

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2010.03.020

# 共形天线阵列方向图分析与综合

张 凡, 张福顺, 赵 钢, 林 晨

(西安电子科技大学 天线与微波技术重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 在存在单元互耦的情况下, 提出了锥台共形天线阵方向图的分析与综合方法. 采用渐变缝隙天线作为阵列单元, 先算出天线单元的阵中耦合方向图, 然后以叠加原理为基础分析计算天线阵列的主极化和交叉极化方向图. 采用 Ansoft HFSS 仿真软件对该锥台共形天线阵进行了仿真分析, 结果表明, 所提出的分析方法准确可靠, 为锥台共形天线阵特性优化设计提供了方法支持. 同时, 采用雁群优化算法, 对  $0^\circ$  方位面内的阵列主极化扫描方向图及交叉极化方向图进行了优化综合.

**关键词:** 共形天线阵; 耦合方向图; 阵列分析; 雁群优化算法; 优化综合

**中图分类号:** TN820.1<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2010)03-0496-06

## Pattern analysis and synthesis of the conformal antennas array

ZHANG Fan, ZHANG Fu-shun, ZHAO Gang, LIN Chen

(Key Lab. of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The radiation pattern of the conformal antennas array is analyzed and synthesized by considering the effects of mutual coupling. First, we choose the tapered slot antenna as the element of the conformal array and calculate the patterns of the element in the environments of the array, and then analyze the array patterns of co-polarization and cross-polarization in terms of the combination of the element patterns. A comparison between the result of full-wave calculation by Ansoft HFSS for the whole array and that by this method is given to show the effectiveness of this method. In the meantime, geese particle swarm optimization (GPSO) is applied for the optimization of the scan patterns of co-polarization and the performance of the cross-polarization in the plane of  $\phi=0^\circ$ .

**Key Words:** conformal array; mutual coupling pattern; array analysis; geese particle swarm optimization (GPSO); array pattern synthesis

共形天线阵是与载体外形平台共形的一种天线阵,它具有不破坏载体的气动外形,不加大载体雷达散射截面等优点,因而被广泛地应用于现代空间飞行器和民用通信等领域.

对于天线阵列方向图优化综合问题已多见报道<sup>[1-6]</sup>,目前常见的阵列方向图优化综合多采用天线单元在自由空间的孤立方向图,这样虽然使阵列方向图优化设计得到简化,然而由于忽略了单元间互耦的影响,其实验结果与计算结果存在一定差异.

应用标准电磁仿真软件对阵列进行全波分析能够准确计算得到天线阵列方向图特性.然而,由于软件限制,无法得到阵列三维主极化和交叉极化方向图特性.同时,由于基于载体上共形天线阵列的优化综合耗时长,一般难以直接采用优化算法进行阵列特性优化,其主要原因就是个体适应度的计算通常需要对整个天线阵列进行一次全波分析.

为了克服阵列方向图计算精度以及优化效率的问题,近年来一些研究已采用天线单元的阵中耦合方向图进行阵列方向图优化综合<sup>[7-8]</sup>,其计算结果与全波仿真分析结果吻合.然而,由于阵列极化方向图分析和综

收稿日期:2009-01-22

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:张 凡(1983-),男,西安电子科技大学博士研究生,E-mail: fanzhang@mail.xidian.edu.cn.

合的复杂性,这些研究还多限于对阵列主平面内总增益方向图的计算综合.当阵列天线与曲面共形时,各个天线单元的最大辐射方向将各自朝向不同方向,同时不同于平面阵或直线阵共形阵的极化特性,不仅仅与天线单元本身的极化特性有关,还将与所共形的曲面特性有关,因此必须对阵列的方向图特性进行综合.突破仿真软件以及目前综合方法对于阵列方向图特性计算综合的局限,准确计算天线阵列主极化和交叉极化方向图特性对于全面准确分析天线阵列电性能有着重要的意义.

基于以上原因,笔者以锥台共形阵为例,根据 Ludwig 交叉极化的第 3 定义进行阵列方向图综合.根据锥台载体表面的曲面特性,以方向图叠加原理为基础,将各个天线单元的远场电场分量进行叠加计算,计算综合阵列主极化和交叉极化方向图.通过与 Ansoft HFSS 电磁仿真软件的仿真计算结果对比,验证该计算方法的可靠性和准确性.

粒子群优化(PSO)算法最早是由 Kennedy 和 Eberhart 等于 1995 年提出的<sup>[9-10]</sup>.作为一种随机智能算法,有着收敛速度快、运算简单、易于实现的特点,但也存在易发散、容易陷入局部最优等缺点.近年来,针对 PSO 的缺点提出了雁群算法<sup>[11]</sup>,它借鉴雁群的飞行特征,对标准 PSO 提出两方面改进:一方面,将全局极值变换为按历史最优适应值排序后,其前面那个较优粒子的个体极值保持了粒子的多样性,扩大了搜索范围;另一方面,使每个粒子利用更多其他粒子的有用信息,通过个体极值加权平均,加强粒子之间的合作与竞争.笔者采用雁群优化算法进行阵列方向图优化综合,设定目标函数,使主极化方向图满足波束扫描要求的同时,抑制交叉极化电平.

## 1 阵列分析

研究发现:渐变缝隙天线的缝隙开度主要影响天线的中心频率,而渐变缝隙的长度影响着天线的带宽特性<sup>[12]</sup>.图 1 给出了所采用的渐变缝隙天线单元结构,黑色为背面微带馈线,深灰色为正面金属辐射贴片,浅灰色为中介质层.所设计的渐变缝隙天线的工作频率为 3.5 GHz.

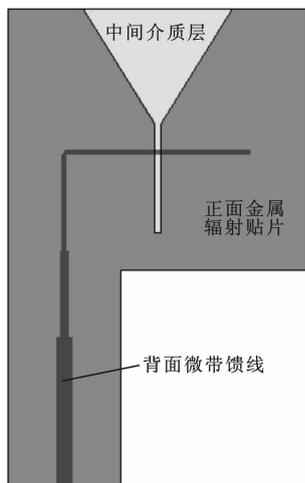


图 1 渐变缝隙天线单元结构模型图

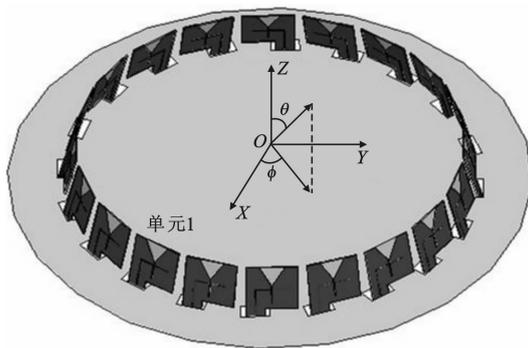


图 2 20 单元空气介质锥台共形阵列结构模型

图 2 为介质锥台共形阵列的示意图,圆形金属板上面的方形孔可使每个单元的微带馈线部分通过各自对应的方孔伸至金属板下方.图 3 给出了 20 个单元的排布示意图,其中阵列半径为  $2.3\lambda$ ,  $\lambda$  为自由空间波长.从图 3 可以看出,围绕圆心各个单元在阵中相对于其他单元的位置是等同的,那么,以单元 1 为参照,每个天线单元的阵中三维方向图均旋转相应角度.采用 Ansoft HFSS 进行阵列仿真计算,其中只对单元 1 馈电,其他天线单元均接匹配负载,仿真得到天线单元 1 的阵中三维电场场强方向图.提取单元 1 的三维场强方向图数据,为计算任意  $\phi$  方位面内的阵列主极化和交叉极化方向图,首先对单元 1 的三维方向图做切面处理.  $f_{1-z}(\theta, \phi_n)$ ,  $f_{1-x}(\theta, \phi_n)$  和  $f_{1-y}(\theta, \phi_n)$  分别为单元 1 在  $\phi_n$  切面内的电场  $E_z$ ,  $E_x$  和  $E_y$  分量二维方向图,其中  $\phi_n = (n-1) \times 360/20 + \phi$ .  $f_z(\theta, \phi)$  为在 20 单元叠加得到的阵列在  $\phi$  方位面内的电场  $E_z$  分量场强方向图.  $f_1(\theta, \phi)$ ,  $f_2(\theta, \phi)$  的电场分量方向如图 4 所示.各方向图的表达式如下:

$$f_z(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n f_{1-z}(\theta, \phi_n) \exp(jkR \cos \phi_n \sin \theta) \quad , \quad (1)$$

$$f_1(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n f_{1-x}(\theta, \phi_n) \exp(jkR \cos \phi_n \sin \theta) \cos \phi_n + \sum_{n=1}^N I_n f_{1-y}(\theta, \phi_n) \exp(jkR \cos \phi_n \sin \theta) \sin \phi_n \quad , \quad (2)$$

$$f_2(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n f_{1-y}(\theta, \phi_n) \exp(jkR \cos \phi_n \sin \theta) \cos \phi_n - \sum_{n=1}^N I_n f_{1-x}(\theta, \phi_n) \exp(jkR \cos \phi_n \sin \theta) \sin \phi_n \quad , \quad (3)$$

$$f_\theta(\theta, \phi) = f_1(\theta, \phi) + f_z(\theta, \phi) \quad , \quad (4)$$

$$f_\phi(\theta, \phi) = f_2(\theta, \phi) \quad . \quad (5)$$

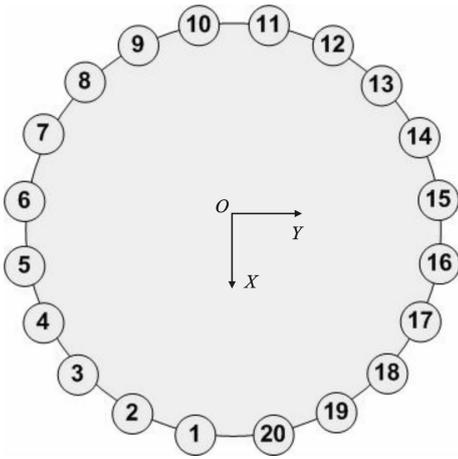


图 3 20 单元介质锥台共性阵列单元排布示意图

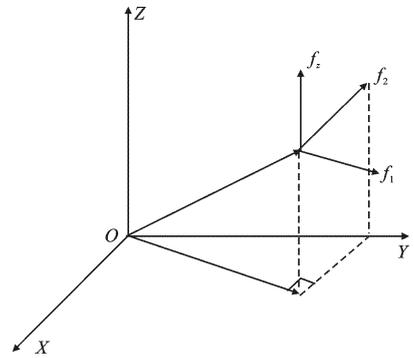


图 4 电场分量示意图

Ludwig 对于交叉极化做出了 3 种定义<sup>[13]</sup>,按照其第 3 定义式得:

$$E_{\text{Ecopolar}} = E_\theta \cos \varphi - E_\varphi \sin \varphi \quad ,$$

$$E_{\text{Ecrosspolar}} = E_\theta \sin \varphi + E_\varphi \cos \varphi \quad , \quad (6)$$

$$f_{\text{co}}(\theta, \phi) = f_\theta(\theta, \phi) \cos \phi - f_\phi(\theta, \phi) \sin \phi \quad ,$$

$$f_{\text{cross}}(\theta, \phi) = f_\theta(\theta, \phi) \sin \phi + f_\phi(\theta, \phi) \cos \phi \quad , \quad (7)$$

$$U = \sin \theta \cos \phi \quad , \quad V = \sin \theta \sin \phi \quad . \quad (8)$$

上式中  $f_{\text{co}}(\theta, \phi)$  为  $\phi$  方位面内电场主极化方向图,  $f_{\text{cross}}(\theta, \phi)$  为  $\phi$  方位面内电场交叉极化方向图.  $R$  为锥台共形阵列的排阵半径,  $I_n$  为天线单元  $n$  的激励系数, 包括激励幅值(电压)和激励相位,  $k$  为自由空间传播常数. 为验证方法的可靠性与准确性, 采用一组随机生成的馈电幅相数据进行阵列三维方向图计算. 图 5 给出了采用该方法计算得到的阵列在 3.5 GHz 频率处的主极化场强和交叉极化场强三维方向图 ( $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ). 由于 Ansoft HFSS 软件的局限, 只能直接得到主平面内的方向图极化特性. 图 6 给出了  $\phi=0^\circ$  和  $\phi=90^\circ$  方位面内阵列在 3.5 GHz 频率处的方向图特性, 其中虚线为采用 Ansoft HFSS 的仿真分析结果, 实线为采用笔者提出方法计算的结果. 通过对比可以看出, 两种方向图曲线吻合, 曲线高电平处存在误差主要是因为 Ansoft HFSS 在对天线阵列作全波分析的过程中, 难以使得各个单元的计算网格划分完全相同, 总会存在一定的差异, 而笔者所采用的叠加方法基于单元阵中的方向图, 由于各单元在阵中的地位相同, 所以阵中各单元方向图特性实际上相同. 图 6 中曲线的差异反映出 Ansoft HFSS 在进行全波仿真分析时, 网格划分对计算结果所造成的微小误差, 证实了笔者所采用的方法的可靠性与准确性.

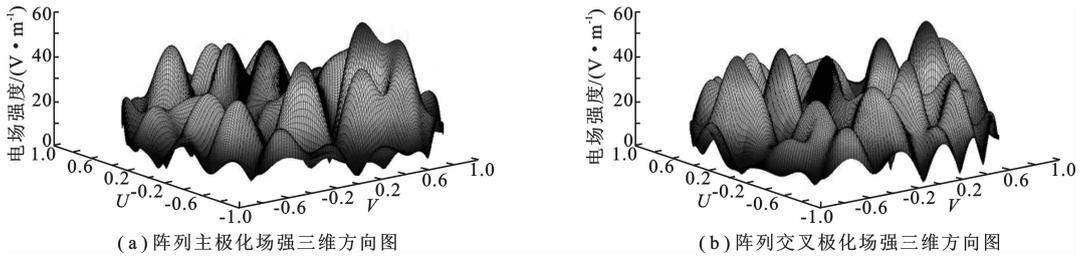


图 5 阵列场强三维方向图

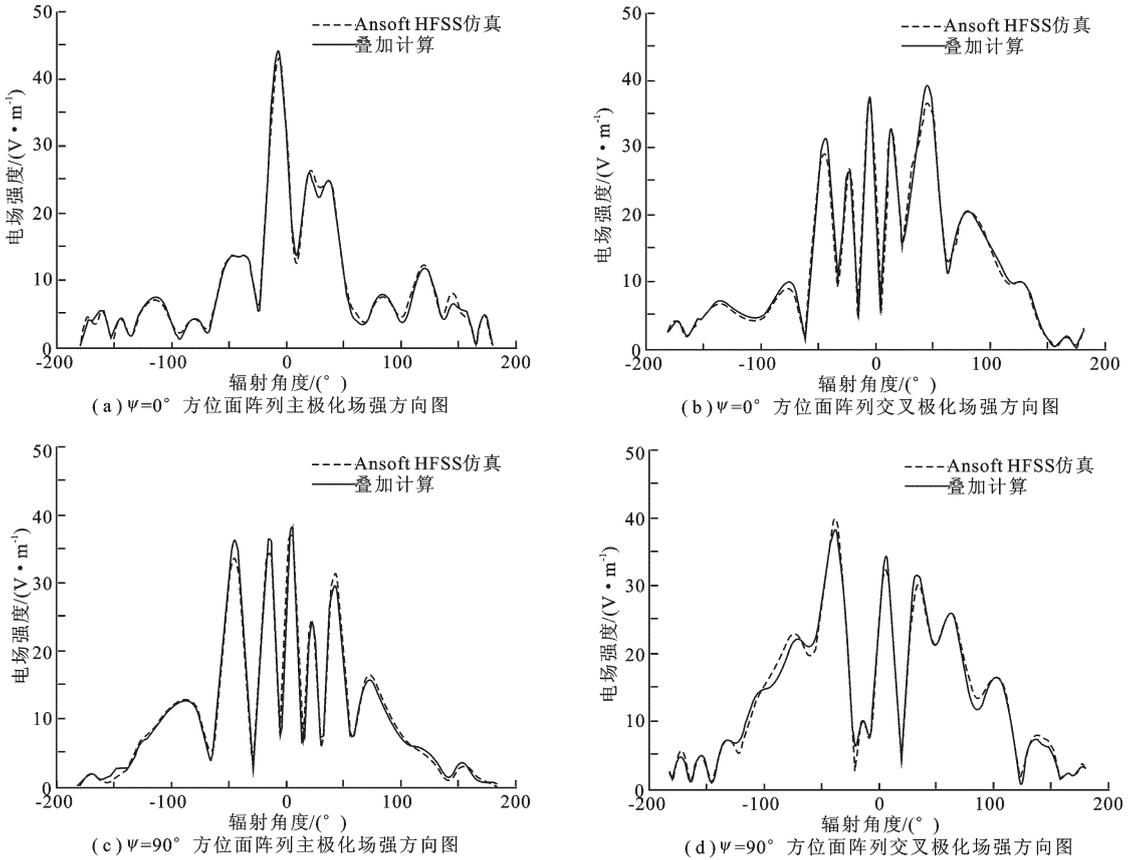


图 6 主平面内的交叉极化和主极化场强方向图

## 2 雁群算法用于阵列平面方向图优化

大雁按照历史最优适应值的优劣从前到后排队,后面每只大雁都只跟随其前面那只较优大雁飞行,也就是说,将其前面那只大雁的个体极值作为其后面那只大雁的全局极值.同时在雁群飞行过程中,认为头雁只依靠自身经验进行决策,而后面的大雁不仅要依靠自身经验(个体极值),而且要借鉴其他大雁的经验,以其当前适应值作为借鉴的权重,因为当前适应值代表了其当前状态.因此,将除了头雁之外的每只大雁的个体极值变换为其个体极值与其当前适应值的加权平均,即

$$P_a = \left( \sum_{i=1}^N p_i \times f(X_i) \right) / \left( \sum_{i=1}^N f(X_i) \right) \quad (9)$$

雁群算法的速度和位置的更新公式为

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \text{rand}(0, 1)(p_{ad} - x_{id}^k) + c_2 \text{rand}(0, 1)(p_{(t-1)d} - x_{id}^k) \quad (10)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (11)$$

其中  $p_{(i-1)d}$  为按照历史最优适应度值排序后第  $i-1$  只大雁的个体极值, 取代标准 PSO 中粒子的全局极值, 这样避免了粒子的趋同化, 保持了较好的多样性; 而采用  $p_{ad}$  来代替标准 PSO 中粒子的个体极值, 有利于加快算法的全局搜索能力以及收敛速度.  $\text{rand}(0, 1)$  表示  $[0, 1]$  之间的随机数, 采用雁群算法进行阵列方向图优化, 其设置如下:

俯仰面角度优化范围:  $-90 \leq \theta \leq 90$ ;

优化对象(个体): 幅度和相位;

$$F_{\text{dco}}(\theta) = \begin{cases} 1 & -20^\circ + s \leq \theta \leq 20^\circ + s \\ 0 & \theta \text{ 为其他值,} \end{cases} \quad s = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$$

$$F_{\text{dcross}}(\theta) = 0;$$

粒子数目: 50;

最大进化代数: 350 代;

适应度函数:  $f_{\text{fit}} = \max(F_{\text{co}}(\theta, \phi_0) - F_{\text{dco}}(\theta)) + \max(F_{\text{cross}}(\theta, \phi_0) - F_{\text{dcross}}(\theta))$ ;

$$F_{\text{co}}(\theta, \phi_0) = f_{\text{co}}(\theta, \phi_0) / \max(f_{\text{co}}(\theta, \phi_0))$$

$$F_{\text{cross}}(\theta, \phi_0) = f_{\text{cross}}(\theta, \phi_0) / \max(f_{\text{co}}(\theta, \phi_0))$$

优化单元 1 至单元 10 的馈电系数, 单元 11 至单元 20 与单元 1 至 10 的馈电系数对应关系为  $I_n = I_{21-n} \exp(\pi)$ ,  $n = 11 \sim 20$ , 即单元 11 与单元 10 的激励幅值相等, 而激励相位相差  $180^\circ$ . 这样设置一方面有利于降低阵列优化的计算量, 另一方面有利于抑制阵列的交叉极化电平和提高主极化增益. 在此设置下, 采用雁群优化算法进行阵列方向图的优化综合, 计算得到介质锥台共形阵列在波束扫描到不同角度时的各个单元的激励系数, 包括激励幅值和激励相位. 图 7 给出了  $\phi_0$  方位面内波束扫描方向图, 可以看出当波束扫描至不同角度时, 副瓣电平小于  $-21$  dB, 交叉极化电平小于  $-27$  dB. 表 1 给出了  $\phi_0$  方位面内波束扫描至不同角度时对应的单元 1 至 10 的馈电系数.

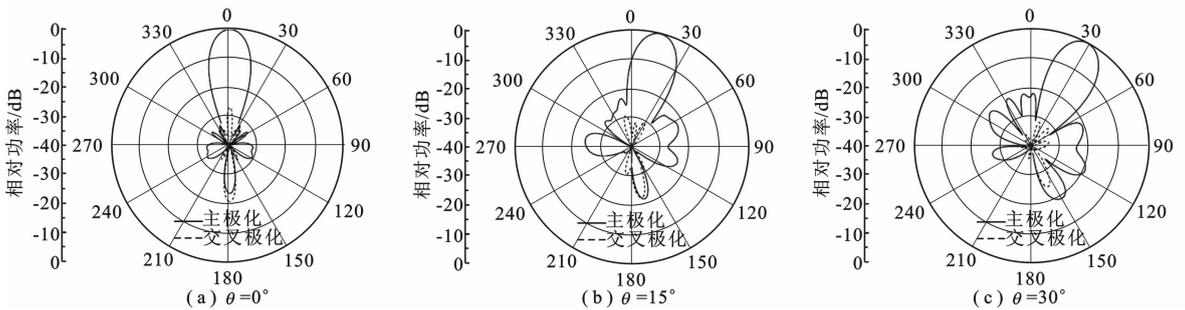


图 7 PSO 优化波束扫描至不同角度时的归一化方向图

表 1 波束扫描时激励系数

阵元	波束扫描角 $\theta=0^\circ$		波束扫描角 $\theta=15^\circ$		波束扫描角 $\theta=30^\circ$	
	激励幅度	激励相位/ $^\circ$	激励幅度	激励相位/ $^\circ$	激励幅度	激励相位/ $^\circ$
1	0.77	281.88	0.44	154.50	0.28	156.71
2	0.14	-102.96	0.31	124.02	0.39	-135.57
3	0.29	-106.67	0.33	-168.67	0.32	-42.51
4	0.40	-88.16	0.63	202.60	0.46	23.90
5	0.55	-95.68	0.68	-102.91	0.52	115.93
6	0.55	-95.68	0.63	-50.11	0.52	-158.33
7	0.40	-88.16	0.59	-24.43	0.54	-64.80
8	0.29	-106.67	0.58	41.33	0.44	31.96
9	0.14	-102.96	0.06	102.24	0.26	52.04
10	0.77	281.88	0.67	114.13	0.14	71.06

### 3 结束语

笔者尝试采用锥削缝隙天线作为介质锥台共形阵列单元,研究了采用单元阵中耦合三维方向图实现阵列主极化和交叉极化方向图的叠加计算方法.与常见采用孤立单元方向图进行阵列方向图计算的方法相比,其具有极高的准确性和可靠性.同时,由于分别计算阵列主极化和交叉极化方向图,使得对于阵列尤其是共形阵列方向图特性的分析更加全面准确,为锥台共形天线阵特性优化设计提供了方法支持.在结合此方法的基础上,采用雁群算法优化 $\phi_0$ 方位面内阵列主极化和交叉极化方向图,在实现主极化方向图波束扫描的同时,很好地抑制了交叉极化.

#### 参考文献:

- [1] 焦永昌, 杨科, 陈胜兵, 等. 粒子群优化算法用于阵列天线方向图综合设计 [J]. 电波科学学报, 2006, 21(1): 16-20.  
Jiao Yongchang, Yang Ke, Chen Shengbing, et al. Application of Particle Swarm Optimization in Antenna Array Pattern Synthesis [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(1): 16-20.
- [2] 金荣洪, 袁智皓, 耿军平, 等. 基于改进粒子群算法的天线方向图综合技术 [J]. 电波科学学报, 2006, 21(6): 873-878.  
Hong Jinrong, Yuan Zhihao, Geng Junping, et al. The Pattern Synthesis of Antennas Based on a Modified PSO Algorithm [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(6): 873-878.
- [3] Xu Z, Li H, Liu Q Z. Pattern Synthesis of Conformal Antenna Array by the Hybrid Genetic Algorithm [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2008(79): 75-90.
- [4] Pérez J R, Basterrechea J. Particle Swarms Applied to Array Synthesis and Planar Near-Field Antenna Measurements [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(2): 544-548.
- [5] Pérez J R, Basterrechea J. Particle Swarm Optimization with Tournament Selection for Linear Array Synthesis [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(3): 627-632.
- [6] Li Wentao, Liu Shufang, Shi Xiaowei, et al. Low-sidelobe Pattern Synthesis of Spherical Array Using the Hybrid Genetic Algorithm [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(6): 1487-1491.
- [7] 欧阳骏, 杨峰, 聂在平, 等. 基于遗传算法的载体上共形天线阵列优化 [J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 356-359.  
Ouyang Jun, Yang Feng, Nie Zaiping, et al. Optimizing Design of Conformal Antennas Array on Platform with GA Method [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 356-359.
- [8] Allard R J, Werner D H, Werner P L. Radiation Pattern Synthesis for Arrays of Conformal Antennas Mounted on Arbitrarily-shaped Three-dimensional Platforms Using Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2003, 51(5): 1054-1062.
- [9] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization [C]//Proc of IEEE International Conference on Neural Networks. New York: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.
- [10] Eberhart R C, Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory [C]//Proc of Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya: IEEE, 1995: 39-43.
- [11] 刘金洋, 郭茂祖, 邓超. 基于雁群启示的粒子群优化算法 [J]. 计算机科学, 2006, 33(11): 166-168.  
Liu Jinyang, Guo Maozu, Deng Chao. GeesePSO: an Efficient Improvement to Particle Swarm Optimization [J]. Computer Science, 2006, 33(11): 166-168.
- [12] Chio T H, Schaubert D H. Parameter Study and Design of Wide-Band Widescan Dual-Polarized Tapered Slot Antenna Arrays [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2000, 48(6): 879-886.
- [13] Ludwig A C. The Definition of Cross Polarization [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1973, 21(1): 116-119.