applications [M]. Beijing: Science Press, 2011. 19 – 70. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] WANG Cong-si, DUAN Bao-yan, ZHANG Fu-shun, ZHU Min-bo. Analysis of performance of active phased array antennas with distorted plane error [J]. International Journal of Electronics, 2009, 96(5): 549 – 559.
- [17] Robinson J, Rahmat-Samii Y. Particle swarm optimization in electromagnetics [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(2): 397 – 407.
- [18] JIN N, Rahmat-Samii Y. Parallel particle swarm optimization and finite-difference time-domain (PSO/FDTD) algorithm for multiband and wide-band patch antenna designs [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(11): 3459 – 3468.

作者简介



王从思 男, 1980年10月生于安徽凤阳. 西安电子科技大学教授、博士生导师. 中国电子学会、中国机械工程学会高级会员, 中国宇航学会、IEEE、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: congswang@163.com



王伟锋(通信作者) 男, 1989年4月生于陕西宝鸡. 2012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: ww213@126.com

段宝岩 男, 1955年生于河北冀县, 中国工程院院士, 西安电子科技大学电子机械学科教授、博士生导师, 中国电子学会会士, 电子机械工程分会主任委员, 《Chinese Journal of Electronics》副主编, 《电子机械工程》编委会主任. 主要研究领域为电子机械工程、电子装备机电耦合、工程结构优化设计等.

E-mail: byduan@xidian.edu.cn

Liwei Lin 美国加州大学伯克利分校传感器和执行器中心联合主任, 长江学者讲座教授、千人计划专家. 主要研究方向: MEMS、纳米技术、设计和制造微传感器和微执行器等.

E-mail: lwlin@me.berkeley.edu

王伟 男, 1980年生于安徽砀山. 西安电子科技大学机副教授, 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

平丽浩 男, 1961年生于浙江平湖. 研究员级高工. 南京电子技术研究所首席专家. 西安电子科技大学兼职教授、博士生导师, 总装电磁兼容专业组专家, 国家86计划先进制造领域专家. 曾主持数十项重点装备的结构技术研究, 获多项国家和省部级科技进步奖. 研究方向为电子机械和虚拟样机技术.

E-mail: PingLH2005@sian.com.cn

余涛 男, 1989年出生于陕西安康. 现为西安电子科技大学机电工程学院硕士研究生, 研究方向为机电热各种误差因素.

E-mail: yutao040811@163.com