

文章编号: 1001-2486(2011)06-0084-05

考虑互耦修正的共形天线阵方向图综合研究*

赵菲, 齐会颖, 肖科, 柴舜连, 毛钧杰
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 基于建立的双层背腔微带天线共形阵模型, 提出了一种改进的互耦修正投影法, 并成功用于该类共形阵列的方向图综合。通过引入包含空间位置信息的广义阵元方向图概念, 完成了对阵元激励幅相的同步求解; 将阵元有源方向图思想与最小二乘法结合, 简化了互耦系数矩阵的提取; 综合过程计入了阵元相位方向图的贡献, 使该方法的可靠性显著提高, 阵列综合结果与全波分析结果的完全吻合, 验证了该方法的正确性。

关键词: 共形天线阵; 方向图综合; 互耦; 投影法

中图分类号: TN301 **文献标识码:** A

The Study of the Conformal Array Pattern Synthesis Including Mutual Coupling

ZHAO Fei, QI Hui-ying, XIAO Ke, CHAI Shun-lian, MAO Jun-jie

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: An improved mutual coupling modified projection method was proposed, based on the two stacked patches back cavity microstrip conformal array model. The method was applied for synthesizing the patterns of this kind of conformal array successfully. The amplitude and phase of the element exciting can be solved at one time, by means of introducing the generalized element pattern including the location information. Meanwhile, the concept of the element active pattern was combined with the least square method to simplify the solved process for mutual coupling matrix. Moreover, the phase pattern was also considered, which improved the reliability of the synthesis method. Besides, the perfect agreement between the synthesized results and full-wave method confirms the validity of the proposed method.

Key words: conformal array; pattern synthesis; mutual coupling; projection method

共形阵列天线将天线阵元安装在载体表面, 使天线表面与载体表面相贴合^[1-2]。近年来, 共形阵列天线的研究日益得到重视^[3-5], 这得益于其较传统平面阵列不仅可以增加口径面积、扩展扫描角度范围, 而且不会影响载体本身的外形设计^[2,6-7]。对于共形阵列方向图的分析与综合, 不能照搬经典平面阵列针对阵因子的综合思想, 因为对于共形阵列, 阵元不再具有相同的方向图形状以及最大值指向, 所以在辐射场的数学表达式中, 矢量单元因子和阵因子难以分离, 这不仅给共形阵列的综合带来了困难, 更使阵元间的互耦分析尤为复杂。

近几年, 随着计算机硬件性能的飞速提升, 从而使耗费计算资源较大的全局优化算法在天线阵列方向图综合中焕发新的活力: 粒子群优化算

法^[8-9]、遗传算法^[10], 以及模拟退火算法^[11]在计算资源允许的情况下, 也能被较好地用来综合共形阵列。但是这类进化迭代算法, 其收敛结果较为依赖优化算法参数的设定, 且优化过程人工干预程度较低, 对所优化的问题具有一定的盲目性。同时, 目前基于以上算法的共形阵列综合过程, 大都采用理想阵元模型, 没有考虑阵元间的互耦影响, 降低了综合方法的实用性。最近出现的优化算法, 利用了阵元有源方向图信息^[12-14], 以此计入了阵元间互耦效应, 但均避开了对互耦的直接描述和分析。

本文以双层背腔微带天线共形阵为模型, 借助电磁场全波数值分析, 完成了阵元有源方向图和孤立方向图的精确求解; 利用广义阵元方向图和平面口径投影思想, 同时获得了非互耦条件下

* 收稿日期: 2011-03-15

基金项目: 国家 863 高技术资助项目

作者简介: 赵菲(1983—), 男, 博士生。

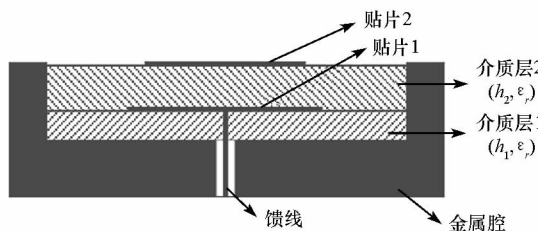
的幅相激励系数;在此基础上,采用最小二乘法简化了早期对互耦系数矩阵的提取^[15],并考虑了阵元相位方向图的影响,提高了互耦系数提取精度;最后,利用互耦系数矩阵完成了对激励系数的互耦修正。该方法目的性强,具有鲜明的物理概念,且无需进行多次迭代运算,具有较强的便捷性和实时性。

1 模型构建

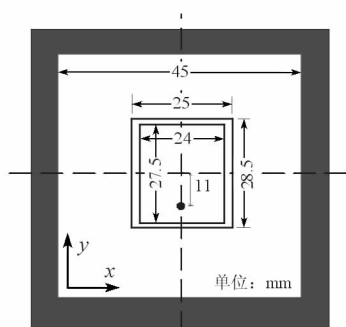
构建实际工作的共形阵列模型,用以进行互耦条件下共形阵综合算法的研究。共形阵列模型构建包括阵元设计、阵列结构设计以及阵列信息建模。

1.1 天线阵元设计

阵元采用具有低剖面、低增益适宜于构建共形阵列的微带天线形式,采取叠层贴片技术以扩展工作带宽,采用背腔结构提高表面波抑制制度,以减弱天线口径场受高次模的不规则扰动。



(a) 天线侧剖面图



(b) 天线俯视图

图1 天线侧剖面图和俯视图

Fig.1 Section view and top view of the element

经过优化设计,双层背腔微带天线结构尺寸如图1所示,下层贴片1为25 mm×28.5 mm,由同轴探针直接馈电;上层贴片2为24 mm×27.5 mm,属寄生贴片,通过一定厚度的介质层空间与下层贴片相耦合;同轴馈线在x方向贴片1中心位置,y方向(极化方向)距离贴片中心11mm;下层基板为介质层1,厚2.93mm;上层基板为介质层2,厚3.93mm,相对介电常数均为2.55;金属背腔内壁边长45mm,壁厚2.5mm,整个天线厚度不到9.5mm。

通过全波数值分析,天线驻波与增益随频率变化曲线如图2所示,天线中心工作频率为3GHz, VSWR ≤ 2, 阻抗带大于10% (2.82 ~ 3.14GHz); 3dB增益带宽达到19.3% (2.73 ~ 3.19GHz),带内最大增益仅为6.7dB。由仿真结果可知,该天线阵元具有低剖面、宽频带以及低增益的特征,适合用于构建共形阵列。

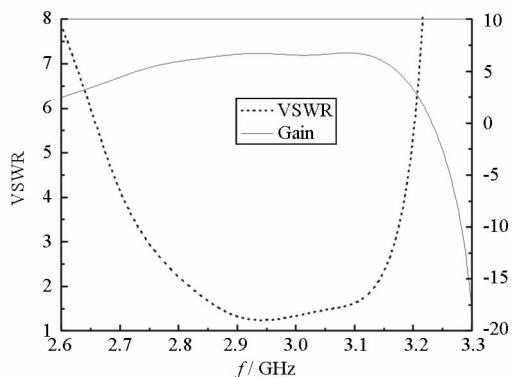


图2 天线驻波系数和增益随频率变化
Fig.2 VSWR and Gain vs. frequency

1.2 共形阵列构建

以双层背腔微带天线为阵元,构建的12元柱面共形阵列如图3所示,扇形柱面载体半径为573mm,为兼顾阵列口径张角与阵元互耦扰动,取阵元弧长间距为50mm(半个中心频点空间波长)、角度间隔为5°,则整个阵列张角为60°,高130mm。阵元从右至左依次编号为1~12,阵列两边各保留一个阵元尺度的金属边沿,以减少载体边沿绕射对边缘阵元的影响。以阵列口径面中心点O为全局坐标系原点,确定全局坐标系O-xyz,并保证z方向为阵列辐射的法线方向,y方向为阵列辐射主极化方向。

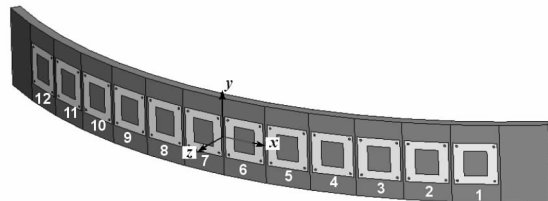


图3 12元共形阵列模型

Fig.3 Configuration of 12-element conformal array

由全波数值仿真的结果,组阵后阵元的驻波系数较孤立阵元的驻波系数有所恶化,这是由于阵元在阵列环境中受耦合效应所致,其回波不仅包含了自身端口的反射波,还包含了其他天线阵元的耦合的叠加回波。

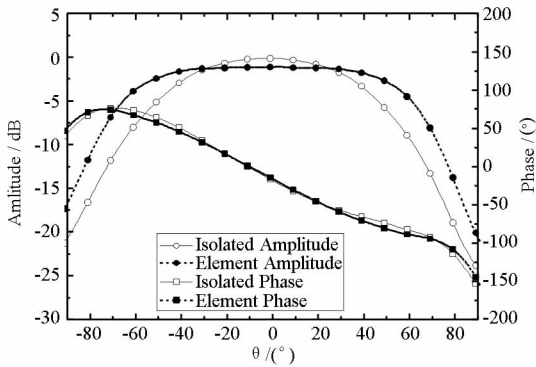
1.3 阵列信息建模

由图3可知,设全局坐标下各阵元朝向为 θ_i (

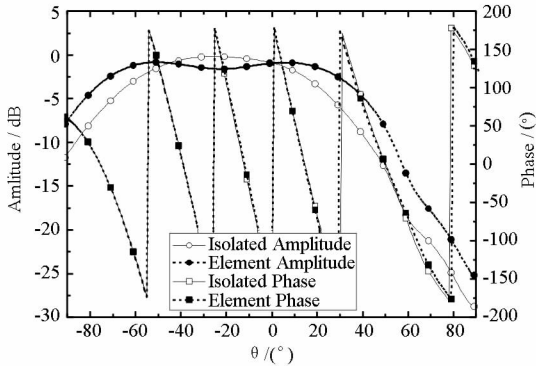
$i = 1 \sim 12$), 则各阵元场方向图为 $f_i(\theta, \varphi)$, 阵元位置坐标为 $x_i = R \sin \theta_i, z_i = R \cos \theta_i - R$ 。再由方向图叠加原理可得此圆柱面共形阵列的总场方向图为

$$\begin{aligned}
 F(\theta, \varphi) &= \sum_i w_i f_i(\theta, \varphi) e^{jk(x_i \sin \theta + z_i \cos \theta)} \\
 &= \sum_i w_i \hat{f}_i(\theta, \varphi) e^{jk \Gamma R \sin \theta \sin \theta + (R \cos \theta_i - R) \cos \theta} \\
 &= \sum_i w_i \hat{f}_i(\theta, \varphi) \tag{1}
 \end{aligned}$$

式(1)中 w_i 为阵元激励系数, $\hat{f}_i(\theta, \varphi)$ 定义为广义阵元方向图, 其不但包含了阵元本身方向图的幅相信息, 还计入了阵元空间位置相移贡献, 可直接用来叠加阵列方向图。



(a) 7#阵元幅相方向图($\varphi=0^\circ$)



(b) 11#阵元幅相方向图($\varphi=0^\circ$)

图4 7#和11#阵元幅相方向图($\varphi=0^\circ$)

Fig. 4 The amplitude-phase pattern for element 7 and 11 ($\varphi=0^\circ$)

借助 Ansoft HFSS 建立阵列模型, 并进行全波数值计算, 分别获取各个阵元在中心工作频率 3GHz, 单独存在时的广义孤立方向图(可由任一孤立方向图依次旋转得到), 以及阵列环境中其他阵元接匹配负载时的广义有源方向图, 其中 7#和 11#阵元在 $\varphi=0^\circ$ 平面的方向图如图 4 所示, 这里特别给出了阵元相位方向图曲线, 可以看出相位方向图并未表现出理想的全空间同相特征, 而只是在辐射主瓣内表现出近似的等相位性。当阵元逐渐偏离阵列中心, 其相位方向图变化斜率增大, 此为广义方向图计入空间相移后的表现。另外, 由于存在阵列环境的辐射干涉, 阵元的有源

方向图(尤其幅度)出现了明显的波动。

2 方法介绍

口径投影综合法是一种快捷的共形阵列综合方法, 传统投影法仅仅利用了阵元的孤立幅度方向图信息和载体的曲率信息, 因此只能得到激励系数的幅度值, 如果需要较精确的结果, 还要根据载体空间的投影距离进行相位修正; 另外, 传统方法没有考虑阵元间的互耦影响, 若直接采用阵元有源方向图替代阵元孤立方向图, 由于各阵元有源方向图在投影方向存在不规则波动, 这将严重影响综合结果的可靠性。本节针对上述的两个缺陷, 对投影综合法进行改进。

2.1 幅相投影综合法

根据投影综合法思想, 共形阵列的激励综合, 可以近似转化为对该阵列等效投影平面的口径综合, 如此可以继承相对成熟的平面口径综合技术, 该方法在一般共形阵列小角度扫描波束的方向图综合中能够获得较为理想的结果。具体算法过程如下。

首先, 确定待综合方向图主波束方向为阵列投影方向, 同时获得投影口径面的形状轮廓; 其次, 由目标方向图, 获得该平面的复口径场分布。最后, 由下式得到各阵元的激励系数 w_i :

$$w_i = \frac{A_i S_i}{\hat{f}_i(\theta_0, \varphi_0)} \tag{2}$$

其中, θ_0, φ_0 为投影方向, A_i 是第 i 个单元在投影点所期望的平面阵口径场幅相值, S_i 为第 i 个单元产生的投影面积, 注意到, $\hat{f}_i(\theta_0, \varphi_0)$ 是阵元广义幅相方向图在投影方向上的取值, 而不同于传统投影法中描述的阵元方向图幅度值, 由于 $\hat{f}_i(\theta_0, \varphi_0)$ 包含了阵元在载体上的空间分布信息, 因此对 w_i 不用再进行额外的投影相位修正。

2.2 互耦提取与修正

阵元有源方向图本质上为: 各阵元端口匹配时, 该阵元主动辐射, 连同其余阵元受耦合被动辐射时的阵列方向图。因此, 若各阵元间的耦合主要为主模耦合, 其口径场分布近似一致, 则阵元有源方向图可以表示为各个阵元孤立方向图的叠加, 分别定义 \mathbf{G}, \mathbf{F} 为 N 元共形阵列的广义有源方向图矩阵和广义孤立方向图矩阵, 即

$$\begin{aligned}
 \mathbf{G} &= [\hat{g}_1(\theta, \varphi) \quad \hat{g}_2(\theta, \varphi) \quad \cdots \quad \hat{g}_N(\theta, \varphi)], \\
 \mathbf{F} &= [\hat{f}_1(\theta, \varphi) \quad \hat{f}_2(\theta, \varphi) \quad \cdots \quad \hat{f}_N(\theta, \varphi)] \tag{3}
 \end{aligned}$$

其中各个阵元方向图均为同时包含幅相信息的复方向图,于是有

$$G = FC \quad (4)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1} & \cdots & \cdots & c_{NN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

定义 C 为 N 阶互耦系数方阵,其中 c_{mn} 表征第 m 个阵元对第 n 个阵元的有源方向图的耦合贡献,或第 m 个阵元对自身的贡献。对于无源阵列,互耦系数矩阵具有互异性,即 $c_{mn} = c_{nm}$ 。式(4)表示了阵元有源方向图、孤立方向图和互耦系数之间的关系,其在每个空间抽样点均对应一个 N 元线性方程,当 G, F 已知,待求矩阵 C 应为 $\min \|FC - G\|_2$ 条件下的最小二乘解:

$$C = (F^H F)^{-1} F^H G \quad (6)$$

为保证求解精度,一般空间抽样点数为阵元数目的 30 ~ 50 倍。

将由式(2)得到的不计互耦影响的阵元激励系数定义为

$$W = [w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_N]^T \quad (7)$$

则共形阵列方向图由式(4)和式(7)可以表示为

$$F_{array} = FW = GC^{-1}W \quad (8)$$

上式中的 $C^{-1}W$ 运算即代表对原激励系数的互耦修正操作。

3 计算结果

用图3所示12元共形阵列模型来验证算法的正确性,阵列工作在3.0GHz,方向图综合目标为最大副瓣低于-35dB的笔形波束。首先,要综合出不计互耦条件下的共形阵列复激励系数。确定该共形阵列的投影口径为573mm的理想直线源,根据综合目标,选择该投影口径为适于实现低副瓣的Taylor线源分布,并令其最大副瓣为-35dB、不变零点数为5,再将经全波数值分析得到的阵元广义孤立幅相方向图带入式(2),便得到各阵元初始激励分布。

其次,将所有阵元有源方向图和孤立方向图带入式(6),计算得到该共形阵列的12阶互耦系数矩阵,其中 c_{n7} 和 c_{n11} 的幅相值如图5所示,其描述了各阵元分别对7#阵元和11#阵元的互耦和自耦贡献,可以发现:1)阵元的自耦辐射对其有源方向图为主要贡献;2)相邻阵元间互耦最强,阵元互耦影响随间距增大而减弱;3)阵元间互耦因子的相位变化基本正比于阵元空间距离,这表

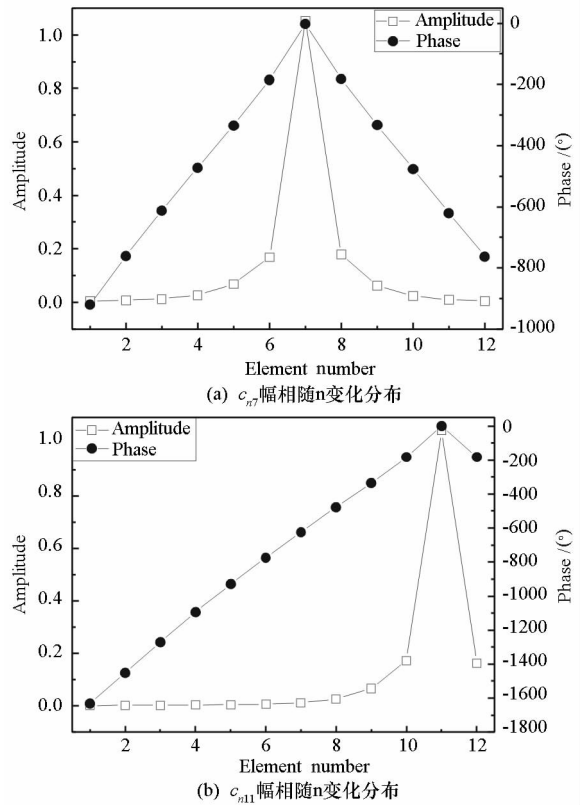


图5 C_{n7} 和 C_{n11} 幅相随 n 变化分布

Fig.5 The variation of amplitude and phase for C_{n7} and C_{n11} 明阵元间的互耦主要是通过电磁场的空间耦合而作用。

最后,由计算得到的互耦系数矩阵完成对阵元初始激励系数的互耦修正。修正前后的激励系数如表1所示,通过对比发现,阵元间对激励系数幅度的互耦扰动要明显强于相位扰动,并且对小激励系数阵元的影响要大于大激励系数阵元,对于锥削口径分布阵列,这一影响将直接导致所综合方向图副瓣的抬升。

表1 阵元激励系数

Tab.1 The excitation coefficients for elements

阵元 编号	互耦修正前		互耦修正后	
	幅度	相位/(°)	幅度	相位/(°)
1 与 12	0.1826	-111.95	0.1588	-120.20
2 与 11	0.3067	170.97	0.2676	168.48
3 与 10	0.5006	110.13	0.4674	109.04
4 与 9	0.7073	64.26	0.6884	64.14
5 与 8	0.8912	33.43	0.8771	34.83
6 与 7	1.0000	18.37	1.0000	19.12

图6给出了分别采用互耦修正前后激励系数所得到的阵列方向图,都表现出了低副瓣特征,体现了幅相投影综合方法的有效性,但未经互耦修正的方向图最大副瓣为-31.2dB,距离目标值相差近4dB,而经互耦修正后,其最大副瓣达到

-34.8dB,非常接近期望目标。为进一步检验经互耦修正后幅相投影综合方法的准确性,图中还给出了用 HFSS 对阵列全波仿真的结果,可以发现两条曲线完全重合,证明了综合结果是精确可信的。综合方法中强调要计入阵元相位方向图的影响,图7显示了仅用阵元幅度方向图进行综合和采用该激励系数进行全波仿真结果,虽然综合结果满足了目标要求,但是并未与仿真结果达到图6所示的高度吻合,仿真结果明显出现了恶化,其最大副瓣仅为-32.2dB,这无疑是由于阵元信息的不完备造成的,这种常被忽略的恶化在诸如此类目标苛刻的方向图综合中,将表现得相对明显。

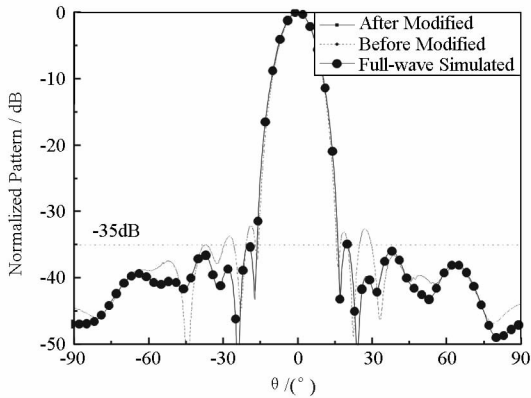


图6 互耦修正前后阵列方向图综合结果对比
Fig.6 The array patterns before and after modified

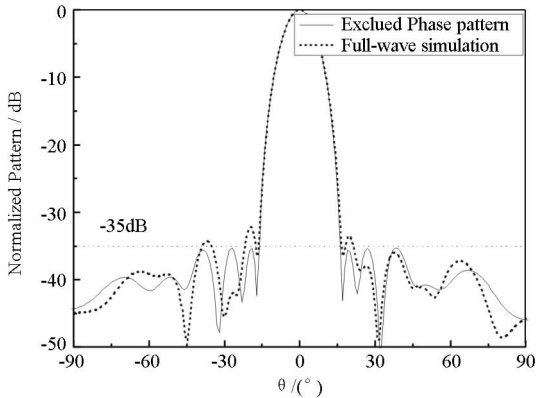


图7 忽略单元相位方向图综合结果
Fig.7 The array patterns excluding element phase pattern

4 结论

本文针对存在互耦条件下共形阵列方向图的综合问题,提出了一种改进的口径投影综合方法。在传统投影法的基础上,引入广义阵元方向图概念,能够一次性完成阵元激励系数的幅相求解。并且通过全波数值分析获得阵元孤立、有源方向图,采用最小二乘法简化了早期对互耦系数矩阵的提取。通过该矩阵对综合结果的修正,可以很好地消除因阵元互耦引起的方向图恶化。借助双

层背腔微带天线圆柱共形阵的全波数值分析,验证了该综合方法和互耦修正措施的有效性,同时全波分析结果表明:将阵元相位方向图计入综合过程,即使在苛刻的方向图综合指标下,仍能保证很高的精度。该方法物理概念明晰,快速便捷,避免了其他优化算法数百上千次的迭代运算,并且可以有效继承直线阵、平面阵成熟的综合方法,简化共形阵列的综合难度,该方法非常适合于大型天线阵列波束的实时综合。

参考文献:

- [1] Wong K. Design of Nonplanar Microstrip Antennas and Transmission [M]. New York: A Wiley-interscience publication, 1999, 1-3.
- [2] Josefsson L, Persson P. Conformal Array Antenna Theory and Design [M]. New York: A Wiley-interscience Publication, 2006, 1-6.
- [3] Wang B H, Guo Y, Wang Y L, et al. Frequency-invariant Pattern Synthesis of Conformal Array Antenna with Low Cross-polarisation[J]. IET Microw. Antennas Propag, 2008, 2(5): 442-450.
- [4] He Q, Wang B, Shao W. Radiation Pattern Calculation for Arbitrary Conformal Arrays that Include Mutual-coupling Effects [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2010, 52(2): 57-63.
- [5] 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(04): 331-336.
- [6] Maillou R J. Phased Array Antenna Handbook [M]. Boston and London: Artech House Artech House Antennas and Propagation Library, 2007.
- [7] 柴舜连. 毫米波介质共形顶相控阵研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 1998.
- [8] Boeringer D W, Werner D H. Efficiency-constrained Particle Swarm Optimization of a Modified Bernstein Polynomial for Conformal Array Excitation Amplitude Synthesis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2005, 53(8): 2662-2673.
- [9] 李文涛, 黑永强, 史小卫. 增强粒子群优化算法设计共形可重构天线阵[J]. 电波科学学报. 2010(03): 477-484.
- [10] 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 Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(5): 1054-1062.
- [11] Ferreira J A, Ares F. Pattern Synthesis of Conformal Arrays by the Simulated Annealing Technique [J]. Electronics Letters. 1997, 33(14): 1187-1189.
- [12] Li W, Liu S, Shi X, 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.
- [13] Li W, Hei Y, Shi X, et al. An Extended Particle Swarm Optimization Algorithm for Pattern Synthesis of Conformal Phased Arrays [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2010, 20(2): 190-199.
- [14] 欧阳骏, 杨峰, 聂在平, 等. 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.
- [15] Kojima N, Hariu K, Chiba I. Low Sidelobe Pattern Synthesis Using Projection Method with Mutual Coupling Compensation [C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2003: 559-564.