

基于复数 GA 的波束空间自适应调零处理

晋 军¹, 王华力¹, 朱德生²

(1. 解放军理工大学通信工程学院, 江苏南京 210007; 2. 总参通信部, 北京 100840)

摘要: 建立了直接辐射阵列多波束天线波束形成的数学模型. 提出一种改进的复数编码遗传算法, 在算法的初期和后期采用不同的配对方案, 在奇数代和偶数代分别采用外推、内插和正交外推内插算子, 克服了已有算法的早熟和对初始群体依赖等缺陷, 提高了算法的全局收敛能力. 采用记忆算子使算法能够对抗位置跳变干扰. 模拟实验结果表明, 该波束空间自适应调零新方法能够应用于 LEO 卫星抗干扰, 且调零分辨率高、性能稳定可靠, 可以获得比传统自适应波束形成算法更好的干扰抑制性能.

关键词: 遗传算法; 自适应波束形成; 低轨卫星; 直接辐射阵列

中图分类号: TN975; TN927 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)06-1031-F05

Beamspace Adaptive Nulling Based on Complex Coded GA

JIN Jun¹, WANG Hua-li¹, ZHU De-sheng²

(1. Institute of Communications Engineering, PLAUST, Nanjing, Jiangsu 210007, China;

2. The General Staff Department Communications Department, Beijing 100840, China)

Abstract: A beamforming model of multi-beam direct-radiating array antenna is established. A modified complex-coded genetic algorithm is introduced. This genetic algorithm chooses different mating operator in different period of time. It selects different crossover operator such as extrapolation, interpolation, and orthogonal direction extrapolation and interpolation crossover operator in different generation. This algorithm overcomes the disadvantages of existing genetic algorithms — prematurity and the dependence of convergence on the initial population, and enhances global convergence performance of the algorithm. It uses “remember operator” to suppresses the DOA-hop jamming. Computer simulation shows that this method has the advantages of high resolution and reliability in LEO satellite beam space adaptive nulling. Its anti-jamming ability is better than the traditional adaptive beamforming algorithms.

Key words: genetic algorithm(GA); adaptive beam forming; LEO satellite; direct-radiating array

1 引言

通信卫星的暴露性使得它极易受到敌方攻击, 其中上行干扰可以使整个卫星通信网陷入瘫痪, 其影响的深度和广度远大于下行干扰. 因而上行干扰成为敌方对军用通信卫星实施的一种普遍而有效的电子攻击手段. LEO 卫星与 GEO 卫星又有所不同, 除了处于暴露环境易受干扰外, 其对地相对位置在不断变化. 当受到地面干扰时, 干扰源的到达角相对于 LEO 卫星也在不断变化. 而且在电子战中, 干扰的样式也逐渐由单站干扰向多站干扰和智能干扰转变, 这就给 LEO 卫星的抗干扰能力提出了更高的要求.

智能天线中的自适应调零技术是一种有效的抗干扰手段, 现已得到广泛关注. 在其实际应用中, 自适应算法一

直是研究的重点. 它不仅决定着收敛速度而且决定着硬件实现的复杂程度, 因此选择合适的自适应算法是极为重要的. 目前已提出很多著名算法, 例如最小均方算法(LMS)、递归最小二乘算法(RLS)和采样矩阵求逆算法(SMI)^[1]. 这些算法都属于单点搜索算法, 即根据一些变动规则, 从解空间中的一点移动到另一点来进行搜索. 这样的方式对于多峰函数来说, 可能会陷入局部的一个单峰的优解.

遗传算法是 Holland 教授在 20 世纪 70 年代创立的一种优化搜索技术, 由于它在解决大空间、非线性全局寻优的复杂问题时具有传统方法所难以比拟的独特优越性能, 已在很多领域得到了应用.

Holland 遗传算法的编码方法是二进制编码, 后来人们根据其存在的缺陷又提出了格雷编码和实数编码.

Randy L. Haupt 等将二进制编码遗传算法用于阵列天线方向图综合^[2,3]。但是基于二进制编码的方法在进行个体评价前需要进行解码操作,运算效率低。Andrea Massa^[4] 等将其用于模拟波束形成的数字移相器控制,由于其编码位数较少,能够实现波束的实时控制,但其调零分辨率不高,调零深度不深。当需要优化的阵元数较多或者为了获得较高的精度时必须使用多位的编码,这样就需要很长的计算时间,用于实时应用的场合就比较困难。

实数编码遗传算法^[5] 物理意义明确,计算过程中无需编解码操作,提高了运算效率,更适合高维连续空间内的寻优。

本文引入矢量编码的思想,直接用波束空间的复数权矢量作为遗传算法的编码表示,进一步提高了编码效率,并结合复数编码的特点和具体的应用环境,提出了一种改进的复数编码遗传算法。

文章第一节建立了星载直接辐射阵列多波束天线波束形成的数学模型;第二节对提出的改进遗传算法进行了详细介绍,第三节在前两节的基础上进行了计算机模拟实验。

2 星载平面阵列多波束天线系统

2.1 系统简介

利用波束空间^[6,7] 进行自适应调零可以极大降低自适应算法的运算量。图 1 是一个典型的直接辐射阵列多波束天线波束空间自适应调零系统的方框图。来自 M 个天线阵元的信号由波束形成网络形成 N 个波束,自适应处理器在此基础上对 N 个波束的权值进行优化,使得合成波束保证期望信号接收的同时在干扰信号来向产生零陷。

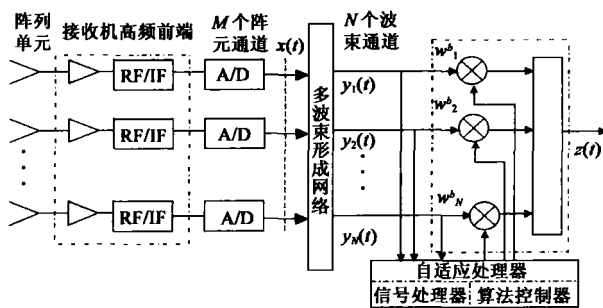


图 1 波束空间波束形成天线系统

天线阵元的增益方向图为 $\cos \theta$ 分布。阵元间距为半波长。阵列采用正三角形栅格排列。阵面形状为六边形,具体的排列方式见图 2。

利用 37 个阵元通道形成 19 个波束来合成覆盖。19 个波

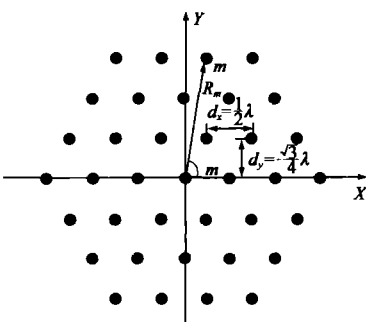


图 2 六边形平面阵列天线的阵元排列

束的覆盖关系如图

3。图中每个圆环表示一个波束的 3dB 覆盖范围。U、V 坐标的定义为 $U = \theta \cos \varphi, V = \theta \sin \varphi$ 。Q、φ 的定义与以卫星为原点的球坐标系定义相同。

2.2 信号模型

如图 2 所示,假设 M 个阵元的平面阵,第 m 个阵元与 x 轴的夹角为 γ_m ,在球坐标系下阵元的位置为 $(R_m, p/2, \gamma_m)$, q 个窄带信号从 (θ_i, φ_i) 到达阵列, t 时刻阵列观测矢量为:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^q S_i(t) \mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中, n 是加性随机噪声; $s_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个窄带信号的复振幅,它们为相互独立的随机变量; $\mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i)$ 是方向矢量,表示为:

$$\mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i) = [e^{-j2\pi R_1 / \lambda \sin \theta_i \cos(\varphi_i - \gamma_1)}, e^{-j2\pi R_2 / \lambda \sin \theta_i \cos(\varphi_i - \gamma_2)}, \dots, e^{-j2\pi R_M / \lambda \sin \theta_i \cos(\varphi_i - \gamma_M)}]^T \quad (2)$$

天线阵 N 个波束的输出矢量可表示为:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}^e \mathbf{x}(t) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{W}^e = [W_1^e, W_2^e, \dots, W_N^e]^T$, 为 N 行 M 列的张量,每一行为 M 个复数阵列权值构成的权矢量。

$$\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)]^T$$

波束空间波束形成后的信号输出可表示为:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{w}^b \mathbf{y}(t)$$

其中, $\mathbf{w}^b = [w_1^b, w_2^b, \dots, w_N^b]$ 是波束空间的复数权矢量。波束空间自适应波束形成的目的就是通过对自适应算法优化 \mathbf{w}^b , 从而实现期望信号的最佳接收和干扰信号的调零。

3 复数编码遗传算法

早期的遗传算法采用二进制编码多用于离散空间的搜索,而演化策略(evolution strategy)和演化规划(evolutionary programming)直接以问题的可行解作为个体的表现形式,无需编码处理,往往用于实数空间的搜索。随着实数编码遗传算法的出现,这几种算法的区别正在逐渐缩小。Kita^[8] 对采用自适应变异的演化策略和采用单峰正态分布杂交算子 UNDX (unimodal normal distribution crossover) 的实数编码遗传算法进行了比较,结果显示,实数编码遗传算法在求解高维和多极值函数优化问题方面性能更具优势。Lu^[9-11] 等将复数编码遗传算法用于阵元空间宽带零点的生成和阵元失效后的方向图修正。但是算法采用的交叉算子空间拓展能力不强,其配对方案使收敛结果对初始群体的依赖较强。

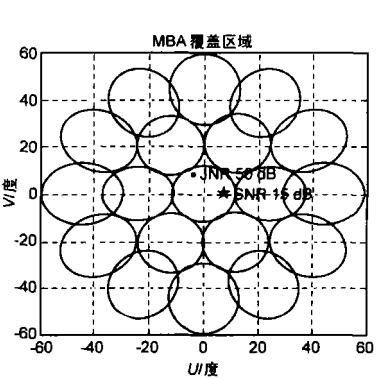


图 3 19 个波束合成覆盖的覆盖关系

本文根据所要解决问题的特点提出一种改进的复数编码遗传算法 (Modified Complex coded GA, MCGA).

其算法的流程如图 4 所示.

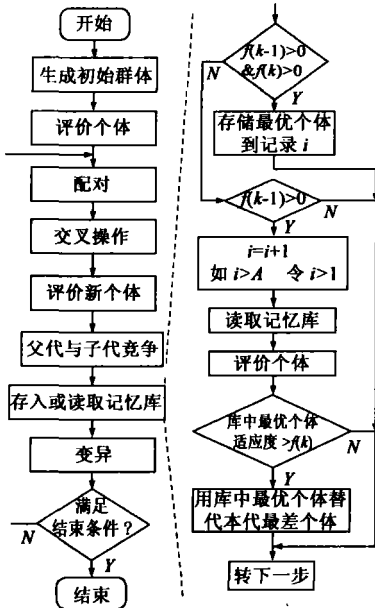


图 4 算法流程

下面对算法中的关键部分进行详细描述.

波束空间权矢量的每一个元素都是一个复数, 本文将复数权值作为遗传算法的编码, 提高了运算效率. 编码的长度与波束的数目相同.

本文采用导频信道发送训练序列的方法实现自适应波束形成, 因此将该组权值所获得的导频信号的输出信号干扰噪声比 (SINR) 作为评价个体的适应度值.

Ye^[10] 等多种配对方案进行了对比, 并认为当初始群体中存在最优解附近的个体时, EMS (Emperor Selective) 配对方案能够产生最优秀的染色体. 但是这种配对方案容易出现早熟收敛. 在收敛的初期, 为保证群体的多样性, 本文将竞争选出的上一代个体全部放入繁育池, 然后随机配对, 每个个体都参与配对且只配对一次. 当群体中的最优个体和最差个体的适应度小于用户设定的门限后, 按照正态分布选择排序后的个体进入繁育池, 然后随机配对, 使得高适应度的个体有更多的繁殖机会, 以加速收敛.

交叉算子对遗传算法的寻优能力有着重要影响^[5]. 实数遗传算法常用内插法产生新个体. 其操作过程如下:

假设配对的父代个体为 w^{b1} 和 w^{b2} , 子代个体的基因值由下式产生:

$$w_i^{b1} = cw_i^{b1} + (1 - c)w_i^{b2} \quad (5)$$

$$w_i^{b2} = cw_i^{b2} + (1 - c)w_i^{b1} \quad (6)$$

其中, $c \in [0, 1]$, $i = 1, 2, \dots, N$. 这种交叉方法具有较好的收敛性能, 但是其子代落于两个父本之间, 其空间拓展能力比较差.

范瑜等人采用向上向下外推交叉技术有效扩大了寻

优空间^[12]. 其生成子代的过程如下:

$$w_i^{b1} = w_i^{b1} - (w_i^{b2} - w_i^{b1})c \quad (7)$$

$$w_i^{b2} = w_i^{b2} + (w_i^{b2} - w_i^{b1})c \quad (8)$$

这两种实数交叉算子可以用于复数编码的基因交叉. 文献 [7]~[9] 采用的线性交叉算子, 其本质与外推、内插算子相同, 只是 c 的取值为 0.5, 这样内插只产生一个子代个体, 并落在两父本中点. c 的取值能够影响算子的空间拓展能力和收敛速度, 在本文算例中, $c = 0.6$ 是一个较好的折衷.

为了进一步提高算法的空间拓展能力, 本文提出一种正交内插外推算子, 它先将两父本向正交方向旋转得到 $w_i^{b1\perp}$ 、 $w_i^{b2\perp}$

$$w_i^{b1\perp} = (w_i^{b2} + w_i^{b1} - |d_i|e_i) / 2 \quad (9)$$

$$w_i^{b2\perp} = (w_i^{b2} + w_i^{b1} + |d_i|e_i) / 2 \quad (10)$$

其中 $d_i = (w_i^{b2} - w_i^{b1})$; e_i 是与 d_i 正交的正交基. 然后再用前述内插和外推的方法得到子代个体.

实验表明, 内插算子寻找更高适应度个体的能力最强, 而另外两算子可以有效的扩大搜索空间, 避免早熟的发生. 本文将这三种算子同时用于算法, 在奇数代采用内插、外推算子, 偶数代采用正交内插外推算子. 每一代中一半个体用内插产生后代, 令一半个体用外推产生后代.

基因值的有效取值范围是: $|w_i^b| \leq 1$, 如果交叉产生的新基因值超出了取值范围则对其做归一化处理:

$$w_i^b = w_i^b / |w_i^b|, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

遗传算法能够找到全局最优解的前提是最优保留策略, 本文采用父代子代竞争的方法选出下一代个体, 其中隐含了最优保留策略. 将 P 个父代个体和它们交叉产生的子代个体按照适应度排序, 选出 P 个适应度最高的个体作为下一代.

为了提高算法对抗复杂时变干扰的能力, 算法采用了“记忆算子”. 算子将抗干扰过程中的优良权值放入记忆库, 当再次遇到类似干扰时使算法能够从记忆库中迅速调用权值, 从而使算法对遭遇过的干扰产生免疫力. 假设第 k 代群体中的最高适应值为 $f(k)$. 记忆库可存储 A 组权值. 记忆算子的操作过程见图 4.

变异的目的是维持种群的多样性, 实验中发现变异产生的个体适应度往往不高, 如果变异在选择之前进行, 由于父代子代竞争, 这些个体很难进入繁育池, 所以算法将变异操作放在选择之后. 以变异概率 P_m 在父子竞争后的群体中随机选择个体作为变异个体. 其过程是, 生成 P 个区间在 $[0, 1]$ 内的一串随机数, 每个随机数对应群体中的一个个体, 并将最佳个体对应的随机数置“1”以保护最佳个体不被变异. 选择对应随机数小于 P_m 的个体为变异个体, 然后按下式进行操作:

$$W^b = W^b + d \quad (12)$$

其中, d 为与 W^b 维数相同的一个复数扰动矢量. 如果 W^b 中的任何一个基因值超出取值范围, 则用前文中的方法对

其归一化。

当群体中最高适应度达到要求或算法达到设定的最大叠代次数后, 算法停止。

4 应用实例

为了验证提出算法的有效性, 下面给出几个计算实例, 并与传统的自适应算法进行比较。文章同时与文献[9]中所采用的遗传算法进行了比较, 下文称其为 CGA。CGA 中采用 EMS 配对方案。为了克服早熟, CGA 在群体最高适应度与最低适应度差别小于某个门限后将大于群体总数 60% 的较差个体重新初始化, 这部分新个体在单独繁殖一定代数后再与原群体中的剩余个体进行繁殖操作。

算例 1: 假设在波束覆盖区内, 某时刻一典型期望信号和干扰信号的分布如图 3 所示: 期望信号来向用 θ, φ 表示为 $(5^\circ, 0^\circ)$, 信噪比 (SNR) 为 15dB, 干扰信号的来向为 $(10^\circ, 120^\circ)$, 干噪比 (JNR) 为 50dB。阵列天线 19 个波束合成的静态方向图如图 5(a)。算法收敛后的方向图如图 5(b), 可以看出, 方向图在干扰来向形成了约 60dB 的零陷。算法适应度收敛曲线如图 5(c)。

考虑卫星飞行情况下, MCGA、CGA 和 LMS 三种算法 20 次蒙特卡罗实验的参数设置、平均结果和均方差见表 1。采用 LMS 算法时, 当干扰与期望信号不在同一个波束时收敛性能较好, 而对于本算例, 算法经常收敛于局部最优解。

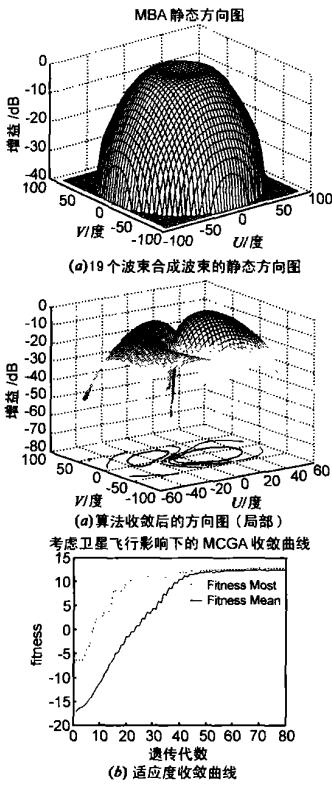


图 5 单干扰条件下的算法结果

表 1 算法抗干扰性能对比

	群体规模	最大代数	输出 SINR	均方差
MCGA	400	80	12.0 dB	0.11
CGA	400	80	6.77 dB	1.27
LMS	—	—	-7.60 dB	48.1

通过表 1 可以看出, LMS 算法的输出 SINR 最低, 而且均方误差最大, 表示其收敛最不稳定。CGA 的输出 SINR 比较高, 收敛性能比较稳定。MCGA 的输出 SINR 最高, 收敛也最稳定。

MCGA 能够对抗由多干扰源随机组合形成的位置跳

变干扰。为了简明起见, 下文所举算例在一个时隙只有一个干扰源到达。

算例 2: 期望信号来向与算例 1 同, 假设有四个干扰源 JNR 都为 50dB, 其位置如图 6(a), 于不同的时隙对卫星进行干扰, 到达时间表如图 6(b)。MCGA 的动态 SINR 输出如图 6(c)。我们同时也给出了 CGA 和 RLS 算法的模拟实验结果。可以看出每次干扰源位置跳变 CGA 和 RLS 算法的输出 SINR 都会产生大幅下降, 而 MCGA 能够对遭遇过的干扰产生免疫力, 经过几次“学习”之后, 干扰源位置跳变时 SINR 只有小幅下降, 这是因为算法虽然遭遇过该干扰源的干扰, 但由于卫星的飞行使得干扰源的到达角发生了变化。

通过对抗单干扰和位置跳变干扰的模拟实验可以看出, MCGA 在全局收敛能力、收敛的稳定性以及对抗位置跳变干扰的能力方面明显高于对照算法。

5 结论

本文建立了直接辐射阵列多波束天线波束形成的数学模型, 研究了遗传算法用于波束空间自适应调零的关键技术。提出一种改进的复数编码遗传算法, 并将其用于波束空间自适应调零。与已有的复数编码遗传算法相比, 改进算法对初始群体的依赖

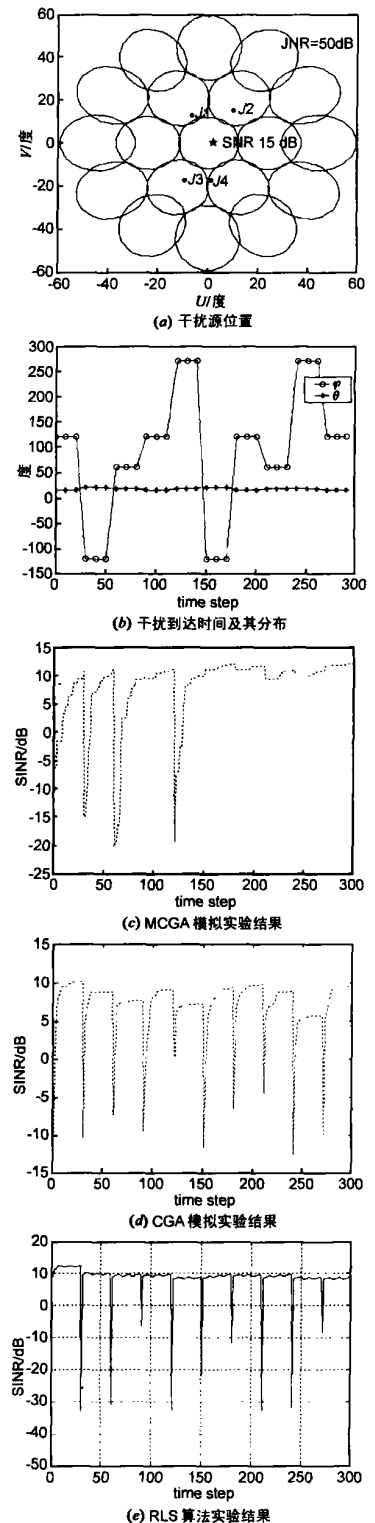


图 6 位置跳变干扰条件下的模拟实验结果

较弱, 全局寻优能力更强. 模拟实验结果显示, 该方法应用于 LEO 卫星波束空间自适应调零是有效的, 克服了常规的自适应算法不能全局收敛的问题, 而且在对抗位置跳变干扰时显示了其独特的优越性.

虽然遗传算法有计算量大的缺点, 但是在硬件实现时, 除了群体初始化外的各个步骤都可以并行实现, 从而可极大的提高算法的速度.

本文提出的算法可以经过改造用于其他需要矢量编码的多维空间的寻优, 具有广泛的应用前景.

参考文献:

- [1] Haykin S. Adaptive Filter Theory (Fourth Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [2] Haupt R L. An introduction to genetic algorithms for electromagnetics[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995, 37(2): 7- 15.
- [3] Haupt R L. Phase-only adaptive nulling with a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(6): 1009- 1015.
- [4] Massa A, Donelli M, De Natale FGB, et al. Planar antenna array control with genetic algorithms and adaptive array theory[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(11): 2919- 2924.
- [5] Deb K, Joshi D, Anand A. Real-Coded Evolutionary Algorithms with Parent-centric Recombination[R]. Kanpur: Indian Institute of Technology, 2001.
- [6] 王华力, 陈长征, 韩锋, 甘仲民. 应用于卫星多波束天线的自适应波束形成算法比较[J]. 电子学报, 2001, 29(3): 358- 360.
WANG Hua-li, CHEN chang-zheng, HAN Feng, GAN Zhong-min. A comparative analysis of adaptive beam forming algorithms for satellite multiple beam antennas [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2001, 29(3): 358- 360. (in Chinese)
- [7] 甘仲民, 王华力, 张更新, 刘爱军. 毫米波通信技术与系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
GAN Zhong-min, WANG Hua-li, ZHANG Geng-xin, LIU Ai-jun. Millimeter wave communications techniques and systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)
- [8] Kita H. A comparison study of self-adaptation in evolution strategies and real coded genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 2001, 9(2): 223- 241.
- [9] Lu Y, Yeo B K. Adaptive wide null steering for digital beam forming array with the complex coded genetic algorithm[A]. Proc 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology [C]. Dana Point CA, USA: IEEE, 2000. 557- 560.
- [10] Yeo B K, Lu Y. Array failure correction with a genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(3): 823- 828.
- [11] Yan Keer-Keong, LuY. Sidelobe Reduction in Array-Pattern Synthesis Using Genetic Algorithm. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45 (7): 1117- 1122.
- [12] 范瑜, 金荣洪. 基于一种新的遗传算法的天线方向图综合技术[J]. 电波科学学报, 2004, 19(2): 182- 186.
FAN Yu, JIN Ronghong. Pattern synthesis of antennas based on a novel genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(2): 182- 186. (in Chinese)

作者简介:

晋 军 男, 1977 年出生. 1998 年毕业于解放军通信工程学院. 2001 年获得硕士学位. 2001 年至今在解放军理工大学通信工程学院攻读博士学位. 中国通信学会会员. 主要研究方向为卫星通信抗干扰、阵列信号处理. E-mail: jinjun2000@ 163. com

王华力 男, 1967 年出生. 1993 年和 1997 年在南京理工大学分别获硕士、博士学位; 1997 年至 1999 年在解放军通信工程学院博士后流动站工作. 现为解放军理工大学教授, 《通信学报》编委, 中国电子学会高级会员, IEEE Member. 目前主要从事空间信息对抗和自适应天线理论与应用等方面的教学科研工作.