

文章编号 1005-0388(2009)05-0808-06

用于天线优化的改进差分进化算法

王安娜 章文勋

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要 提出了一种改进的差分算法(Improved DE, IDE), 通过在现有变异策略 DE/current -to-p-best/1 的基础上加上群体中心对个体的差分, 从而加快了整体算法的收敛速度; 并采用一种简化的模拟退火选择策略, 以兼顾收敛速度和寻找全局最优解的能力, 避免了过快收敛而陷入局部最优解。此算法虽未采用自适应策略, 经测试其优化结果比加入自变异策略的 J. Zhang's 差分进化算法(JADE)更好。该算法无论经数学测试、还是应用于天线阵列的优化, 都有非常好的鲁棒性。

关键词 差分进化算法; 模拟退火选择策略; 天线阵列优化

中图分类号 TN820.1¹⁺⁵; TN820.1¹⁺³ **文献标志码** A

Improved differential evolution for antenna optimization

WANG An-na ZHANG Wen-xun

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast
University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract In this paper, an improved differential evolution (IDE) algorithm is proposed. In order to accelerate the convergence of the algorithm, a difference of the population center with respect to individuals is added to the mutation operator of DE/current-to-p-best/1. To avoid the trap of a local optimum and get balance between the convergence and the global search ability, a simplified simulated annealing (SA) selection strategy is adopted. Though there is no adaptive strategy in IDE, better performances than J. Zhang's self-adaptive differential evolution (JADE) are obtained in the test by benchmark functions. The high robustness of IDE is verified both in the test of mathematical functions and application in array pattern synthesis.

Key words differential evolution; simulated annealing; array pattern synthesis

引言

由 STRORN 和 PRICE 提出的差分进化算法 (Differential Evolution, DE)^[1], 是一种采用实数编码而适合参数可连续变化问题的优化方法, 它具有参数少、算法简单、易编程等优点, 已被成功地应用于电磁场问题的优化。一般情况下, DE 算法的效果优于遗传算法和粒子群算法^[2]; 然而实践经验显示: 对于多峰函数的优化问题, DE 有时会发生群体收敛到局

部最优或陷入其他点而停止搜索即停滞的早熟缺点。为了克服这些缺点, 曾提出过多种改进 DE 的方法: 如 DESAP^[3]、SADE^[4]、FADE^[5]、JDE^[6]、JADE^[7] 等, 它们采用不同的变异策略, 通过自适应地改变 DE 中的控制参数来寻找优化参数的最优值; 或将 DE 与局部搜索算法 (Local Search) 相结合^[8], 借以兼顾收敛速度和收敛效果。

本文提出一种改进的差分算法 (Improved DE, IDE), 在 JADE 变异策略的基础上, 添加群体中心与

个体的差分以加快算法的收敛速度;并使用一种简化的模拟退火算法的选择策略,从而兼顾了收敛速度和寻找全局最优值的能力,避免过快收敛而陷入局部最优值。此算法虽未采用自适应策略,但其优化结果比加入自变异策略的 JADE 的测试结果更好。而且此算法无论在数学、还是在天线阵列优化方面都有很好的鲁棒性。

1 基本的差分进化算法

设待优化函数 $f(\mathbf{X})$ 的自变量是 D 维连续空间 \mathbf{R}^D 中的向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_D)$, 而优化目标是使函数 $f(\mathbf{X})$ 达到最小值, 即寻找 \mathbf{X}^* 使 $f(\mathbf{X}^*) = \min(f(\mathbf{X}))$ 。基本的差分进化算法^[1]首先设定 \mathbf{X} 的初始化群体, 使其随机地均匀分布在解空间;然后进入一个包含变异、交叉和选择等三个算子的下列循环之中:

1.1 变异

设第 G 代中的个体 $\mathbf{X}_{i,G}$ 产生其子代个体为 $\mathbf{V}_{i,G}$, 则有以下几种常用变异策略:

$$\text{DE/rand/1: } \mathbf{V}_{i,G} = \mathbf{X}_{r_1,G} + F \cdot (\mathbf{X}_{r_2,G} - \mathbf{X}_{r_3,G}) \quad (1)$$

$$\text{DE/best/1: } \mathbf{V}_{i,G} = \mathbf{X}_{\text{best},G} + F \cdot (\mathbf{X}_{r_1,G} - \mathbf{X}_{r_2,G}) \quad (2)$$

DE/current-to-best/1:

$$\mathbf{V}_{i,G} = \mathbf{X}_{i,G} + F \cdot (\mathbf{X}_{\text{best},G} - \mathbf{X}_{i,G}) + F \cdot (\mathbf{X}_{r_1,G} - \mathbf{X}_{r_2,G}) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{X}_{r_1,G}, \mathbf{X}_{r_2,G}, \mathbf{X}_{r_3,G}$ 与 $\mathbf{X}_{\text{best},G}$ 分别为群体中随机选出的非 $\mathbf{X}_{i,G}$ 的个体和使函数 $f(\cdot)$ 最小的个体; F 是在区间 $[0, 1.2]$ 内取值的变异数常。

DE/current-to-p-best/1:

$$\mathbf{V}_{i,G} = \mathbf{X}_{i,G} + F \cdot (\mathbf{X}_{\text{best},G} - \mathbf{X}_{i,G}) + F \cdot (\mathbf{X}_{r_1,G} - \mathbf{X}_{r_2,G}) \quad (4)$$

是对 DE/current-to-best/1 变异的改进^[7], 将其中的 $\mathbf{X}_{\text{best},G}$ 扩展为从群体最好的 p 个个体中随机选出的一个 $\mathbf{X}_{\text{best},G}$ 参与变异。

以上几种策略各有优缺点, 基于 best 的变异策略收敛较快, 但易陷入局部最优值; DE/rand/1 较为鲁棒, 能收敛到全局最优值, 但收敛速度较慢。而 DE/current-to-p-best/1 不仅能保持 DE/current-to-best/1 的较快收敛性, 且不易陷入局部最优值。

1.2 交叉

变异操作之后, 对 $\mathbf{V}_{i,G}$ 中的每一位 $V_{j,i,G}$ 进行交叉操作: 凡在 $[0, 1]$ 内随机均匀产生的数小于取值在 $[0, 1]$ 范围内的常数 CR 、或者 j 恰等于从 $[1, D]$ 中随机选出的某一数, 就采用变异后个体 $\mathbf{V}_{i,G}$ 的第 j

位;否则采用 $\mathbf{X}_{i,G}$ 的第 j 位。即

$$W_{j,i,G} = \begin{cases} V_{j,i,G}, & \text{若 } (rand_j[0, 1] \leq CR) \\ & \text{或 } (j = j_{\text{rand}}), j = 1, \dots, n \\ X_{j,i,G}, & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

1.3 选择

DE 在交叉操作之后, 通常是采用贪婪选择算法产生如下子代: 凡交叉后所产生个体之目标函数小于其父代, 就代替父代而进入再下一代循环; 否则维持父代不变。即

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} W_{i,G}, & \text{若 } f(W_{i,G}) < f(X_{i,G}) \\ X_{i,G} & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

2 改进的差分进化算法

本文所提出的改进 DE 算法是对变异和选择两个算子的改进。

2.1 变异算子

在每次循环中, 试将当代的群体依势分为若干个子群, 由个体 $\mathbf{X}_{i,G}$ 所对应的子群的中心记为 $\mathbf{X}_{c,G}$, 然后在变异算法的式(4)中添加一含 $\mathbf{X}_{c,G}$ 的中心项, 改成

$$V_{i,G} = \mathbf{X}_{i,G} + F \cdot (\mathbf{X}_{\text{best},G} - \mathbf{X}_{i,G}) + F \cdot (\mathbf{X}_{c,G} - \mathbf{X}_{i,G}) + F \cdot (\mathbf{X}_{r_1,G} - \mathbf{X}_{r_2,G}) \quad (7)$$

至于对子群的划分可采用 fast-clu 法^[8], 若共分为 m 个子群, 具体步骤如下:

1) 从初始群体中均匀、随机选取 m 个个体, 并作为 m 个子群的初始中心;

2) 分别计算群体的每个个体至 m 个初始中心的距离, 由距离某初始中心较其他初始中心最近的个体组成一个子群;

3) 按新的子群中心重新划分子群, 并重新计算各个子群中心, 完成一次迭代;

4) 若迭代前后的中心之距离未超出某指定值, 则完成子群的划分; 否则将迭代后的子群中心命为新的初始中心, 回至 2), 继续迭代。

就子群个数 $m=1, 3, 5$ 时对 Sphere 函数(特性列于表 1)进行了测试、比较, 发现 $m=1$ 时的收敛性最好, 即变异算法采用总体的中心与个体的差分可以加快收敛速度。

2.2 选择算子

传统 DE 的贪婪选择算子较易陷入局部最优值, 而 IDE 采用简化的模拟退火 (Simulated Annealing, SA)^[8] 选择算子可以避免。

传统 SA 的优点正是不易陷入局部最优值, 主

要原因是子代以某概率 P 兼容了父代中较差的解, 如下所示:

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} W_{i,G} & \text{若 } (f(W_{i,G}) < f(X_{i,G})) \\ & \text{或 } (f(W_{i,G}) \geq f(X_{i,G}) \& \text{rand} > P) \\ X_{i,G} & \text{否则} \end{cases} \quad (8)$$

式中, 概率 $P = \exp(-\Delta f/T)$, 若 $P=1$, 则式(8)即转化为贪婪选择算子; rand 为 $[0, 1]$ 之间均匀产生的一个随机数; T 是退火控制温度, $T(G+1) = \alpha T(G)$ 而 α 略小于 1。注意初始温度 T_0 的设置是影响其全局搜索性能的关键因素: 若 T_0 高, 搜索到全局最优解的可能性大, 但因此要花费大量的计算时间; 反之, 虽可节省计算时间, 但全局搜索性能可能受到严重影响。为此, 本文设定 P 为常数以简化模拟退火的选择算法。具体算法流程如图 1 所示。

```

初始化群体 X
for i = 1:Num_Pop %Num_Pop 是群体中个体的数目
    计算第 i 个个体的目标函数值 f(X_i)
end
for G = 1:Itermax %G 是 the iteration number, Itermax 是最大迭代次数
    找出群体中最好的个体 X_best;
    计算目前群体的中心 X_c
    for i = 1:Num_Pop
        随机选取两个均不等于 X_i 的个体 X_{r1}, X_{r2}:
        根据式 (2) 对 X_i 进行变异, 得到变异后的个体 W_i;
        计算 W_i 的目标函数值 f(W_i);
        If f(W_i) < f(X_i)
            X_i = W_i;
        else
            在 [0, 1] 均匀分布产生一随机数 rand;
            If rand_i > P
                X_i = W_i;
            else
                X_i = X_{r1};
            end
        end
    end
end % 循环结束

```

图 1 算法流程图

3 仿真过程及结果比较

对于改进的 IDE 以及自适应方法中鲁棒性和收敛性较好的 JADE, 分别从数学和天线应用两种角度, 进行了测试 (都取交叉算子中的 $CR = 0.5$, 变异算子中的 $F = 0.6$)。

3.1 IDE 性能的数学标准函数测试

选用 3 种数学标准测试函数对 IDE 进行测试, 其表达式和特点列于表 1。

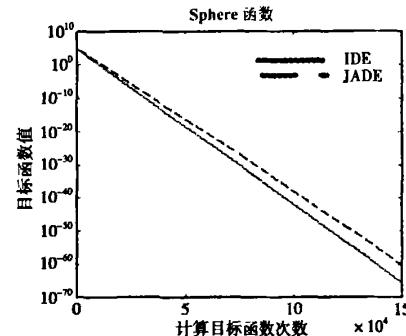
Sphere 函数是连续的单值函数; Griewank 及 Ackley 函数是多值函数, 且局部最优值的个数随着问题的维数 D 呈指数增长。表 1 中, 均取 $D=30$, 选择常数 $P=0.9$ 。测试过程的种群规模均为 100, 独立测试 50 次的结果列于表 2; 50 次独立优化的平均值随计算目标函数次数的变化曲线示于图 2。

表 1 标准数学测试函数的表达式及取值范围

测试函数	表达式	取值范围
Sphere	$f_1(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2$	$[-100, 100]^D$
Griewank	$f_2(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^D x_i^2 - \prod_{i=1}^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	$[-600, 600]^D$
Ackley	$f_3(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D (\cos 2\pi x_i)\right) + 20 + e$	$[-32, 32]^D$

表 2 IDE 和 JADE 按数学测试函数的结果比较

测试函数	计算	IDE	JADE
	函数	平均值	平均值
	次数	(方差值)	(方差值)
Sphere	1.5e5	$2.1e-66$ ($1.9e-66$)	$4.1e-61$ ($1.6e-60$)
Griewank	5e4	0 (0)	$1.5e-4$ ($1e-3$)
	7e4	$6.9e-15$ ($1.6e-15$)	$1.1e-13$ ($1.5e-15$)
Ackley	1.5e5	$5.5e-015$ ($1.6e-015$)	$5.2e-015$ ($1.5e-015$)



(a) Sphere 测试函数

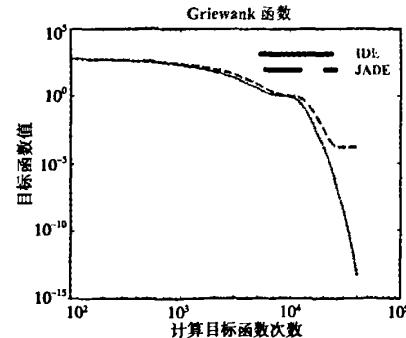


图 2 IDE 和 JADE 按数学测试函数的结果比较

3.2 IDE 在天线优化领域中的应用

3.2.1 按最大旁瓣电平优化不等距均匀直线阵

设均匀馈电的 $2N$ 个点源的直线阵(图 3)的口径 $2L > (2N-1)d_c$, 其中 d_c 为限定的最小间距(实际的天线总占有一定尺寸)。要求在 $\{d_i - d_{i-1}\} \geq d_c$ 的情况下, 对阵列各点源的间距进行优化, 使该阵列的旁瓣电平减到最低。

阵列方向性函数可表示为

$$E(\theta) = \sum_{n=-N}^N \exp(jk_0 d_n \cos\theta) = 2 \sum_{n=1}^N \cos(jk_0 d_n \cos\theta) \quad (9)$$

式中, θ 是射线与阵列所在直线的夹角, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, λ 为波长; 该直线阵的优化参数即各点源的坐标 $\{d_i\}$, 在 $[0, L]$ 的范围内随机产生, 并在优化的过程中不断趋近于最优值。无论是随机产生的还是进化得到的 $\{d_i\}$ 最优值, 都需要测定其是否满足最小间距条件, 这样会使优化过程非常复杂。本文采用文献[11]中的优化参数: 以 $2N$ 元阵的一半单元为研究对象, 固定第 N 个(边缘)单元的位置 $d_N = L$, 则第一个单元满足 $d_1 \geq d_c/2$, 而第 $(N-1)$ 个单元满足 $d_{N-1} \leq L - d_c$ 。由于各相邻单元都要满足最小间距条件 $\{d_i - d_{i-1}\} \geq d_c$, 首先对半阵列口径按刻度 $d_i' = [0.5 + i - 1]d_c$ 进行划分, 作为距离第 i 个单元之位置参数 p_i 的相对零点 $d' = [d'_1, \dots, d'_i, \dots, d'_{N-1}]$ 。然后, 对 $(N-1)$ 维位置参数向量 P 在 $[0, L - (0.5 + N)d_c]$ 范围内实施优化, 再将优化后的元素按从小到大的顺序重新构成 $P' = d - D$, 由此产生的坐标向量 d 的所有元素都能自动满足最小间距条件。

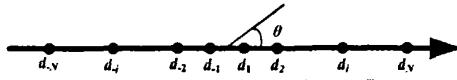


图 3 不等间距均匀馈电的直线点源阵

若给定单元总数 $2N=10$, 则优化参数为 4, 设最小间距为 0.25λ , 取 JADE 和 IDE 的群体规模皆为 20。将两种优化方法按 50 次独立优化的结果列于表 3, 50 次独立优化的函数的平均值随着迭代次数的变化曲线示于图 4。由图 4 可见, 用 IDE 优化

表 3 直线阵最大旁瓣电平(SLL)优化结果的比较

测试 函数	迭代 次数	IDE	JADE
		平均值 (方差值, 最 优值)/dB	平均值 (方差值, 最 优值)/dB
SLL	300	-19.70 (0.03, -19.72)	-19.54 (0.12, -19.68)

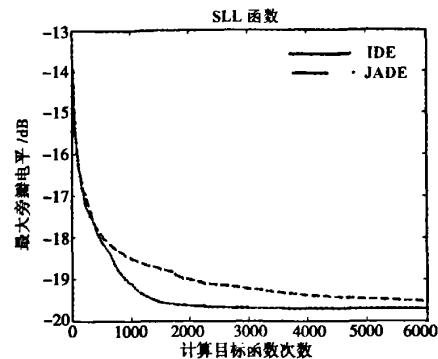


图 4 采用 IDE 和 JADE 优化直线阵 SLL 的比较

最大旁瓣电平, 无论是收敛速度还是收敛性能均优于 JADE。且从 50 次独立优化结果的方差值看出, IDE 非常鲁棒。

3.2.2 广播台的多天线布局优化

在 $500 \times 500\text{m}^2$ 有限地域内, 布置三个工作于不同频率的广播天线塔(可近似为单极子天线), 由于各天线塔的水平面波瓣图和输入阻抗都受到互耦效应的影响, 要求寻找使三座塔受互耦影响尽量小的最佳布局。设定条件如下:

已知: 三塔的工作频率分别为 $f_1 = 702\text{ kHz}$, $f_2 = 1.053\text{ MHz}$, $f_3 = 1.206\text{ MHz}$; 塔高分别为 $h_1 = 150\text{ m}$, $h_2 = 120\text{ m}$, $h_3 = 150\text{ m}$; 塔的等效半径相同 $\rho = 0.711\text{ m}$ 。

确定优化参数: 在 $x \in [-250, 250]$, $y \in [-250, 250]$ 的区域内三座塔的坐标为: (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 共 6 个参数(图 5)。

择定优化目标:

1) 各塔在各自频率点的水平面波瓣图的不圆度 $\Delta D_i = D_{i,\max} - D_{i,\min}$ (dB) 都不超过 3 dB;

2) 在邻塔可视作短路接地的状况下, 各塔在各自频率点的输入阻抗 $Z_{in,i} = R_{in,i} + jX_{in,i}$ 之实部和虚部值都低于 160Ω 。归纳成总的加权目标函数:

$$Fitness = 50 \cdot Fit_1 + Fit_2 + Fit_3 \quad (10)$$

式中, $Fit_1 = \sum_{i=1}^3 \begin{cases} \Delta D_i - 3, & \text{if } \Delta D_i \geq 3 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

$$Fit_2 = \sum_{i=1}^3 \begin{cases} R_{in,i} - 160, & \text{if } R_{in,i} \geq 160 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Fit_3 = \sum_{i=1}^3 \begin{cases} |I_{in,i}| - 160, & \text{if } |I_{in,i}| \geq 160 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

运用 SuperNEC^[12] 软件来计算各天线塔的输入阻抗和波瓣图; 而分别用 JADE 和 IDE 优化三座塔之间的距离, 在群体规模取 20 的条件下, 按 JADE

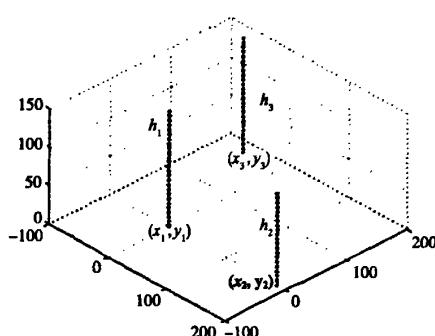


图 5 SuperNEC 环境下的阵列布局图

和 IDE 两种方法优化的结果列于表 4, 其收敛性态示于图 6。可见, IDE 和 JADE 虽均能收敛到最优值, 但 IDE 的收敛速度较快; 在相同不圆度指标下优化所得的输入电阻、电抗都略小于 JADE 的结果。

表 4 采用 IDE 和 JADE 对广播塔布局优化的比较

性能比较	IDE	JADE
三塔的输入 电阻/Ω	84.7	87.6
三塔的输入 电抗/Ω	141.1	146.1
水平面不圆 度/dB	146.6	154.4
三塔的输入 电抗/Ω	116.7	117.5
水平面不圆 度/dB	157.0	157.6
三塔的输入 电抗/Ω	159.1	159.8
迭代次数	2.49	2.49
迭代次数	2.46	2.46
迭代次数	1.98	1.99
最优坐标	[233, 250]	[249, -250]
最优坐标	[-250, 250]	[-189, -220]
最优坐标	[-199, -244]	[244, -249]

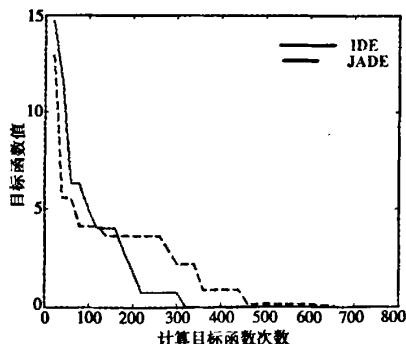


图 6 广播塔布局优化的比较

4 结 论

本文提出了一种改进的差分进化算法, 采用了添加重心项的变异策略和简化的非贪婪选择算子,

并对其按数学测试函数和天线应用进行了测试, 发现其性能非常鲁棒, 比采用自适应策略的 JADE 还要好, 可望将其应用于电磁场复杂问题的优化。

参考文献

- 1] STORN R, PRICE K. Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space [J]. *J. of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341-359.
- 2] VESTERSTROM J, THOMSON R. A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems [C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2004, 2: 1980-1987.
- 3] TEO J. Exploring dynamic self-adaptive populations in differential evolution [J]. *Soft Computing*, 2006, 10 (8): 673-686.
- 4] QIN A K, SUGANTHAN P N. Self-adaptive differential evolution algorithm for numerical optimization [C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2005, 2: 1785-1791.
- 5] BREST J, GREINER S, BOSKOVIC B, MEMIK M, et al. Self-adapting control parameters in differential evolution: a comparative study on numerical benchmark problems [J]. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 2006, 10 (6): 646-657.
- 6] LIU J, LAMPINEN J. A fuzzy adaptive differential evolution algorithm [J]. *Soft Computing*, 2005, 9 (6): 448-462.
- 7] ZHANG J, SANDERSON A. JADE: self-adaptive differential evolution with fast and reliable convergence performance [C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2007: 2251-2258.
- 8] CHEN Y, YANG S, NIE Z. The application of a modified differential evolution strategy to some array pattern synthesis problems [J]. *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, 2008, 56 (7): 1919-1927.
- 9] KENNEDY J. Stereotyping: improving particle swarm performance with cluster analysis [C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2000, 2: 1507-1512.
- 10] LAARHOVER P J M VAN, AARTS E H L. Simulated annealing: theory and application [M]. Kluwer Academic, 1987.
- 11] CHEN K, HE Z, HAN C. A modified real GA for the sparse linear array synthesis with multiple constraints [J]. *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, 2006, 54 (7): 2169-2173.
- 12] BURKE G J, POGGIO A J. Numerical Electromagnetic Code (NEC)-Method of Moments [M]. San Diego, CA: Naval Ocean Systems Center, 1981.

(下转第 831 页)

参考文献

[1] GODWIN M P, SCHLOSSOW E P and GRAHL B H. Improvement of the Effelsberg 100 meter telescope based on holographic reflector surface measurement [J]. *Astron. Astrophys.*, 1986, 167: 390-394.

[2] 章文勋. 世纪之交的天线技术[J]. *电波科学学报*, 2000, 15(1): 97-100.
ZHANG Wenxun. The antenna technology faced to the 21th century[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2000, 15(1): 97-100. (in Chinese)

[3] 王伟, 段宝岩, 马伯渊. 一种大型反射面天线面板测试与调整方法及其应用[J]. *电子学报*, 2008, 36(6): 1114-1118.
WANG Wei, DUAN Bao-yan, MA Bo-yuan. A Method for Panel Adjustment of Large Reflector Antenna Surface and Its Application[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(6): 1114-1118. (in Chinese)

[4] 蒋泽, 等. 面向新一代移动通信的智能天线技术[J]. *电波科学学报*, 2001, 16(3): 342-347.
JIANG Z, et al. Smart antenna technique for next generation of mobile communication[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2001, 16(3): 342-347. (in Chinese)

[5] 王从思, 等. 大型面天线CAE分析与电性能计算的集成[J]. *电波科学学报*, 2007, 22(2): 292-298.
WANG C S, et al. Study on synthesis analysis system for large reflector antennas[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(2): 292-298. (in Chinese)

[6] 王从思, 等. 天线表面误差的精确计算方法及电性能分析[J]. *电波科学学报*, 2006, 21(3): 403-409.
WANG C S, et al. Precise algorithm for surface errors of reflector antennas and analysis of its electrical performance[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(3): 403-409. (in Chinese)

[7] 叶尚辉. 天线结构设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.

[8] 华慕麟. 天线变形曲面的一种拟合方法[J]. *现代雷达*, 1994, 16(1): 75-82.
HUA Mulin. A Best-Fit Method for Deformed Surface of Antennas[J]. *Modern Radar*, 1994, 16(1): 75-82. (in Chinese)

[9] SINTON S, RAHMAT-SAMII Y. Random surface error effects on offset cylindrical reflector antennas [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2003, 51(6): 1331-1337.

[10] RAHMAT-SAMII Y. An efficient computational for characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1983, 31(1): 92-98.



冷国俊 (1983—), 男, 江苏人, 西安电子科技大学机电工程学院博士生, 主要研究方向为天线结构优化及保型设计。



王伟 (1980—), 男, 安徽人, 西安电子科技大学机电工程学院博士生, 主要研究方向为天线主面调整及电性能分析。



白前 (1982—), 男, 山东人, 西安电子科技大学机电工程学院硕士生, 主要研究方向为机电一体化协同设计。

(上接第 812 页)



王安娜 (1981—), 女, 河南人, 东南大学博士生, 主要方向为天线优化的理论及应用等。



章文勋 (1937—), 男, 上海人, 东南大学教授博士生导师, 中国电子学会会士、IET Fellow、IEEE Fellow。主要研究方向是工程电磁理论, 天线理论与技术等。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>