基于幅相扰动的改进 Memetic 算法的波束成型算法

李方伟[1],张海波[1],张　浩[1],郭天科[2]
(1. 重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室,重庆 400065; 2. 江苏省邮电规划设计院有限公司 西南分院,四川 成都 610036)

摘　要:为了提高天线波束成型算法的收敛性能,基于改进的 Memetic 算法对幅相扰动最优权值的搜索,提出了一种新的上行 MIMO-SDMA 智能天线系统的波束成型算法。仿真结果表明,该算法具有很好的收敛性能和较高的效率,基于该算法的智能天线系统不仅能够对干扰方向进行自适应控零而且还能同时使最大增益主瓣与期望信号的方向一致,使系统的信噪比得到提高,很好地实现上行 MIMO-SDMA。

关键词:波束成型算法;改进的 Memetic 算法;MIMO-SDMA
中图分类号:TN914　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1673-825X(2010)01-001-05

Beamforming algorithms by phase-amplitude perturbations based on improved Memetic algorithms

LI Fang-wei[1], ZHANG Hai-bo[1], ZHANG Hao[1], GUO Tian-ke[2]
(1. Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China;
2. Southwest Branch of Jiangsu Posts and Telecommunications Planning and Designing Institute Co., Ltd, Chengdu 610036, P. R. China)

Abstract: For improving the convergence performance of antennas beamforming algorithms, this paper proposes a new MIMO-SDMA of smart antennas beamforming algorithm based on research of optimization vector value of phase-amplitude perturbations by improved Memetic algorithm. Simulation results show that this algorithm has good convergence performance and convergence efficiency; the system based on the algorithm can adjustably suppress interferers by placing nulls at the directions of the interfering sources and provide a maximum main lobe in the direction of the desired signal at the same time; thus, the signal to interference ratio of the system is increased, and the uplink MIMO-SDMA can be achieved.

Key words: beamforming algorithms; improved Memetic algorithms; MIMO-SDMA

0　引　言

与传统的单天线系统相比,输入和输出均使用多个天线的多输入多输出(multiple input multiple output,MIMO)系统能够提高信道容量[1]。实现 MIMO 信道高容量的技术主要有 2 种:空时编码(space-time coding)和空间复用(spatial division multiplexing)。空时编码是利用空间分集增益和编码增益来降低信息传输的误码率,空间复用则是通过利用 MIMO 信道中各空间子信道的不同空间特性来提高传输速率。随着近年来 MIMO 研究的兴趣由点对点系统向多用户系统的转移,空间复用也被引入到多用户 MIMO 系统的多址方案设计中来,这就是空分多址(spatial division multiple access, SDMA)。SDMA 允许多个用户在同一无线信道中传输信息,这样可以增加频谱利用率。所以 MIMO-SDMA 可以大幅度地提高频谱的利用率和系统容量。空分多址技术的关键问题在于利用不同用户的空域特性来分离这些用户。我们知道,SDMA 是通过智能天线技术来实现的,而智能天线其实是一组相关的天线阵元在空间构成一定的几何形状(如直线或平面等)而成。在本文中主要讨论的是均匀直线型天线阵列。

智能天线技术研究的核心是波束形成算法,2 种传统的波束成形算法是最小均方误差算法(minimum meam squared error,MMSE)和线性约束最小方差算法(linearly control minimum variance,LCMV),但是它们都是在输入端信号已知的前提下,并且都是基于梯度法求最优权值的算法,因此这 2 种算法

收稿日期:2009-02-24　**修订日期**:2009-10-20
基金项目:国家科技重大专项(2009ZX03001-004);重庆市重大产业技术开发项目(20091537);重庆市发改委资金资助项目(20041072)

都有各自的不足。文献[2-3]提出了一种基于遗传算法的智能天线波束形成算法,遗传算法具有较强的鲁棒性和较高的搜索效率,可以应用在很多领域,也可以用在智能天线中。在本文中,一种新的算法(改进的 Memetic 算法)将被应用在智能天线的辐射方向图的最优化问题中。Memetic 算法是一种群体局部优化算法,它是在传统遗传算法的基础上,通过局部邻域搜索使每个演化代的所有个体都达到局部最优,从而大大提高算法的执行速度和性能。Memetic 算法对天线阵列的幅相扰动进行最优权值的搜索,这种基于最优天线辐射方向图的设计方法相比基于零限和主瓣的设计方法有不同的收敛准则,它不仅可以对干扰方向进行抑制还可以使最大增益主瓣对准期望信号的方向[4]。该算法可以通过2个方向(向上和向下)的收敛同时处理不同的输入信号且不需要知道输入端的值,而且我们知道基于梯度法往往得到的是局部最优值,但是 Memetic 算法通过染色体的突变可以提供全局的搜索能力,从而避免了收敛在局部的最优值。

在智能天线系统中会有许多用户信号同时享有相同的信道,所以会产生信号间的多址干扰和多径干扰[5]。上行 MIMO-SDMA 可以通过不同用户信号的空间特性来完成信号的分离和避免信号间的干扰。上行天线辐射方向图最优化方法可以实现 MIMO-SDMA,而且它适用于实际的无线移动通信系统[6]。

1 信号模型

基于幅相扰动的改进 Memetic 算法的均匀线阵智能天线的上行系统模型如图1所示。在本文中的天线阵列采用的是均匀直线阵列,天线阵元数为 $2N$, θ_m 是第 m 个用户信号的入射方向与天线阵元的夹角,采用改进 Memetic 算法是以遗传算法作为整体框架,再利用局部搜索技术使每个演化代的所有个体都达到局部最优,新算法结合了这2个方法的特点,克服了他们的不足。此外,本算法还会对传统遗传算法的交叉和变异过程进行改进,以提高算法的收敛速度和局部搜索能力。

对于阵元数为 $2N$ 的均匀直线阵列,用户信号从与阵列法线方向成 θ_m 的方向入射到任意2个距离为 d 的相邻阵元 n 和 $n+1$ 上,如图2所示。从图2中可以明显地看出信号是先到达阵元 n,再到达阵元 $n+1$,到达的时间差 τ 可以表示为

$$\tau = d\sin\theta_m / v \tag{1}$$

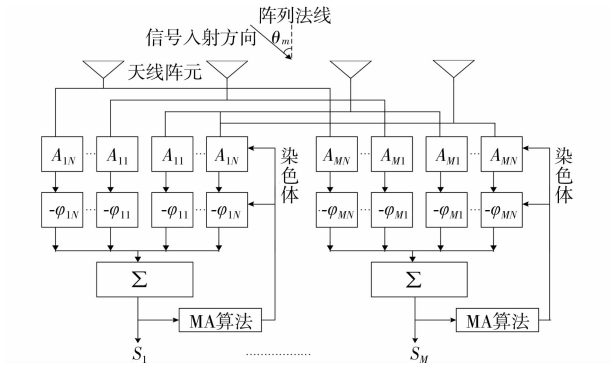

图1 均匀线阵智能天线的上行系统模型

Fig. 1 Uplink smart antenna system model of equality line array

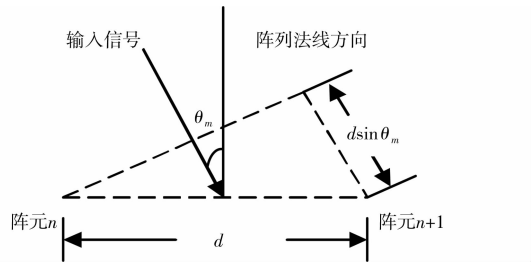

图2 输入信号入射到任意2个相邻阵元

Fig. 2 Incident signal reaching any two adjacent elements

(1)式中,v 是无线电波传播的速度。把 τ 变换到相应的相位 ψ 中表示为

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} d\sin\theta_m = kd\sin\theta_m \tag{2}$$

(2)式中,k 是电波传播的系数。所以智能天线系统的自适应阵列接收到用户 m 的信号为

$$AF_m(\theta_m) = \frac{1}{M}\sum_{n=1}^{2N} \boldsymbol{w}_{mn} e^{j(n-1)\psi}, m = 1, 2, 3, \cdots, M \tag{3}$$

(3)式中:M 是系统中用户的总数;$\boldsymbol{w}_{mn}$ 是第 n 个天线阵元接收用户 m 信号的权向量,它可以用幅度的权向量和相位的权向量来表示

$$\boldsymbol{w}_{mn} = \boldsymbol{A}_{mn} e^{j\boldsymbol{\varphi}_{mn}} \tag{4}$$

那么自适应阵列接收用户 m 的信号可以表示为

$$AF_m(\theta_m) = \frac{1}{M}\sum_{n=1}^{2N} \boldsymbol{w}_{mn} e^{j(n-N-0.5)\psi} = \frac{1}{M}\sum_{n=1}^{2N} \boldsymbol{A}_{mn} e^{j[(n-N-0.5)\psi+\boldsymbol{\varphi}_{mn}]}, m = 1, 2, 3, \cdots, M \tag{5}$$

所以假设幅度的权向量是偶对称,相位的权向量是奇对称的,(5)式可以简化为

$$AF_m(\theta_m) = \frac{2}{M}\sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{A}_{mn}\cos[(n-0.5)\psi + \boldsymbol{\varphi}_{mn}],$$

$$m = 1, 2, 3, \cdots, M \tag{6}$$

2　最佳天线方向图的 MA 算法

该算法是基于天线阵列在干扰信号方向和期望信号方向上的功率来调整相位和幅度的激励,所以本文设定的目标函数 $OF_m(\theta_m)$ 就是(6)式的 $AF_m(\theta_m)$ 的平方,它表示为

$$OF_m(\theta_m) = \{\frac{2}{M}\sum_{n=1}^{N}\boldsymbol{A}_{mn}\cos[(n-0.5)\psi + \boldsymbol{\varphi}_{mn}]\}^2,$$
$$m = 1,2,3,\cdots,M \tag{7}$$

目标函数的选取直接决定算法的收敛性能,本文的目标函数是为了使接收到的干扰信号的功率最小化和期望信号的功率最大化。在该混合遗传算法的迭代过程中,下一代的天线阵子激励应该比上一代的激励使期望输出信号的功率单调增加,并且使干扰输出信号功率单调减小,因此该算法可以提高系统的信噪比。

在实际应用中,通常将目标函数作为适应度函数来使用,这样可以使适应度函数更接近于实际问题。为了加强算法的效率,常常也对目标函数进行某种变换作为适应度函数。本文的适应度函数设计是基于适应度函数表示天线阵列所产生的方向图与最优方向图的差异,首先计算出每个染色体的方向图与规定的理想方向图的误差,再对该误差作变换得到适应度。误差越大,适应度越低,误差越小,适应度越高。在计算误差时,采用了最大误差的形式,即计算实际天线阵列方向图与最优方向图在各个取样点的误差,然后找出误差的最大值,优化的目的就是使最大误差减小到最小,这样就使实际方向图更接近最优方向图。

智能天线的上行最佳方向图的改进 Memetic 算法的一般步骤如下所示。

步骤 1　随机产生由 P 个染色体构成的初始种群。染色体(阵子扰动)是由很多基因(扰动)构成的,在天线阵列问题中对于用户 m 的信号接收,基因就是幅度扰动 $\boldsymbol{a}_{mn}$ 和相位扰动 $\boldsymbol{\beta}_{mn}$,所以第一步就是随机产生一个矩阵向量 $(\boldsymbol{a}_{mn},\boldsymbol{\beta}_{mn})$,其中 $m = 1, 2,3,\cdots,M, n = 1,2,3,\cdots,N$,$M$ 是系统中用户数,N 是天线的阵元数的一半,P 为染色体数目。染色体数目的选择也是一个比较关键的问题,首先种群中染色体的个数要满足进化的要求,如果初始种群数太小就会在进化过程中出现局部收敛,影响寻优质量,而如果群众数太大就会增加算法的复杂度,影响算法的收敛速度,所以一般在天线阵列滤波问题中,应根据天线阵列的数目合理地选择初始种群的大小。本文中初始种群的染色体数目 P 取 50。由于染色体的基因(天线阵列的扰动)是实数,如果用二进制编码表示,除了造成精度上的损失外,还会带来大量的编码、译码运算,增加不必要的复杂度,因此,编码时染色体的每一个基因用十进制实数表示,可以直接求染色体的适应度,而不必进行译码操作,与此相对应,本算法中的交叉和变异算子设计成十进制形式的操作。

步骤 2　计算每个染色体的适应度值。把以上随机产生的染色体的扰动代入阵列的方向图函数,并与目标函数作差,取每个染色体方向差的绝对值的倒数为其适应度值。如果一个染色体既能增加期望信号的功率又能减小干扰信号的功率,即它最接近最优方向图的扰动,那么它的适应度值就越高。

步骤 3　选择。即根据一定的算法,配合适应度值选择再生个体。本文依据适应度值采用赌轮盘算法进行选择,这样适应度高的个体生存下来的可能性大,也就是说接近目标方向图函数扰动的个体保留下来的可能性大。

步骤 4　交叉和变异运算。交叉运算从本质上来讲其最基本的用意就是通过随机选择种群中的 2 个染色体并将其基因位交叉以产生一个新的个体,新的个体不仅具有交叉前父个体的所有特性,同时又扩大了种群的多样性,这里交叉概率设为 p_c。由于本文中编码方法是用实数十进制数编码,所以不用传统的二进制一点或多点的交叉运算,而采用十进制线型交叉运算,即对于 2 个父代在同一交叉点位置上的基因,设交叉前的值为 p_1 和 p_2,则交叉后的子代值为

$$c_1 = (2p_1 + p_2)/3, c_2 = (p_1 + 2p_2)/3 \tag{8}$$

这样,如果 p_1 和 p_2 相等或接近时,c_1 和 c_2 等于或接近 p_1 和 p_2;如果 p_1 和 p_2 不同时,则产生了新的基因,达到了全局搜索的目的。而变异运算则是对群体中的个体的某些基因作变动,主要目的是防治出现未成熟收敛现象,以提高寻优的效率和质量。在遗传算法中,交叉运算和变异运算都是为了提高算法的全局收敛能力,这里设变异概率为 p_m。由于在进化初期,染色体的差异较大,p_c 大和 p_m 小有助于加快收敛,而在进化中后期,p_c 小和 p_m 大有助于跳出局部最优,所以程序中 p_c 和 p_m 可分别按照(9)和(10)式进行变化,以提高算法的性能。

$$p_c(G) = p_c(G-1) - (p_c(0) - 0.25)/\max G \tag{9}$$

$$p_m(G) = p_m(G-1) + (0.55 - p_m(0))/\max G \tag{10}$$

(9),(10)式中:$p_c(0) = 0.85$;$p_m(0) = 0.1$;$\max G$表示最大进化迭代次数。

步骤5 采用爬山法进行局部搜索,就是把种群中的个体进行适应值比较以选择其中的最优值。其具体步骤如下:

步骤5.1 在种群中随机产生一个初始个体x。

步骤5.2 比较初始个体x和种群中的一个当前个体y。

步骤5.3 如果y的适应值优于初始个体x,那么就用个体y取代个体x再返回步骤5.2 。

步骤5.4 如果当前解不如种群中已比较的前L个任意一个个体,即当前的个体是已选的前L个个体中适应值最差的一个时,结束这个程序,否则返回步骤5.2。

步骤6 判断是否满足本算法的终止条件,如果满足,则停止计算,输出当前的最优值;如果不满足,则返回步骤2。

本算法结合了遗传算法和局部搜索算法的优点,克服了它们的不足,并对传统遗传算法中的交叉和变异运算做出改进,大大提高了算法的收敛速度和收敛性能。

3 仿真和分析

在本文中均匀直线阵列由20个天线阵元组成,所以$N=10$,相邻阵元之间的距离d为半个波长。幅度权向量$\boldsymbol{\alpha}_{mn}$的值在[0.1,1]中随机产生;相位权向量$\boldsymbol{\beta}_{mn}$的值在[$-\pi,\pi$]之间随机产生。染色体P的数量为20,选择生存率p_s为0.5,交叉概率为p_c,变异概率为p_m。假设用户信号和干扰信号分别从与阵列法线成0°,60°和-60°的方向入射到天线阵列,所以整个系统的用户数M为3。这里该算法的终止条件设为$L=150$,且迭代次数为200次。

图3给出了采用混合遗传算法与采用传统遗传算法的收敛特性的比较。该2种算法的参数设置相同。图3中的曲线是仿真运行100次所得结果的统计平均。可以看到,混合遗传算法的收敛性能好于传统遗传算法,混合遗传算法,即上面一根曲线在迭代30次左右就能收敛到80 dB的信干噪比输出,而传统的遗传算法,即下面一根曲线在迭代60次左右只能收敛到75 dB的信干噪比输出。

图4和图5分别给出了采用传统遗传算法和采用混合遗传算法迭代200次后的天线阵列的归一化方向图。从图5中可见,相比传统遗传算法,本文提出的算法能够在保持主波束形状不变的情况下在干扰方向上给出深达80 dB以上的零陷,有效地抑制了干扰,提高了系统的信干噪比。

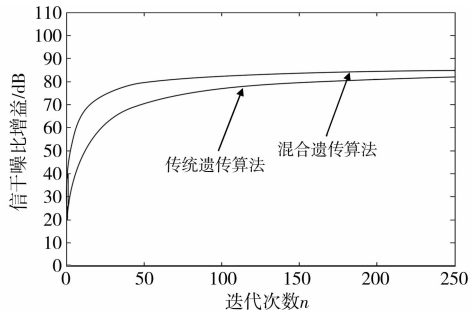

图3 2种算法的收敛性能比较

Fig. 3 Convergence performance comparisons for two algorithms

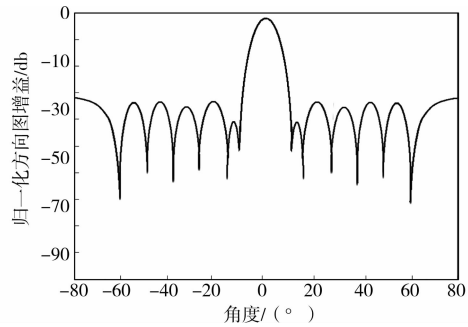

图4 传统遗传算法归一化方向图

Fig. 4 Normalized patterns for traditional genetic algorithm

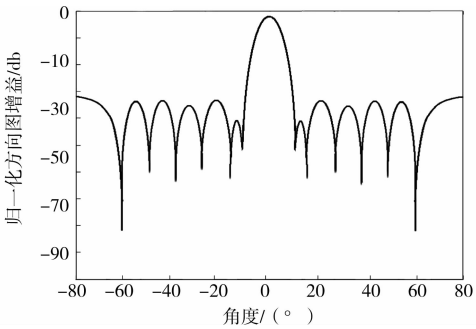

图5 混合遗传算法归一化方向图

Fig. 5 Normalized patterns for hybrid genetic algorithm

从以上的仿真结果我们可以得出结论,在相同的参数设置和相同的迭代次数条件下,混合遗传算法比传统遗传算法具有更快的收敛速度和更好的收敛性能。基于混合遗传算法的上行智能天线系统能够使最大增益主瓣对准期望信号方向,且还能对干扰方向形成很深的零陷,因此,基于混合遗传算法的上行最佳方向图的智能天线系统能够有效地抑制干

扰,提高系统的信干噪比,具有较好的实际应用价值。

4 结　论

本文基于改进的 Memetic 算法对幅相扰动最优权值的搜索,提出了一种新的上行 MIMO-SDMA 智能天线系统的波束成型,并通过仿真表明该改进的 Memetic 算法具有良好的收敛性能,而且基于该算法的智能天线系统不仅可以对干扰方向进行抑制还可以使最大增益主瓣对准期望信号的方向。因此,这种基于改进的 Memetic 算法的上行最优方向图的智能天线系统能够提高系统的信噪比,有效地抑制干扰,在实际应用中能实现上行 MIMO-SDMA。

参考文献:

[1] MORROW J D. MIMO antenna array design considerations for indoor applications[C]// IEEE Antennas and propagation society Int. Symp. and USNC/URSI National Radio science Meeting, 2005. USA:IEEE Press, 2005.

[2] WEILE D S, MICHIELSSEN E. The control of adaptive antenna arrays with genetic algorithms using dominance and diploidy[J]. IEEE Transactions on Antennas and propagation, 2001, 49(10):1424-1433.

[3] MASSA A, MONELLI M, De NATALE F G B. planar antenna array control with genetic algorithms and adaptive array theory'[J]. IEEE Transactions on Antennas and propagation, 2004, 52(11):2919-2924.

[4] HSU C H, BABIJ T M. Pattern nulling of adaptive antenna by phase and amplitude perturbations using genetic algorithm[C]// Proc. KES-2001 5th Int. Conf. on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems and Technologies. Japan:[s. n.], 2001, Part 2: 1047-1051.

[5] HSU C H, CHEN C H. Optimizing beam pattern of adaptively linear array antenna by phase perturbations using genetic algorithms[M]//Lecture Notes in Computer Science (LNCS)/LNAI, Berlin / Heidelberg: Springer, 2004, 3213: 929-936.

[6] 王丽娜,王兵,周贤伟. 一种新的智能天线波束形成算法[J]. 电波科学学报, 2007,22(2):351-354.

[7] HSU C H. Uplink MIMO-SDMA optimisation of smart antennas by phase-amplitude perturbations based on memetic algorithms for wireless and mobile communication systems[J]. IEEE IET Commun, 2007,1(3):520-525.

[8] KNOWLES J D, COME D W. A memetic algorithm for multiobjective optimization[C]// Proc. IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation. [s. l.]: IEEE Press, 2000, 1(1):325-332

[9] ISHIBUCHI H, MURATA T. Multi-objective genetic local search algorithm[C]// Proc. IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation, 1996. [s. l.]: IEEE Press, 1996, 119-124.

作者简介:

李方伟(1960 -)男,重庆人,重庆邮电大学教授,博士生导师,主要研究方向:移动通信理论及其应用。E-mail:lifw@ cqupt. edu. cn。

张海波(1979 -)男,重庆人,重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向:智能天线技术。E-mail:lkj158@ 163. com。

(编辑:魏琴芳)