

阵列天线方向图综合中的遗传算法目标函数研究

范 瑜* ** 金荣洪* 刘 波* 耿军平*

*(上海交通大学电子工程系 上海 200030)

** (常熟理工学院 常熟 215500)

摘 要: 在基于遗传算法的阵列天线方向图优化问题中, 目标函数的选取直接关系到方向图的优化结果和算法的效率。该文针对不同优化目的的目标函数选取方法, 比较了各种目标函数对方向图优化的影响, 给出了一个在较大范围内通用的目标函数, 同时分析了目标函数中的权重的影响。

关键词: 遗传算法, 方向图综合, 目标函数

中图分类号: TN820.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)05-0801-04

Study on the Objective Function for the Array Pattern Synthesis Based on Genetic Algorithm

Fan Yu* ** Jin Rong-hong* Liu Bo* Geng Jun-ping*

*(Dept. of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

** (Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

Abstract For the pattern synthesis of antenna arrays by using genetic algorithm, it is important to select a proper objective function, which greatly influences the result and efficiency of the algorithm. In this paper, some kinds of objective functions used in the pattern synthesis are introduced and compared. A general objective function is presented, which can be used in many kinds of pattern synthesis problems. Meanwhile, the influence of weight factor in the objective function is studied.

Key words Genetic algorithm, Pattern synthesis, Objective function

1 引言

阵列天线方向图的综合与优化是智能天线的—一个重要研究内容, 它直接关系到整个智能天线系统的性能和表现。为了估计智能天线的性能和误差影响, 需要—系列的性能指标, 例如: 阵列增益、副瓣电平、干扰零深、干扰对消比、信号干扰噪声比改善因数、到达方向估计误差等。所有这些指标都与天线的方向图紧密相关, 因而方向图的优化在很大程度上决定了整个通信系统的性能优劣^[1]。

对于阵列天线方向图的综合和优化是一个典型的多维非线性优化问题, 当方向图的要求比较复杂或者需要同时兼顾多个优化指标时, 常规的优化方法往往无能为力。近年来, 遗传算法在阵列天线方向图综合中取得了越来越多的应用, 成功地实现了阵列天线稀疏, 降低最大旁瓣电平, 或通过控制阵元位置、激励电流相位和幅度进行方向图零点生成^[2-11]。

Altshuler^[2]使用二进制遗传算法优化带折合段的加载单极天线, 使其在整个半球空间具有均匀的功率方向图分布; Haupt 和 Ares-Pena 等人^[4, 5]将遗传算法应用于阵列天线方向图综合; Ares^[6]同时运用遗传算法和模拟退火算法对天线方向图进行优化; Altshuler^[9]还应用遗传算法设计了 GPS/IRIDIUM 车用天线。这些基于遗传算法的天线设计或方向图优化方法都是根据不同的设计或优化目的来设计不同的目标函数, 这些文献中提到的目标函数都不具备通用性, 很难推广到一般情况, 因而在实际使用中有一定的困难。

本文分析了多种基于遗传算法的天线方向图优化中的目标函数使用方法, 在此基础上给出了一种能够适用于移动通信多数场合下阵列天线方向图综合的通用目标函数。

2 基于遗传算法的天线方向图优化中的目标函数

基于遗传算法的阵列天线方向图优化设计就是通过遗传算法来设计天线各个阵元的激励电流的幅度和相位 (某些

时候也包括阵元的位置),使得在空间的电磁场分布满足设计的要求。根据不同的设计目的,常用的目标函数有以下两种:

(1) 目标函数定义为设计方向图与计算方向图的相对误差,这类的目标函数都需要对于方向图先验知识^[11],如:

$$\text{fitness} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^Q P_0 |S_{di} - S_{ci}|} \quad (1)$$

其中 Q 是方向图的采样点数, $P_0 \in (0,1)$, S_{di} 和 S_{ci} 分别是方向图函数在采样点上的设计值和计算值。类似地,还有一种目标函数选取为

$$f^{(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M |T_i - E_i^{(n)}|^2}{\sum_{i=1}^M |T_i|^2}} \quad (2)$$

其中 n 表示遗传的代数, M 表示方向图的采样点数, T_i 和 E_i 分别表示方向图函数在采样点上的设计值和计算值。

这一类目标函数只能用在对方向图有先验知识的情况下,一般可以用于评估某种方向图综合算法逼近已知方向图的速度和逼近精度等场合。已知方向图表示为连续函数时,方向图函数目前只有切比雪夫、泰勒等有限几种表示方式。而方向图函数的数值表示方式的精度与采样点数直接相关,往往导致计算量、优化时间的增加。

(2) 目标函数定义为方向图各项性能指标的加权和,这类目标函数不需要关于方向图先验知识,如:

$$f^{(n)} = w_1 \cdot \frac{|\theta_0 - \theta_m^{(n)}|}{180^\circ} + w_2 \cdot \text{SLL}_{\max}^{(n)} + w_3 \cdot \frac{\theta_{\text{BWFN}}^{(n)}}{180^\circ} \quad (3)$$

θ_0 和 $\theta_m^{(n)}$ 分别是设计主瓣位置和计算主瓣位置, $\text{SLL}_{\max}^{(n)}$ 是最高旁瓣电平, $\theta_{\text{BWFN}}^{(n)}$ 是第一零限主波束宽度。这一类目标函数用于对天线方向图没有先验知识的方向图综合问题,一般用于移动通信、相控阵雷达等领域中的天线方向图优化问题。

目前公开报道的目标函数都仅仅局限于某几个性能指标,而且都针对特定的应用场合,往往无法全面地考虑到天线方向图综合的各个方面。

3 一种通用目标函数

在实际的无线通信中,往往干扰的数目会大于天线阵的自由度。在这种情况下,方向图不可能在各个干扰位置设置零陷来抑制干扰,而只能选择最强的若干个干扰来生成零陷;同时采用低旁瓣设计来抑制其它方向的干扰。为了使有用信号获得最大的输入值,方向图需要在有用信号的来波方

向形成主瓣,并且主瓣宽度应尽可能窄以抑制邻近的干扰。

由此看来,方向图的综合和优化是一个多目标多参数的非线性优化问题。由于信号、干扰和信道环境都是时变的,所以一般而言没有对方向图先验知识可以使用。在这种情况下,一般都采用方向图的性能指标作为优化目的来设计目标函数。以往的文献中所给出的目标函数功能单一,不能够适应实际的需要。

本文综合方向图的多个指标,扩展了式(3),增加了更多的适用于智能天线方向图综合的性能指标,给出了一个通用的用于遗传算法的目标函数:

$$\begin{aligned} \text{fitness} = & w_1 \cdot \frac{|\theta_0 - \theta_{\text{des}}|}{180^\circ} + w_2 \sum_{i=1}^N a_i \cdot \text{abs}(\text{SLL}_{\max}^i - \text{SLL}_{\text{des}}^i) \\ & + w_3 \cdot \frac{\theta_{\text{BWFN}} - \theta_{\text{BWFN}_{\text{des}}}}{180^\circ} \\ & + w_4 \sum_{i=1}^M b_i \cdot \text{abs}(\text{NULL}_{\theta_i} - \text{NULL}_{\text{des}_{\theta_i}}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 θ_0 和 θ_{des} 分别是计算主瓣位置和设计主瓣位置, SLL_{\max}^i 和 $\text{SLL}_{\text{des}}^i$ 是计算最高旁瓣电平和目标旁瓣电平, θ_{BWFN} 和 $\theta_{\text{BWFN}_{\text{des}}}$ 是第一零陷主波束计算宽度和设计宽度。 NULL_{θ_i} 是计算的 θ_i 位置的零陷深度, $\text{NULL}_{\text{des}_{\theta_i}}$ 是相应位置零陷的设计深度。 $w_i (i=1\sim 4)$ 为各项指标的权重系数。由于该目标函数主要用于移动通信中的阵列天线方向图综合和自适应优化中,天线的阵元位置不可调节,所以目标函数中没有阵元位置的信息。

权重因子的大小直接关系到目标函数的收敛趋向和收敛速度,必须分析目标函数中具体的各项取值来选择权重因子来平衡各项优化指标的寻优速度以取得一个最佳的全局最优解。通过分析和计算机仿真,权重因子的一般取值范围为: $w_1 \in [0.3, 0.5]$, $w_2 \in [0.9, 1.4]$, $w_3 \in [0.5, 0.8]$, $w_4 \in [0.1, 0.3]$, a_i 和 b_i 的取值由具体的各零陷和旁瓣的深度确定。

由此可见,该目标函数综合了方向图的主瓣位置、主瓣宽度、分段旁瓣电平、零陷位置和零陷深度等多项参数。同时考虑到不同的方向图要求,该目标函数的旁瓣控制和多个零陷控制都可以分段进行或者通过不同的加权系数来调节。在实际的遗传算法程序编制时,根据不同的方向图要求适当调整各项的权重即可。这个目标函数以方向图的性能参数为基本的优化目标,直接根据系统对于信号目标和干扰目标的方位和强弱来设计目标函数。

4 计算机仿真

为验证本文提出的通用目标函数的适用性,本文进行了

相关的计算机仿真。在以下的计算中都采用均匀直线阵列，阵元数为 10，阵元间距 $\lambda/2$ 。根据不同的设计目的来确定目标函数中的各项权重。相关结果如下：

图 1 是一个边射阵，激励电流相位为零，通过调节电流幅度来改变方向图，要求在 $40^\circ - 70^\circ$ 范围内均匀生成 7 个 -90dB 的零陷，旁瓣电平低于 -15dB 。经过 80 次遗传迭代，完全达到了设计要求。

图 2~4 是相位阵，激励电流幅度相同，通过调节电流相位来改变方向图，分别设置了不同的零陷位置、深度和主瓣的位置。图 2 结果对应的设计要求为旁瓣电平 -12dB ，主瓣位置和主瓣宽度分别为 90° 和 10° ，零陷位置为 $45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ$ ，零陷深度 -60dB ；图 3 结果对应的设计要求为旁瓣电平 -12dB ，主瓣位置和主瓣宽度分别为 90° 和 10° ，零陷位置为 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ ，零陷深度 -80dB ；图 4 结果对应的设计要求为旁瓣电平 -12dB ，主瓣位置和主瓣宽度分别为 130° 和 15° ，零陷位置为 $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ ，零陷深度 -70dB ；遗传代数分别为根据不同的设计要求在 $80^\circ - 120^\circ$ 之间。由图可见，均达到了设计要求。

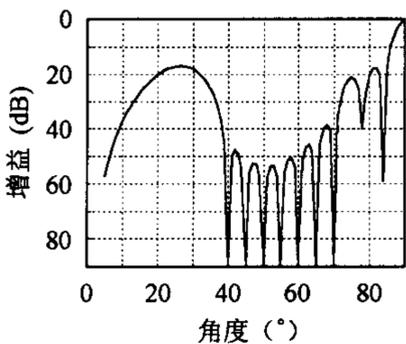


图 1 间距 1/2 波长 10 阵元边射阵

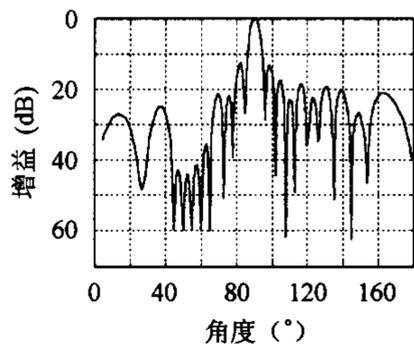


图 2 间距 1/2 波长 10 阵元相位阵($45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ$ 形成 -60dB 零陷)

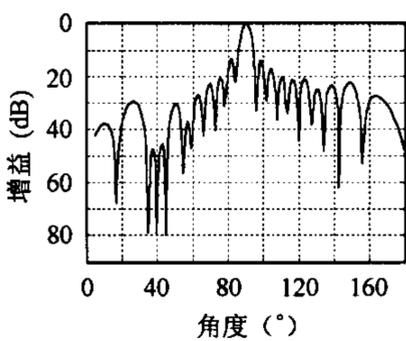


图 3 间距 1/2 波长 10 阵元相位阵($35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 形成 -80dB 零陷)

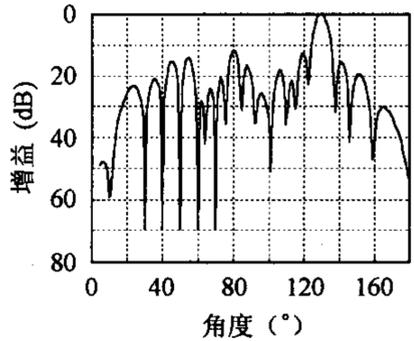


图 4 间距 1/2 波长 10 阵元相位阵($30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ 形成 -70dB 零陷)

图 5 和图 6 是幅度相位阵。激励电流和相位分别编码进行处理，则需要优化的参数会增加一倍。如果采用复数编码，则子代染色体的生成和繁殖方法相对复杂，此时需要略多染色体和遗传代数以获得较好的优化结果。图 5 结果对应的设

计要求为旁瓣电平 -12dB ，主瓣位置和主瓣宽度分别为 90° 和 10° ，零陷位置为 $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ ，零陷深度 -100dB ；图 6 结果对应的设计要求为旁瓣电平 -12dB ，主瓣位置和主瓣宽度分别为 90° 和 10° ，零陷位置为 $60^\circ, 80^\circ, 100^\circ, 130^\circ, 140^\circ$ ，零陷深度 -70dB 。由上述仿真结果可见，该方向图综合的目标函数可以适用于多种类型的实际应用，具有较好的通用性。同时，对于分段旁瓣电平控制和不均匀零陷深度的其他情况也进行了仿真，都得到了较好的结果，限于篇幅，本文不再给出方向图的优化结果。

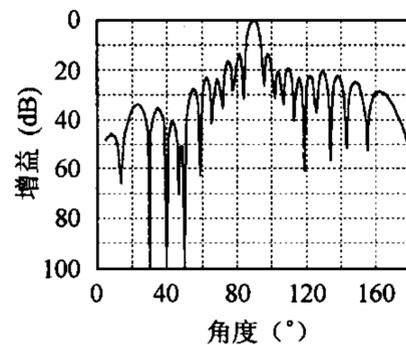


图 5 间距 1/2 波长 10 阵元幅度相位阵 ($30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 形成 -100dB 零陷)

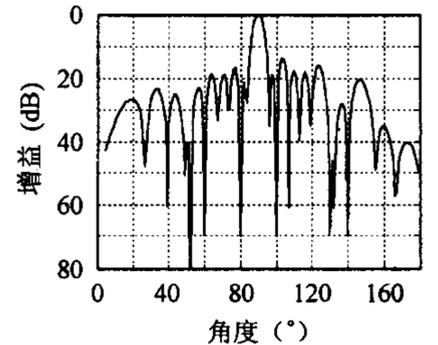


图 6 间距 1/2 波长 10 阵元幅度相位阵 ($60^\circ, 80^\circ, 100^\circ, 130^\circ, 140^\circ$ 形成 -70dB 零陷)

5 结束语

本文给出了一种适用于阵列天线方向图综合的通用目标函数，该目标函数不需要对于方向图的先验知识，因而适用于信号和信道时变的通信系统的天线方向图综合。该目标函数综合了在移动通信中多项需要考虑的因素，从最佳信号接收的角度出发，得到了一个包含方向图多个参数的混合目标函数。通过调节各项的权重，利用遗传算法卓越的全局寻优能力就能够得到最佳的优化结果。

计算机仿真表明，该通用目标函数具有较广的适用范围，能够满足多数阵列天线方向图综合的要求，具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 龚耀寰. 自适应滤波——时域自适应滤波和智能天线. 北京: 电子工业出版社, 2003 年 7 月, 第 9 章.
- [2] Altshuler E E. Design of a loaded monopole having hemispherical coverage using a genetic algorithm. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1997, 45(1): 1 - 4.
- [3] 马云辉. 阵列天线的遗传算法综合. *电波科学学报*, 2001, 16(2): 172 - 176.
- [4] Haupt R L. Phase-only adaptive nulling with a genetic algorithm. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1997, 45(6): 1009 - 1014.

- [5] Ares-Pena F J, *et al.*. Genetic algorithm in the design and optimization of antenna array pattern. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1999, 47(3): 506 – 510.
- [6] Ares F. Application of genetic algorithm and simulated annealing technique in optimizing the aperture distributions of antenna array patterns. *Electronics Letters*, 1996, 32(3): 148 – 149.
- [7] Haupt R L. Thinned arrays using genetic algorithm. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1994, 42(7): 993 – 999.
- [8] 任盛海, 吴志忠. 遗传算法在阵列天线方向图综合设计中的应用. *电波科学学报*, 1996, 11(4): 62 – 67.
- [9] Altshuler E E. Design of a vehicular antenna for GPS/IRIDUM using a genetic algorithm. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2000, 48(5): 968 – 972.
- [10] Godara L C. *Handbook of Antennas in Wireless Communication*. Boca Raton, London, New York, Washington, DC: CRC Press. 2003: 242 – 246.
- [11] Wang L L, Fang D G, Sheng W X. Combination of genetic algorithm (GA) and fast Fourier transform (FFT) for synthesis of arrays. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, 37(1): 56 – 59.
- 范 瑜: 男, 1976 年生, 硕士, 主要从事天线方向图综合、遗传算法及智能天线相关问题研究.
- 金荣洪: 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代通信天线理论和设计、数字波束形成技术、多波束天线、数值分析技术等领域的教学和研究工作.
- 刘 波: 男, 1978 年生, 博士, 主要从事天线分析与设计、阵列信号处理、电磁场数值计算等方面的研究工作.
- 耿军平: 男, 1972 年生, 博士, 主要从事智能天线和电磁兼容等方面的研究工作.