

# 一种基于FCGA的GPS自适应抗干扰算法

王伟<sup>1</sup>, 曹祥玉<sup>1</sup>, 刘振霞<sup>1</sup>, 王帅<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 安徽合力股份有限公司装载机事业部研究所, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**针对GPS卫星信号功率微弱易受干扰的特点,提出了一种基于浮点数编码遗传算法(Floating point number Coded Genetic Algorithm,FCGA)的GPS自适应抗干扰算法。首先分析了自适应阵的输出信号,给出了自适应阵方向图与加权矢量的关系式。然后根据线性约束最小方差准则,得到了一个有约束的多参量目标函数,并采用浮点数编码遗传算法对其进行优化。最后为了验证该算法的有效性,以22单元改进的均匀圆形阵为研究对象,分别对自适应阵的方向图和输出信号干扰噪声比(SINR)进行了计算机仿真。结果证明,该方法能够在多个期望信号方向保持较高波束增益,同时在干扰信号方向形成很深的波束凹陷。在强干扰情况下,输出信号干扰噪声比SINR能够保持在定值附近,而不随着输入干扰功率的增加而降低,达到了抑制干扰的设计目的。

**关键词:**全球定位系统;自适应天线;遗传算法;干扰抑制

**中图分类号:** TN820.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)05-0043-05

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)<sup>\*</sup>是一种全天候、实时性的导航定位系统。现已广泛地应用于各个领域。尽管GPS采用了DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum)技术,但是由于GPS卫星发射的导航信号功率很微弱(1 575.42 MHz的信号在地球表面的最小信号功率约为-160 dBW;而1 227.6 MHz的信号到达地球表面时其最小信号功率为-166 dBW<sup>[1]</sup>),GPS接收机很容易因受到干扰而无法正常工作。飞行试验证明,飞机上的GPS接收机在干扰信号功率为-125 dBW-130 dBW时就会丢失卫星信号的码元和载波,从而失去定位能力<sup>[2-3]</sup>。加载自适应调零天线是解决此问题的主要方法之一。自适应天线是一种在工作时通过反馈来自行控制其方向图的天线系统,它可以改变天线方向图波束的指向,使方向图主波束对准期望信号方向,零陷对准干扰信号方向,提高输出信号干扰噪声比。常见的自适应算法有最小均方(LMS)算法<sup>[4]</sup>,阿普尔鲍姆(HA)算法<sup>[5]</sup>,采样矩阵求逆(SMI)算法<sup>[6]</sup>,以及递归最小二乘(RLS)算法等。这些算法,对于具有“凸性”的解空间,能够很快的收敛,并搜索到最佳值。但是对于多峰函数来说,可能会陷入局部的最优解。同时,自适应天线在工程应用时,往往要优化多个参数,而且所求解的目标函数具有非线性、不可微甚至不连续性,这些都使上述传统的自适应算法无法有效工作。遗传算法是近年来在智能算法领域提出的解决工程优化问题的一种有效方法,它在解决大空间、非线性全局寻优的复杂问题时,具有传统方法难以比拟的独特优越性能<sup>[7-11]</sup>。而且其初始值是随机产生的,将其应用于GPS卫星信号时,具有较小的硬件复杂性。本文根据线性约束最小方差准则,运用遗传算法的思想构造了自适应算法,并对22单元改进的均匀圆形阵进行了仿真,编制了fortran程序计算其方向图。结果表明,该算法能够保持期望信号方向增益基本不变,同时能够在干扰信号方向形成很深的波束凹陷,达到了抑制干扰的设计目的。

收稿日期:2008-02-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60671001);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2005F21);西安市工业攻关基金资助项目(GG06020)

作者简介:王伟(1979-),男,陕西西安人,博士生,主要从事EBG结构、自适应天线研究;

E-mail:wangweishaanxi@yahoo.com.cn

曹祥玉(1964-),女,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事相控阵天线、电磁场数值计算,电磁兼容等研究。

### 1 问题的数学模型

考虑由  $N$  个天线单元组成的自适应阵,如图 1 所示。定义信号矢量为  $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ ,它包括期望信号,干扰信号和噪声信号。设权值矢量为复数矢量  $W = [w_1, w_2, \dots, w_N(t)]^T$ ,阵列输出信号为  $y(t)$ 。假设这是一个窄带信号,则第  $k$  个阵元上的感应信号为

$$x_k = A(t) e^{j[\omega t + \varphi(t)]} f_k(\theta) e^{-j\phi_k(\theta)}, k = 1, 2, \dots, N \tag{1}$$

式中: $\theta$  为信号来波的入射角; $A(t)$  为信号幅度调制; $\varphi(t)$  为信号相位调制; $f_k(\theta)$  表示第  $k$  个阵元的方向图; $\phi_k = k \cdot r_k$  是入射信号在各个阵元处产生的传播相位差(相对于第 1 个阵元), $k$  是波数矢量, $r_k$  是第  $k$  个阵元位置矢量。

信号矢量可以表示成:

$$X = A(t) \exp^{j[\omega t + \varphi(t)]} U \tag{2}$$

式中,矢量  $U$  为信号的方向矢量

$$U = [f_1(\theta), f_2(\theta) e^{-j\phi_2}, \dots, f_N(\theta) e^{-j\phi_N}]^T \tag{3}$$

天线阵是改进的  $N$  元均匀圆形阵,如图 2 所示。其中  $M$  个阵元等间隔放置在圆周上(圆半径为  $2\lambda$ ), $L$  个阵元均匀排列在 Y 字形的 3 个边上(阵元间隔为  $\lambda/2$ )。设  $N = M + L$ 。

故自适应阵的输出信号  $y(t)$  由阵列输入信号  $X(t)$  和复数权值  $W$  相乘得到,即:

$$y(t) = \sum_{k=1}^N x_k(t) w_k = A(t) \exp\{j[\omega t + \varphi(t)]\} \sum_{k=1}^N f_k(\theta) w_k \exp\{-j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos[\frac{2\pi}{N}(k-1) - \theta]\} \tag{4}$$

其归一化方向性函数为

$$F(\theta) = \sum_{k=1}^N f_k(\theta) w_k \exp\{-j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos[\frac{2\pi}{N}(k-1) - \theta]\} \tag{5}$$

输出信号的功率为

$$P_o = \frac{1}{2} E[|y(t)|^2] = \frac{1}{2} E[(W^T X)(X^T W)] = \frac{1}{2} W^H R_{XX} W \tag{6}$$

式中: $R_{XX} = E[X(t)X^T(t)]$  为输入信号的自相关矩阵; $[\ ]^*$  表示共轭; $[\ ]^H$  表示共轭转置。

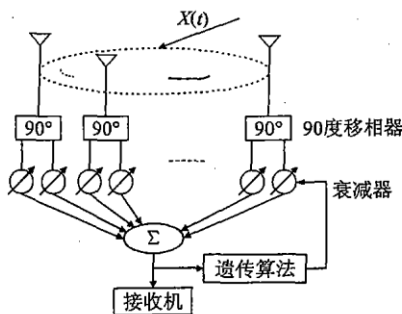


图 1 自适应阵结构图

Fig. 1 The structure chart of an adaptive array

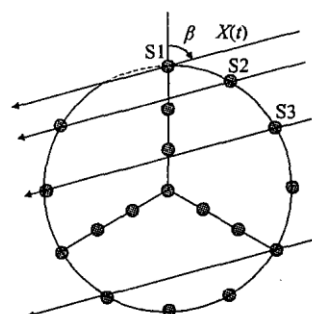


图 2 改进的均匀圆形阵

Fig. 2 An improved uniform circular array

### 2 基于浮点数编码的遗传算法

由于 GPS 卫星信号很微弱,约  $-160$  dBW 左右,比接收机的内部热噪声功率( $-140$  dBW  $-130$  dBW)低  $20$  dBW  $-30$  dBW<sup>[12]</sup>,而干扰信号是强信号。所以,在保证有用信号增益基本不变的情况下,使阵列输出功率最小,就能抑制干扰信号,同时保留期望信号。因此,根据 LCMV(线性约束最小方差)准则,可知天线阵的

自适应权值应满足

$$\begin{cases} \min_w E[|y(t)|^2] = \min_w W^H R_{XX} W \\ w_1 = 1 \end{cases} \tag{7}$$

自适应算法的目标就是求出的最佳权值,使其满足上式。这里引入了约束条件  $w_1 = 1$ , 是为了防止无约束的优化问题得到无意义的解  $w_1(t) = w_2(t) = \dots = w_N(t) = 0$ 。

本文将遗传算法用于自适应天线,应用遗传算法搜索最优的  $w_2(t), w_3(t), \dots, w_N(t)$ ,使其满足式(7)。由于要搜索的变量数目很多,而且要求精度很高。传统的遗传算法,多采用二进制编码,要达到所需的精度,染色体长度很大。使遗传算法性能变得非常低,搜索时间很长。为了克服这一不足,本文将浮点编码的遗传算法(Floating number Coded GA, FCGA)应用于自适应天线,直接将  $2(N-1)$  个参量作为基因,依次排列构成染色体。提高了运算效率,实现了自适应天线波束控制的目标。下面以 22 元改进的均匀圆形阵为例,给出了算法的具体步骤,如图 3 所示。

**步骤 1** 产生初始种群。设种群中个体数目为  $m$ ,  $v_i^t$  表示第  $t$  代的第  $i$  个个体,  $i = 1, 2, \dots, m$ 。每个个体的基因位数为  $L = n$ , 即每个染色体有  $n$  个浮点数组成。这样搜索的解空间为  $v_i^t \in \mathbf{R}^n$ 。对于 22 元阵,要优化 21 个复数权矢量( $w_1$  是约束条件,不需优化)。因为每个复数可用两个浮点数组来描述,所以选择  $m = 20, n = 42$ , 构成初始种群。

**步骤 2** 个体评估。算法以适应度函数作为依据,评价个体的好坏。这里所求的是目标函数式(7)的最小值,因此构造适应度函数如式(8)所示。适应度函数为

$$\text{Fit} = 1/W^H R_{XX} W = \left\{ \sum_{k=2}^N \sum_{l=2}^N w_j w_k E[x_k(t) x_l(t)] \right\}^{-1} \quad (8)$$

**步骤 3** 选择优良个体。目的是为了从当前种群中选出优良个体。准则是使优良个体(即适应度高的个体)被选中的概率大。设个体的选择概率为  $p_k = \text{Fit}_k / \sum_{k=1}^m \text{Fit}_k$ , 累计概率为  $q_k = \sum_{j=1}^k p_j$ , 并根据转轮法选择优良个体,构成下一代种群。

**步骤 4** 基因重组,交叉。把 2 个父个体的部分基因加以替换而生成新个体的操作叫基因重组(Crossover)。设交叉概率为  $p_c = 0.3$ 。记配对的父代个体为  $v_i^t$  和  $v_j^t$ , 则子代个体的产生按下列公式进行:

$$v_{i+1}^1 = v_i^1 + c(v_i^1 - v_j^2) \quad (9) \quad v_{i+1}^2 = v_j^2 + c(v_j^2 - v_i^1) \quad (10)$$

其中,  $c \in [0, 1]$  是一个比例因子,由  $[0, 1]$  上的均匀分布的随机数产生。

**步骤 5** 变异操作。设变异率为  $p_m = 0.01$ 。为使每个基因都有相同的机会发生变异,首先产生  $[0, 1]$  间均匀分布的随机序列  $r_k, k = 1, 2, \dots, 2L(N-1)$ 。取  $r_k < p_m$  的  $k$  值所对应的基因作为变异操作的对象。然后按照下式进行变异操作:

$$X' = X \pm d \quad (11)$$

$d$  为一个很小的随机数扰动。这里取  $d = 0.5\rho \sum_{k=0}^{m-1} \frac{a(k)}{2^k}$ ,  $a(k)$  以概率  $1/m$  等于 1, 以概率  $1 - 1/m$  取值

0, 同时令  $m = 20$ ;  $\rho$  为变量的取值范围。

**步骤 6** 种群更新。将交叉、变异后产生的新子代个体组成新一代种群。

**步骤 7** 判断是否满足结束条件。如果是,结束搜索;如果不是,则再返回执行步骤 2。

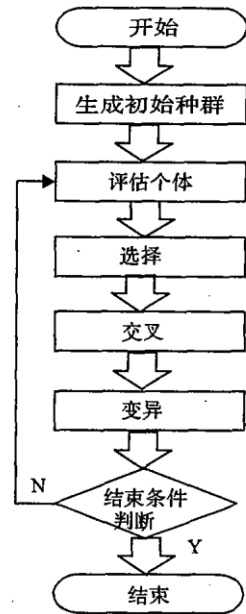


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

### 3 仿真结果

为了验证本文提出自适应方法的抗干扰性能,在计算机上作了仿真。设由 22 元各向同性的天线阵元组成改进的均匀圆形自适应阵(如图 2 所示),其中,15 个阵元均匀分布在圆周上(圆周半径为  $2\lambda$ ),7 个阵元在圆周中心成 Y 字型排列(间隔为  $\lambda/2$ )。阵元方向函数为  $f_i(\theta) = 1$ 。分别仿真了天线方向图和输出信号干扰噪声比 SINR。仿真结果如下:

#### 1) 方向图仿真结果

1个干扰时的情况,如图4所示。仿真环境为,6个GPS卫星信号的功率均为 $-160\text{ dBW}$ ,其来向方位角分别为 $(20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 95^\circ, 340^\circ)$ ;1个干扰信号的功率为 $-80\text{ dBW}$ ,来向方位角为 $60^\circ$ 。接收机内部热噪声功率为 $-140\text{ dBW}$ 。从图中可以看出,自适应阵在6个GPS信号方向增益比较大,而且很平坦,分别为 $(-1.05\text{ dB}, -2.06\text{ dB}, -0.61\text{ dB}, -1.72\text{ dB}, -1.81\text{ dB}, -1.96\text{ dB})$ 。同时,在干扰信号方向形成了很深的凹陷,衰减为 $-83.28\text{ dB}$ 。这说明了,该算法能够控制自适应阵达到期望的波束形状,在期望信号方向形成主波束,在干扰信号方向形成波束凹陷,实现了抑制干扰的目的。

2个干扰时的情况,如图5所示。仿真环境为,GPS卫星信号来向分别为 $(10^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 50^\circ, 145^\circ, 300^\circ)$ ,功率均为 $-160\text{ dBW}$ ,2个干扰信号来向分别为 $(35^\circ, 310^\circ)$ ,功率为 $-100\text{ dBW}$ ,接收机内部热噪声功率为 $-140\text{ dBW}$ 。从图中可以看出,自适应阵在6个GPS卫星信号方向的增益较大,分别为 $(-2.82\text{ dB}, -0.07\text{ dB}, -7.70\text{ dB}, -2.18\text{ dB}, -6.14\text{ dB}, -3.26\text{ dB})$ ,在2个干扰信号方向形成了很深的波束凹陷,增益分别为 $(-66.09\text{ dB}, -66.03\text{ dB})$ 。这同样证明了该算法是有效的。

## 2) 信号干扰噪声比 SINR 仿真结果

设仿真环境为6个GPS卫星信号的功率均为 $-160\text{ dBW}$ ,来向分别为 $(10^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 50^\circ, 145^\circ, 300^\circ)$ ,2个干扰信号来向分别为 $(35^\circ, 310^\circ)$ ,接收机内部热噪声功率为 $-140\text{ dBW}$ 。令干扰信号功率从 $-160\text{ dBW}$ 逐渐增强到 $-100\text{ dBW}$ ,对输出端信号干扰噪声比进行仿真,图6是仿真结果。

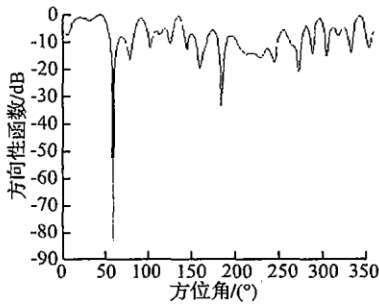


图4 1个干扰时的方向图

Fig. 4 The radiation pattern for one interference signal

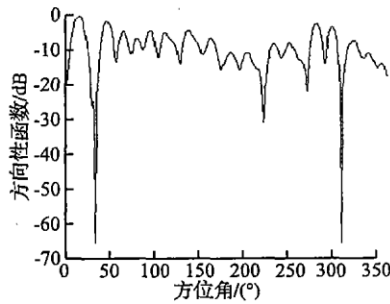


图5 2个干扰时的方向图

Fig. 5 The radiation pattern for two interference signals

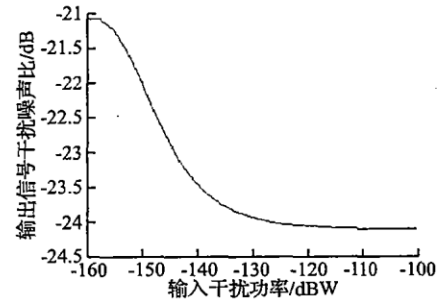


图6 输出 SINR 与输入干扰功率关系图

Fig. 6 The chart of output SINR versus input interference power

可以看出,随着干扰功率的增加,输出信干噪比SINR起初有一定下降,大约由 $-21.1\text{ dB}$ 降到 $-24.2\text{ dB}$ ,之后几乎保持不变。

这说明了,起初干扰功率较小时,干扰几乎不对控制加权的反馈环产生任何影响,自适应阵几乎对干扰的增加没有响应。输出 SINR 随着输入干扰功率的增加而线性下降。但这并不会影响接收机的正常工作,因为此时的干扰本身很小,天线阵输出端的信干噪比(SINR)仍然较高。

当干扰较大时,自适应阵对干扰开始响应,在干扰方向形成了很深的波束凹陷。因此随着输入端干扰的增加,自适应阵输出端 SINR 不会降低,几乎一直保持在定值附近。可见在对抗强干扰时,自适应阵有着显著的优势。

## 4 结束语

遗传算法是一种全局优化算法,本文提出了一种基于浮点编码遗传算法的GPS自适应抗干扰方法。该方法采用了浮点数编码,增大了算法搜索空间,提高了收敛速度。仿真证明,用本文方法,能够在期望的GPS信号方向保持较高波束增益,同时在干扰信号方向形成很深的波束凹陷。在强干扰情况下,输出信干噪比SINR能够保持在定值附近,而不随着输入干扰功率的增加而降低,可见该方法达到了设计目的,在强干扰情况下,性能优良。

## 参考文献:

[1] 廖勇军. GPS及其抗干扰技术[J]. 飞航导弹,2006,18(8):46-49.

LIAO Yongjun. Anti-jammer Processing for GPS Receiver[J]. Flight and Missile Technology, 2006, 18(8):46-49. (in

- Chinese)
- [2] 何川. GPS制导与干扰[J]. 电子对抗技术, 2003, 18(6): 31-32.  
HE Chuan. GPS Navigation and Interference[J]. Electronic Technology for Anti-interference, 2003, 18(6): 31-32. (in Chinese)
- [3] 刘勇, 武昌, 陈校平, 等. 基于GPS的仪表着陆系统飞行检验建模[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(4): 20-23.  
LIU Yong, WU Chang, CHEN Xiaoping, et al. The Modeling of Instrument Landing System Flight Inspection Based on GPS[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2006, 7(4): 20-23. (in Chinese)
- [4] Widrow B, McCool J, Ball M. The Complex LMS Algorithm[J]. Proceedings of the IEEE, 1975, (4): 719-720.
- [5] Applebaum S P. Adaptive Arrays[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1976, 24(5): 585-595.
- [6] Horowitz L L, Blatt H, Brodsky W G, et al. Controlling Adaptive Antenna Arrays with the Sample Matrix Inversion Algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1979, 15(6): 840-849.
- [7] HOLLAND J H. Genetic Algorithms[J]. Scientific American, 1992, 267(4): 44-50.
- [8] LIAO W P, CHU F L. Application of Genetic Algorithms to Phase-only Null Steering of Linear Arrays[J]. Electromagnetics, 1997, (17): 171-183.
- [9] Massa A, Donelli M, Francesco G B, 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.
- [10] Johnson J M, Rahmat Samii V. Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetics[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1997, 39(4): 7-21.
- [11] Massa A, Donelli M, Francesco G B, 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.
- [12] 孙晓昶, 皇甫堪, 程翥, 等. GPS接收机联合空时抗干扰方法[J]. 通信学报, 2003, 24(9): 93-102.  
SUN Xiaochang, HUANGPU Kan, CHENG Zhu, et al. Joint Space-time Anti-jammer Processing for GPS Receiver[J]. Journal of China Institute of Communications, 2003, 24(9): 93-102. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

## An Adaptive Algorithm Based on FCGA for GPS Interference Cancellation

WANG Wei<sup>1</sup>, CAO Xiang-yu<sup>1</sup>, LIU Zhen-xia<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>2</sup>

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Loader Vehicle Institute, Anhui Heli Co. LTD., Hefei 230601, Anhui, China)

**Abstract:** Focusing on the problem that the GPS signal is susceptible to interference, an adaptive anti-jamming algorithm based on FCGA (Floating point number Coded Genetic Algorithm) is presented. First, according to the analysis of the output signal of the adaptive array, the relation formula between the radiation pattern of the adaptive array and the weighted vectors is induced. Then, the objective function with constraint conditions is obtained by LCMV criteria (Linear Constrained Minimum Variance criteria) and optimized by using the FCGA. Finally, the simulation experiment of 22-unit uniform circular array is carried out for its radiation pattern and output SINR. The results show that, by using this method, the main beam can be kept in the directions of the desired signal, and simultaneously the hollow beam is formed in the directions of the interference signal. Thus, the output SINR is not depressed, but kept constant. The goal of interference cancellation is achieved.

**Key words:** GPS; adaptive antenna; genetic algorithm; interference cancellation