

文章编号:1004-9037(2014)03-0415-06

基于 MOPSO 算法的卫星共形阵列天线多波束形成

李海林¹ 周建江¹ 谭 静² 汪 飞¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院,南京,210016; 2. 南京航空航天大学金城学院,南京,211156)

摘要:针对共形阵列天线多波束方向图综合问题,提出一种基于最大方向性系数方法得到初始非劣解的多目标粒子群算法,求解满足多个期望波束和低副瓣要求的 Pareto 最优解。算法首先采用多目标分解策略,由多个单波束最优解的加权线性组合得到近最优解的非劣解。然后结合该非劣解,基于粒子空间和目标空间同时约束的局部搜寻策略,使用多目标粒子群算法优化多个波束,并降低副瓣。仿真结果表明,该算法有效地实现了卫星共形阵列天线的多波束形成和低副瓣,且能快速得到 Pareto 最优解分布。

关键词:共形阵列天线;多波束;多目标粒子群算法;多目标分解

中图分类号:TN828.5

文献标识码:A

Multi-beam Forming of Satellite Conformal Array Antenna Based on Multi-objective Particle Swarm Optimization

Li Hailin¹, Zhou Jianjiang¹, Tan Jing², Wang Fei¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of
Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;
2. Nanhang Jincheng College, Nanjing, 211156, China)

Abstract: A multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) with an initial non-inferior solution from maximizing directivities of conformal antenna array is proposed to get Pareto optimal solutions for desired multi-beam and low sidelobes. The proposed algorithm first uses multi-objective decomposition strategy to get a non-inferior solution by the weighted linear combination of multiple single-beam optimal solution. Then, the local search strategy based on the particle space and target space constraints at the same time in MOPSO is designed to achieve optimization of multi-beam and sidelobes. Results indicate that the approach can effectively get Pareto optimal solutions for multi-beam forming with low sidelobes of the satellite conformal array antenna.

Key words: conformal array antenna; multi-beam; multi-objective particle swarm optimization; multi-objective decomposition

引 言

微小卫星具有质量轻、体积小、研制周期短、轨道低、发射容易等特点,近年来得到迅速发展。低轨微小卫星与地球同步轨道卫星相比,覆盖相同区域,其下视角要宽得多。为了保证卫星对地覆盖范围,提高天线工作效率,卫星天线可采用多波束天线,其

空间方向图由多个波束组成。多波束天线按照其结构分为反射面天线、透镜天线和直接辐射阵列天线3类,其中采用微波集成电路的阵列天线具有快速改变波束覆盖形状和切换波束指向等优点,成为微小卫星有效载荷中发展很快的一项关键技术。目前,低轨星载阵列天线以平面阵列天线为主。文献[1]研究用61单元平面阵列形成16波束实现了发射波束“等通量”覆盖。文献[2]给出了双区域多波

基金项目:国家自然科学基金(61371170)资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金(NJ20140010)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目;雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室(南京航空航天大学)资助项目。

收稿日期:2012-05-02;**修订日期:**2012-09-20

束平面阵列天线的设计实例。文献[3]应用遗传算法来设计低轨卫星的多波束方向图,覆盖整个欧洲。相对平面阵列天线,与卫星表面共形的阵列天线无需改变载体外形设计,扫描范围大,符合低轨卫星宽覆盖角的要求。国内外已经开展了四面体结构^[4]、弧形结构^[5]、半球结构^[6]、球柱组合结构^[7]等共形阵列天线设计和遗传算法^[8]、粒子群算法^[9]等波束形成方法研究。多波束形成要求阵列天线在给定的多个方向上实现指定波束,是一个多目标优化问题。在处理多个目标同时优化问题时,最简单直接的方法是将优化的所有子目标聚集成单个目标,但是这种方法在聚集函数呈线性时,难以搜索到非凸解。近年来,依靠群体进化来实现分布搜索,并按照 Pareto 最优进行选择操作的多目标进化算法成为研究热点,代表性的算法有 NSGA-II^[10]、多目标粒子群算法等。这些算法将进化群体按支配关系分为若干层,构造 Pareto 最优解集来实现多目标的优化。粒子群算法是 1995 年 Kennedy 和 Eberhart 模仿鸟群搜索食物行为而提出的一种优化算法,其改进算法得到广泛应用^[11-13]。1999 年 Moore 等提出了多目标粒子群 (Multi-objective particle swarm optimization, MOPSO) 算法^[14],引入粒子群算法解决多目标优化问题,之后各种 MOPSO 算法以及应用^[15-16]成为多目标优化的研究热点。为开展卫星共形阵列天线的设计和工程应用,本文以某微小卫星几何模型为载体,设计 Ku 波段的六面体共形阵列天线,提出了一种基于最大方向性系数方法得到初始非劣解的多目标粒子群算法实现低副瓣电平的多波束形成。

1 多波束形成的目标

共形阵列天线的远场方向图函数可以表示为

$$\mathbf{E}(\varphi, \theta) =$$

$$\sum_{p=1}^N \omega_p^* \gamma e^{jK\mathbf{r}_p \cdot \hat{\mathbf{u}}} [f_{1\varphi}(\varphi, \theta) \hat{\mathbf{u}}_\varphi + f_{1\theta}(\varphi, \theta) \hat{\mathbf{u}}_\theta] \quad (1)$$

式中: $\hat{\mathbf{u}}$ 为辐射/接收方向, $K = 2\pi/\lambda$ 为自由空间传播系数, N 为天线单元总数; 原点到第 p 个天线单元的距离为 \mathbf{r}_p , 方向矢量为 \mathbf{r}_p ; 第 p 个天线单元在 $\hat{\mathbf{u}}_\varphi, \hat{\mathbf{u}}_\theta$ 方向上的方向性函数为 $f_{1\varphi}(\cdot), f_{1\theta}(\cdot)$, 激励为 ω_p 。

定义 N 维矢量 \mathbf{W} 为激励权系数矢量

$$\mathbf{W} = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \cdots \quad \omega_N]^T \quad (2)$$

N 维矢量 \mathbf{B}_φ 和 \mathbf{B}_θ 为

$$\mathbf{B}_\varphi = \begin{bmatrix} e^{jK\mathbf{r}_1 \cdot \hat{\mathbf{u}}} f_{1\varphi}(\varphi, \theta) \\ e^{jK\mathbf{r}_2 \cdot \hat{\mathbf{u}}} f_{2\varphi}(\varphi, \theta) \\ \vdots \\ e^{jK\mathbf{r}_N \cdot \hat{\mathbf{u}}} f_{N\varphi}(\varphi, \theta) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_\theta = \begin{bmatrix} e^{jK\mathbf{r}_1 \cdot \hat{\mathbf{u}}} f_{1\theta}(\varphi, \theta) \\ e^{jK\mathbf{r}_2 \cdot \hat{\mathbf{u}}} f_{2\theta}(\varphi, \theta) \\ \vdots \\ e^{jK\mathbf{r}_N \cdot \hat{\mathbf{u}}} f_{N\theta}(\varphi, \theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

则远场方向图函数的矩阵形式为

$$\mathbf{E}(\varphi, \theta) = \mathbf{E}_\varphi(\varphi, \theta) \mathbf{u}_\varphi + \mathbf{E}_\theta(\varphi, \theta) \mathbf{u}_\theta = (\mathbf{W}^H \mathbf{B}_\varphi) \mathbf{u}_\varphi + (\mathbf{W}^H \mathbf{B}_\theta) \hat{\mathbf{u}}_\theta \quad (4)$$

且 $\mathbf{E}_\varphi(\varphi, \theta), \mathbf{E}_\theta(\varphi, \theta)$ 分别为 $\hat{\mathbf{u}}_\varphi, \hat{\mathbf{u}}_\theta$ 方向上的极化方向图函数。阵列天线采用线极化方式, $\hat{\mathbf{u}}_\theta$ 方向为主极化。则主极化的方向性系数为

$$D_{M\theta} = \frac{|\mathbf{E}_\theta(\varphi_M, \theta_M)|^2}{\mathbf{W}^H \mathbf{C} \mathbf{W}} = \frac{\mathbf{W}^H \mathbf{B}_{M\theta} \mathbf{B}_{M\theta}^H \mathbf{W}}{\mathbf{W}^H \mathbf{C} \mathbf{W}} \quad (5)$$

式中: φ_M, θ_M 是给定方向 $\hat{\mathbf{u}}_M$ 的方位角和俯仰角。其中 $N \times N$ 维矩阵

$$\mathbf{C} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (\mathbf{B}_\varphi \mathbf{B}_\varphi^H + \mathbf{B}_\theta \mathbf{B}_\theta^H) \sin\theta d\theta d\varphi \quad (6)$$

式中: $\mathbf{B}_\varphi, \mathbf{B}_\theta$ 为 θ, φ 的函数, 不能提取到积分外部。

定义第 j 个副瓣区域 Ω_j 的平均副瓣功率 P_j 为

$$P_j = \mathbf{W}^H \left[\frac{1}{S_j} \iint_{\Omega_j} \mathbf{B}_\theta \mathbf{B}_\theta^H \sin\theta d\theta d\varphi \right] \mathbf{W} \quad (7)$$

式中: S_j 是第 j 个副瓣区域 Ω_j 的面积。

所以满足低副瓣的共形阵列天线多波束方向图综合可以表述为下列数学问题: 求解最佳激励权系数矢量 \mathbf{W} , 满足

$$\min |D_1 - L_1|, \cdots, |D_i - L_i|, \cdots, |D_I - L_I| \quad (8)$$

$$\min P_1, \cdots, P_j, \cdots, P_J \quad (9)$$

式中: $D_i, L_i, (i=1, \cdots, I)$ 分别表示阵列天线在第 i 个波束方向上方向性系数的实际值和期望值, 两者的差值应该越小越好; $P_j, (j=1, \cdots, J)$ 表示第 j 个副瓣区域 Ω_j 的平均副瓣功率, 要求越小越好。可以看出, 该多波束形成是一个 $(I+J)$ 维目标同时优化的问题。

2 多波束形成算法

2.1 多目标分解策略

对于解决多目标优化问题, 理想情况是在整个 Pareto 前沿上找到尽可能多的非劣解。文献[17]提出了一种新的多目标分解进化思想, 引入数学规划的分解方法, 将多目标问题分解为多个单目标子问题, 每个子问题的最优解即为多目标问题的一个非劣解。本文将低副瓣多波束方向图综合问题分解成为多波束优化和低副瓣优化两个子问题, 即式(8)的 I 维优化子问题和式(9)的 J 维优化子问题。

多波束优化子问题又可以进一步分解为 I 个单波束形成的子问题。

阵列天线要在给定 \hat{u}_M 方向上产生单波束,即求最佳的权系数矢量 \mathbf{W}_B ,使得方向性系数 $D_{M\theta}$ 最大。用数学公式表示为

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{W}^H \mathbf{C} \mathbf{W} \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{W}^H \mathbf{B}_{M\theta} \mathbf{B}_{M\theta}^H \mathbf{W} = 1 \end{aligned} \quad (10)$$

利用拉格朗日乘数法。定义价值函数

$$F = \mathbf{W}^H \mathbf{C} \mathbf{W} + \lambda [\mathbf{W}^H \mathbf{B}_{M\theta} - 1] \quad (11)$$

可以求得最佳权系数矢量

$$\mathbf{W}_B = [\mathbf{B}_{M\theta}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B}_{M\theta}]^{-1} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B}_{M\theta} \quad (12)$$

式中 $[\cdot]^{-1}$ 为求逆运算。

对于 I 个单波束的最优解,本文采用简单易行的线性加权法进行多目标综合。若指定方向 $\hat{u}_1, \dots, \hat{u}_I$ 上分别产生单波束的最优权值 $\mathbf{W}_1, \dots, \mathbf{W}_I$, 其中第 i 个权系数矢量满足

$$\mathbf{W}_i = [\mathbf{B}_{i\theta}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B}_{i\theta}]^{-1} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B}_{i\theta}, \mathbf{W}_i^H \mathbf{B}_{i\theta} = 1 \quad (13)$$

构造权系数矢量

$$\mathbf{W} = L_1 \cdot \mathbf{W}_1 + \dots + L_I \cdot \mathbf{W}_I \quad (14)$$

可以得到多波束优化子问题的非劣解。此时,在指定方向 \hat{u}_i 上方向图函数满足

$$E_\theta(\varphi_i, \theta_i) = \mathbf{W}^H \mathbf{B}_{i\theta} =$$

$$L_1 \cdot \mathbf{W}_1^H \mathbf{B}_{1\theta} + \dots + L_i + \dots + L_I \cdot \mathbf{W}_I^H \mathbf{B}_{i\theta} \quad (15)$$

当阵列天线的方向图在多个方向 $\hat{u}_1, \dots, \hat{u}_I$ 上相关性较小时,也就是满足

$$\mathbf{W}_j^H \mathbf{B}_{i\theta} \approx 0, i \neq j \quad (16)$$

可以得到单波束最优解的线性加权和就是多波束优化子问题的非劣解,式(15)简化为

$$E_\theta(\varphi_i, \theta_i) = \mathbf{W}^H \mathbf{B}_{i\theta} = L_i \quad (17)$$

这里 L_i 正是在指定方向 \hat{u}_i 上的波束期望值。所以在进行多波束形成时,选择多个指定方向使得它们方向图之间的空间相关性尽量的小,即不完全满足这个条件,用上述分解策略求得的非劣解理论上离 Pareto 最优解也是最接近的,它加快了算法的收敛速度。

2.2 局部搜寻策略

低副瓣多波束形成中多波束子问题是主要约束,低副瓣子问题是次要约束,所以不需要得到式(8)和式(9)所表示优化问题的整个 Pareto 最优边界,它是一个求局部最优解的问题。通过多目标分解策略获得的接近 Pareto 最优解的非劣解,使得共形阵列天线的方向图基本满足多波束的要求,本文采用局部搜寻策略,在一定范围保持粒子群体的分布性和多样性,求解满足低副瓣要求的 Pareto

最优解集。具体策略包含:(1)以式(14)得到的非劣解为参考值,设置粒子最大游动范围 ω_m 在此非劣解周围产生初始种群;(2)采用文献[15]的自适应网格机制来记录外部比较集,并将比较集的目标函数空间均匀地划分为等间隔的网格,用锦标赛法替换劣解,保持非劣解的分布性。在多波束形成过程中,低副瓣约束将导致指定方向 \hat{u}_i 上的波束期望值 L_i 的减小,所以比较集的目标函数空间中,要求 $|D_i - L_i| \leq L_{\max}$,体现了低副瓣不应该使得多波束性能下降太大。

2.3 算法流程

针对低副瓣多波束形成优化问题,本文提出的 MOPSO 算法具体步骤如下:

- (1) 设置共形阵列天线中所有天线单元位置、指向和方向性函数。
- (2) 设定 I 个多波束的方向和期望值,设定副瓣区域。
- (3) 由多目标分解策略计算多波束优化子问题的非劣解。
- (4) 初始化粒子群的种群规模、最大迭代数、比较集的规模、粒子最大游动范围 ω_m 、目标空间最大范围 L_{\max} 等;由局部搜寻策略初始化粒子种群的位置,设置比较集的目标函数空间;随机初始化粒子种群的速度。
- (5) 计算初始种群中每个粒子的目标函数,初始化每个粒子的历史最优解、种群的最优解和外部比较集。
- (6) 更新粒子的速度和位置。
- (7) 计算每个粒子的目标函数,更新每个粒子的历史最优解和种群的最优解。
- (8) 锦标赛法更新外部比较集。
- (9) 如果满足终止条件,退出迭代;否则,返回第(6)步。

3 仿真结果

如图 1 所示,与某微小卫星顶端表面共形的阵列天线由 276 个天线单元组成,天线单元工作在 Ku 波段,布置在 6 个三角面中,单元间隔为 $\lambda/2$ 。考虑几何外形遮挡的情况,矩形中有“点”的表示工作天线单元。

用本文方法实现低副瓣双波束方向图综合,第一波束和第二波束的方位角和俯仰角分别为 $(60^\circ, 60^\circ)$ 和 $(180^\circ, 80^\circ)$ 。MOPSO 具体参数设置见表 1,且粒子维数为阵列天线工作单元总数的两

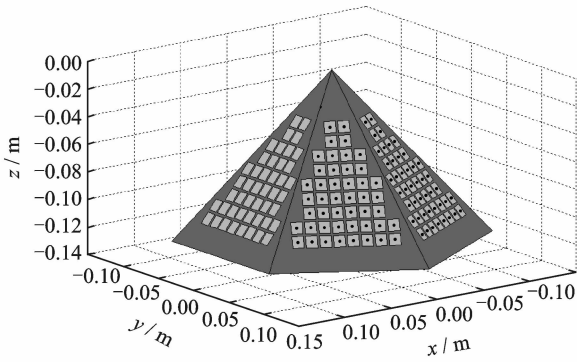


图 1 卫星共形阵列天线的几何结构

Fig. 1 Geometry of satellite antenna array

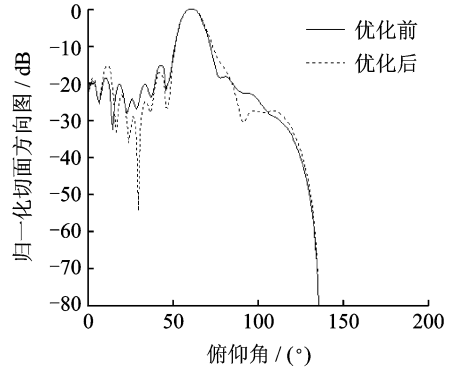


图 3 低副瓣优化前后的切面方向图对比

Fig. 3 Low sidelobe pattern before and after optimization

倍,分别用来表示天线单元的激励的实部和虚部,归一化波束期望功率值 $L_1 = L_2 = 0$ dB,要求降低靠近主波束的副瓣水平。

表 1 两种 MOPSO 算法的参数设置

Table 1 Parameter settings of two MOPSO algorithms

算法	粒子群规模	比较集规模	学习因子 c_1, c_2	惯性因子	迭代次数	L_{max}/ω_m	L_{max}/ω_m / dB
MOPSO ^[15]	100	300	1.496 20.729 8	300	无	无	
本文 MOPSO	100	300	1.496 20.729 8	300	0.2	3	

图 2 中,在指定的两个角度出现了归一化功率为 0 dB 的最大波束,满足多波束子问题的目标。图 3 给出了方位角为 60°时的切面方向图在低副瓣优化前后的对比情况,进行局部搜寻策略后的方向图与比多目标分解策略得到的方向图相比,副瓣整体水平得到了下降,43°处的第一副瓣降低 2 dB,满足低副瓣子问题的约束目标,但是出现了 80°附近主瓣加宽以及 10°处的第 5 副瓣增大现象,这是由于归一化方向图中,约束区域功率降低使得其邻近区域功率增大而造成的,方向图综合问题本身就是在多个求解目标之间进行折衷。

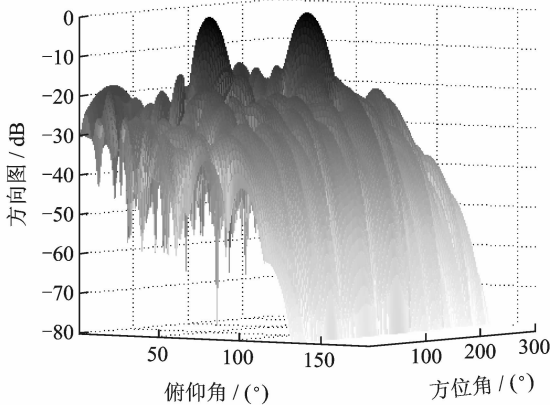


图 2 双波束低副瓣方向图

Fig. 2 Dual-beam low sidelobe pattern

图 4 给出了 MOPSO 算法^[15]、改进 MOPSO 算法(与前一算法相比包含 $L_{max} = 3$ dB 约束条件)、本文 MOPSO 算法得到的 Pareto 解分布,可以看出,本文的 MOPSO 算法得到的 Pareto 解分布要优于其他两种算法。MOPSO 算法包含 $L_{max} = 3$ dB 约束条件,使目标空间变小,粒子种群能更逼近最优解,但和本文 MOPSO 算法相比,其方向性系数未能取得最优解。由于本文 MOPSO 算法采用多目标分解策略,得到接近 Pareto 最优解的偏好信息来加快 MOPSO 算法的收敛,所以相对其他两种 MOPSO 算法,在相同的迭代次数条件下能得到更佳的 Pareto 最优解分布。

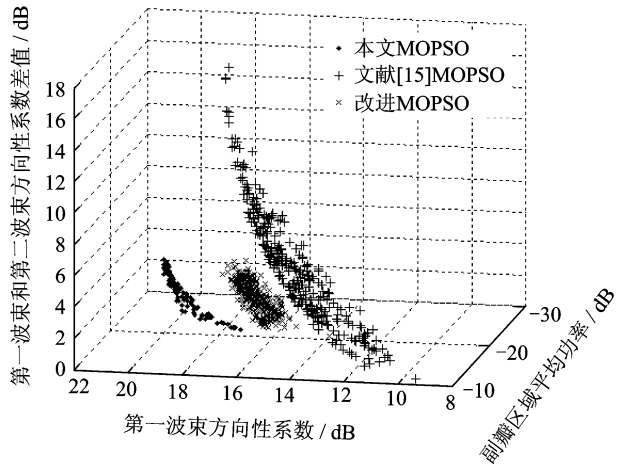


图 4 3 种 MOPSO 算法的 Pareto 解分布

Fig. 4 Pareto solution of three kinds of MOPSO

图 5 给出了用 8 个波束形成在形成区域覆盖的方向图优化结果,8 个波束的方位角分别为 30°, 40°, 50°, 60°, 俯仰角分别为 55°, 65°。可以看出,在给定区域形成了满足要求的矩形方向图,整个区域的主瓣拓展到俯仰角 50°和 80°,最大副瓣 -13 dB。

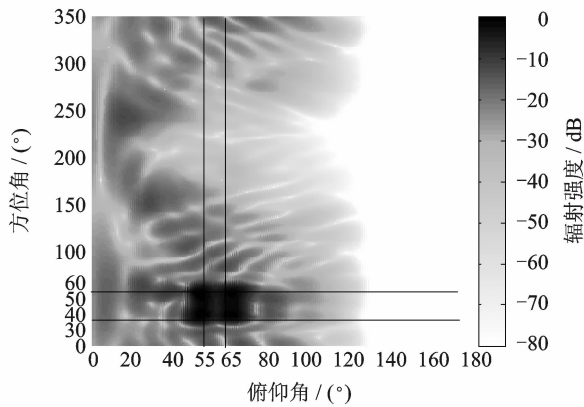


图5 多波束区域方向图

Fig. 5 Multibeam pattern

4 结束语

为了实现共形阵列天线的多波束方向图,本文首先推导了共形阵列天线中低副瓣多波束形成问题的数学表示。然后,利用多目标分解策略得到阵列天线激励幅度和相位的初始解,该策略利用最大方向性系数法求解单波束方向图综合的最优解,将多波束优化问题划分为多个单波束问题的线性组合,从而得到共形阵列天线多波束形成的一个非劣解。基于此非劣解,采用带有局部搜寻策略的MOPSO算法进行多波束和低副瓣的进一步优化,得到 Pareto 最优解分布。卫星阵列天线多波束形成的仿真结果表明,该方法能有效地实现低副瓣多波束的形成,收敛性好。

参考文献:

[1] 梁广,龚文斌,刘会杰,等.新型星载多波束相控阵天线分布式数字波束成形网络设计与实现[J].航空学报,2010,31(7):1417-1425.
Liang Guang, Gong Wenbin, Liu Huijie, et al. Design and implementation of distributed digital beam forming network for new-style satellite-borne phased array antenna[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(7): 1417-1425.

[2] 段玉虎.星载多波束天线设计[J].飞行器测控学报,2011,31(7):16-21.
Duan Yuhu. Design of multi-beam satellite antennas [J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2011, 31(7): 16-21.

[3] Vipiana F, Valitutti A, Vecchi G, et al. Multi-level antenna pattern representation for the synthesis of multi-beam coverage[J]. 2005 IEEE Antennas and

Propagation Society International Symposium, 2005, 2B: 279-282.

[4] Vasylychenko A, Farserotu J F, Brebels S, et al. Scalable conformal array for multi-gigabit body centric wireless communication[C]// Proceeding of Medical Information & Communication Technology (IS-MICT), 5th International Symposium on Medical Information and Communication Technology. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2011: 74-78.

[5] Wincza K, Gruszczynski S, Sachse K. Conformal four-beam antenna arrays with reduced sidelobes[J]. Electronics Letters, 2008, 44(3): 174-175.

[6] 欧阳骏.共形天线及阵列的分析和综合研究[D].成都:电子科技大学,2008.
Ouyang Jun. Analysis and synthesis of conformal antenna and array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2008.

[7] Ahn H, Tomasic B, Liu S. Digital beamforming in a large conformal phased array antenna for satellite operations support-architecture, design, and development[C]// Proceeding of IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 423-431.

[8] 路占波,孙丹,陈亚军.遗传算法在共形天线阵方向图综合中的应用[J].系统仿真学报,2009,21(5):1488-1491.
Lu Zhanbo, Sun Dan, Chen Yajun. Application of genetic algorithm to conformal antenna array pattern synthesis[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(5): 1488-1491.

[9] 王一笑,郭陈江,丁君,等.基于粒子群优化算法的共形阵列天线图综合[J].计算机仿真,2008,25(8):174-177.
Wang Yixiao, Guo Chenjiang, Ding Jun, et al. Pattern synthesis of cylindrical conformal arrays using PSO[J]. Computer Simulation, 2008, 25(8): 174-177.

[10] Kalyanmoy D, Amrit P, Sameer A, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[11] 储颖,糜华,纪震,等.基于粒子群优化的快速细菌群游算法[J].数据采集与处理,2010,25(4):443-448.
Chu Ying, Mi Hua, Ji Zhen, et al. Fast bacterial

- swarming algorithm based on particle swarm optimization[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2010, 25(4): 443-448.
- [12] 冯纪强, 谢维信, 徐晨. T-S 模糊粒子群优化建模及稳定性分析[J]. *电子学报*, 2011, 39(5): 1150-1153.
Feng Jiqiang, Xie Weixin, Xu Chen. A T-S fuzzy PSO model and its stability analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(5): 1150-1153.
- [13] 余华, 黄程韦, 金赞, 等. 基于粒子群优化神经网络的语音情感识别[J]. *数据采集与处理*, 2011, 26(1): 57-62.
Yu Hua, Huang Chengwei, Jin Yun, et al. Speech emotion recognition based on particle swarm optimizer neural network[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2011, 26(1): 57-62.
- [14] Moore J, Chapman R. Application of particle swarm to multiobjective optimization[R]. Auburn: Auburn University, Department of Computer Science and Software Engineering, 1999.
- [15] Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 256-279.
- [16] 寇蔚, 孙丰瑞, 杨立. 多粒子群优化算法和 RBF 神经网络在缺陷故障参数红外智能识别中的应用[J]. *数据采集与处理*, 2008, 23(S1): 65-72.
Kou Wei, Sun Fengrui, Yang Li. Application of multi-PSO algorithm and RBF neural network in intelligent identification of defect parameters in infrared NDT/E[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2008, 23(S1): 65-72.
- [17] Zhang Q, Li H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2007, 11(6): 712-731.
- 作者简介:** 李海林(1976-), 男, 讲师, 研究方向: 阵列信号处理、多目标进化算法等, E-mail: nuaahlhs@nuaa.edu.cn; 周建江(1962-), 男, 教授, 研究方向: 阵列信号处理、雷达射频隐身等; 谭静(1978-), 女, 讲师, 研究方向: 雷达信号处理、随机信号处理等; 汪飞(1976-), 男, 副教授, 研究方向: 阵列信号处理、雷达目标特征分析等。