

# 基于 QPSO 的智能天线声阵列 自适应波束形成算法模型研究

赵平, 刘杰, 马永欢, 姚鸿飞

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710129)

**摘要:**提出了一种基于量子粒子群算法(QPSO)的智能天线声阵列自适应波束形成算法模型,该模型应用 QPSO 对阵列天线半径和阵元初始相位进行调整,进而控制智能天线声阵列的波束形成,使天线波束主瓣对准期望声源信号方向,零陷对准干扰信号方向,并形成最优的增益主瓣和旁瓣的峰峰比. Matlab 仿真结果表明,该模型增强主瓣方向增益约 10 dB,降低噪声方向增益约 3.75 dB,有效提升了系统通信能力和抗干扰能力,并且在扫描角度上呈现普适性.

**关键词:**智能天线;声阵列;自适应波束形成;量子粒子群算法;主瓣增益

**中图分类号:**TN99 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.5/6.026

## Research on the algorithm model of smart antenna sound array adaptive beam forming based on QPSO

ZHAO Ping, LIU Jie, MA Yong-huan, YAO Hong-fei

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** The smart antenna sound array adaptive beamforming algorithm model based on quantum particle swarm optimization(QPSO) algorithm was presented, which applied QPSO to adjust array antenna radius and the initial phase of array element, and then controlled the forming of the sound smart antenna array beam, so that the main lobe of the antenna beam aligned direction desired sound source signals, nulling alignment direction to interference signal, and forming the optimal gain main lobe and side lobes peak ratio. Matlab simulation results showed that the model could enhance the direction of the main lobe gain by about 10 dB, reducing noise directional gain by about 3.75 dB, effectively increasing the system communication capability and anti-jamming capability, and presented a universal scanning angle.

**Key words:** smart antenna; sound array; adaptive beam forming; quantum particle swarm optimization (QPSO); the main lobe gain

## 0 引言

为了提高无线通信系统的容量,文献[1]将全双工技术应用于无线通信,理论上比现有的半双工

技术能提升一倍系统容量,除了在时域、频域、码域进行创新外,新型智能天线技术由于其在空域划分上的特殊作用,也引起了相关学者的关注和研究.将智能天线引入移动通信领域后,与天线控制系

收稿日期:2015-04-27

基金项目:国家自然科学基金项目(61271279,61201157)

作者简介:赵平(1958—),男,陕西省西安市人,西北工业大学副教授,博士,主要研究方向为声定位系统模型.

统、功控策略相关的智能天线方向图成为普遍分析的参考之一<sup>[2]</sup>。

在智能天线方向图的研究中,由于零陷部分角度窄,其对系统优化真正产生影响的范围很小,而大量出现的相关方向的普通用户则成为主要干扰源<sup>[3]</sup>。通过对 TD-SCDMA 系统的处理增益和系统容量的分析可知,由于用户密度逐渐增大,理论上除了零陷方向对系统性能产生影响外,天线方向图的主瓣增益值和第一副瓣增益值之比,也对相关方向相邻用户的通信质量产生一定的影响<sup>[4]</sup>。文献[5]利用阵列虚拟和粒子群算法(PSO)实现了零陷的线性阵列,文献[6]实现了基于量子粒子群算法 QPSO (quantum particle swarm optimization) 的天线阵列波形优化。

上述文献仅对算法理论进行了系列研究,并未对实际阵列模型进行性能分析。鉴于此,本文拟对智能天线声阵列自适应波束形成算法及优化问题进行研究,运用 QPSO 算法自适应地调整圆周阵列天线半径和阵元初始相位,控制智能天线声阵列的波束形成,使天线波束主瓣对准期望声源信号方向,零陷对准干扰信号方向,并且形成最优的增益主瓣和旁瓣的峰峰比,使模型的通信能力和抗干扰能力得到一定的提升。

## 1 智能天线阵列信号采集

智能天线阵列技术伸缩性很强,既可以用于改造传统的移动通信系统,又可以用于构造新系统。在不增加系统复杂度的情况下,可以满足服务质量和网络扩容的需要<sup>[7]</sup>。其工作原理是,将收到的无线电信息进行导向处理,产生空间上的定向波束,将天线对准来波方向,并将波束旁瓣或零陷与干扰或其他信号对准,从而实现采样信号强度的最大化及有效抑制干扰信号的目的。

当前波束形成算法在收敛速度上得到了一定的改进,但在功率控制、旁瓣抑制方面改善不明显,通信互扰现象仍然存在。PSO 算法采用实数求解的方式,需要调整的参数较少,易于实现,因此在诸多领域得到广泛应用。笔者利用其智能化参数追踪功能对天线阵的关键参数进行适时调整,图 1 给出了将线性组合器作为波束形成器对加权控制的均匀直线阵。

该阵列的阵元数为  $M$ ,阵元间距离为  $d$ ,对各阵元的加权分别为  $w_1, w_2, \dots, w_m$ ,信号是窄带信号,波长为  $\lambda$ ,来波方向为  $\theta$ 。

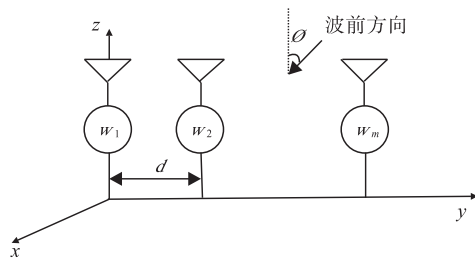


图 1 加权控制的均匀直线阵

本文在天线阵列应用中,以声阵列为例进行分析,在声传感器阵列对语言信号的采集过程中,随着距离的增加,采集到的语言信号将越来越偏离原始目标语言,这将导致后期与光学图像的融合产生很大误差,甚至失去融合的意义。在对协同通信中放大转发(AF)原理进行分析研究后,本文提出麦克风阵列的信号采集方式。麦克风协同圆阵列信号采集方案如图 2 所示。

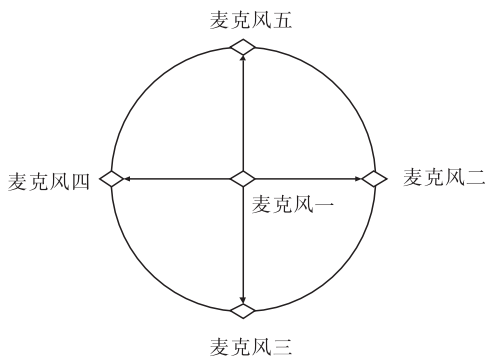


图 2 麦克风协同圆阵列信号采集方案

在图 2 中,麦克风一为中继节点,其他麦克风为目标源节点,中继节点将接收到的信号传递给其他目标源节点,目标源节点利用相关补偿算法对两路信号进行融合放大,达到更加接近真实语言的目的。目标源节点接收到的信号为

$$y_{r,d} = h_{r,d}(\beta y_{s,r}) + z_{r,d} \quad (1)$$

其中,  $h_{r,d}$  为信道衰减系数,  $\beta$  为放大倍数,  $y_{s,r}$  为中继接收信号,  $z_{r,d}$  为高斯白噪声。

## 2 PSO 算法改进

要对智能天线自适应波束 PSO 算法进行优化,除了要充分考虑算法的精确性、稳定性外,算法的收敛速度、全局最优效果也是重要的考量因素之一,因此笔者引入 QPSO 算法。QPSO 算法基于经典 PSO 算法,在更新粒子位置时重点考虑粒子的当前局部最优位置信息和全局最优位置信息。

在本文算法应用中,主要针对圆周阵列天线的

相位和圆周半径进行调整,以期在最佳峰峰比的基础上得到最大的增益,QPSO 算法具体步骤调整如下:

1) 随机初始化  $N$  个粒子的初始位置,即粒子数目为  $N$ ,由于是 16 天线的线阵并且要调整圆周半径,因此粒子维数  $D = 17$ ,用矩阵可以表示为

$$\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \varphi_{1,1} & \varphi_{1,2} & \cdots & \varphi_{1,17} \\ \varphi_{2,1} & \varphi_{2,2} & \cdots & \varphi_{2,17} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_{N,1} & \varphi_{N,2} & \cdots & \varphi_{N,17} \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵中每 1 行代表 1 个粒子,相位区间可以每行都取  $[0, 1]$  之间的随机值,半径区间可以根据具体条件设定,这里设定为  $[1, 4]$  之间的随机值.

2) 令各个粒子的当前最佳位置  $P_{pi}(0) = \varphi_i(1, :)$ ,令全局最佳位置  $P_g(0) = \max \{f(\varphi_i(1, :))\}$ ,其中

$$f(\varphi_i(1, :)) = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \sin \varphi)} \quad (3)$$

3) 更新每个粒子的新局部最优位置  $p_{pi}(t+1)$ ,假设最大化目标函数为  $f(\varphi_i(t+1))$ ,则

$$P_{pi}(t+1) = \begin{cases} P_{pi}(t) & f(P_{pi}(t)) \geq f(\varphi_i(t+1)) \\ \varphi_i(t+1) & f(P_{pi}(t)) < f(\varphi_i(t+1)) \end{cases} \quad (4)$$

4) 更新全局最优位置为

$$P_g(t+1) = \max \{P_1(t+1), P_2(t+1), \dots, P_N(t+1)\} \quad (5)$$

5) 根据公式③计算  $mbest(t+1)$ ;

6) 根据公式④计算每个粒子随机点  $Q_d$ ,为了避免混淆,可以改为

$$Q_d = \varphi P_{best} + (1 - \varphi) P_{gbest} \quad (6)$$

7) 根据公式③更新每个粒子的新位置  $X(t+1)$ .

重复执行步骤 2) 至 7),直到迭代次数达到最大迭代次数,算法终止.

### 3 声阵列在自适应接收波束形成的应用

声阵列波束形成器已被广泛应用于无线通信、语言识别、语言增强、组听器等,与其他领域的阵列处理相比,声阵列处理有其特定的优势,如设计成本低、可控性强等.本文在 QPSO 算法智能天线自适应波束形成模型的建立中选择声阵列接收波束形成,主要是因为各种波束形成方法中,自适应波束形成比传统的固定波束形成具有更好的抑制干扰和噪声的性能.

由于声阵列要求接收器的位置相对固定,所以在天线阵列的可控参数范围内,选择阵源初始相位和天线阵列半径为调整对象,使阵列在照射方向上获得所需的增益,形成理想零陷.如果根据天线声阵列进行阵列场强分析,采用 16 个分布均匀的传声器阵列并将其分布在半径为  $a$  的圆的边缘,假定定向波束的方向参数为  $(\theta_0, \varphi_0)$ ,则阵列场强度可表述为

$$E = \sum_{n=1}^M I_n \exp \cdot$$

$$\left\{ j \left[ \frac{2\pi a}{\lambda} (\sin \theta_0 \cos(\theta_n - \varphi) - \sin \theta_0 \cos(\theta_n - \varphi_0)) - \alpha_n \right] \right\}$$

其中,参数  $M$  代表声阵列数量, $E$  代表场强,参数  $(\theta_0, \varphi_0)$  分别代表波束仰角和方位角,第  $n$  个声阵列传感器与水平轴的角度  $\theta_n = (2\pi/M) * n$ ,参数  $\alpha_n$  为第  $n$  个阵源的相位,参数  $\varphi$  为场强测量方位角,根据以上描述绘制圆周阵列空间几何关系如图 3 所示.

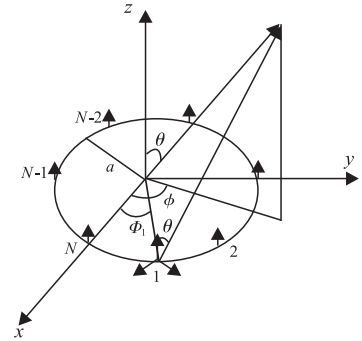


图 3 圆周阵列空间几何关系

本文采用阵列信号处理常用的统计模型来构造定向波束的权向量系数,在提前设定的阈值来计算最优权向量系数,在设定权函数的时候,采用输出最大信噪比准则.

假设共有  $M$  个阵元,阵元之间有相同的间距  $d$ ,声源信号的复振幅为  $s_d$ ,相邻阵元相位差为  $\beta_d$ ,经推导,得到最佳权系数时阵列输出信噪比为

$$SNR_{max} = |S_d|^2 \alpha^H(r_d, \theta_d, \varphi_d) M^{-1} \alpha(r_d, \theta_d, \varphi_d)$$

波束最佳权向量系数为

$$w_{opt} = \mu M^{-1} \alpha(r_d, \theta_d, \varphi_d)$$

如果预期信号的到达角参数  $\theta_d$  和干扰信息到达角参数  $\theta_j$  相差较大,则声阵列定向波束能够实现主瓣对准期望信号,而旁瓣或零陷对准干扰信号.

### 4 仿真结果与分析

下面以 16 阵元圆周阵列为例,用 Matlab 进行仿真,照射方位角  $30^\circ$ ,仰角  $90^\circ$ ,噪声方向  $100^\circ$ ,以

方位角进行增益分析.

测试一:不使用任何优化算法对阵列天线辐射方向、增益方向、归一化极化阵列方向进行仿真,结果如图 4—图 6 所示.

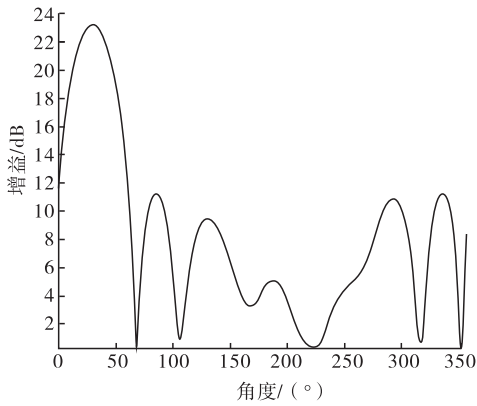


图 4 无优化的阵列辐射方向图

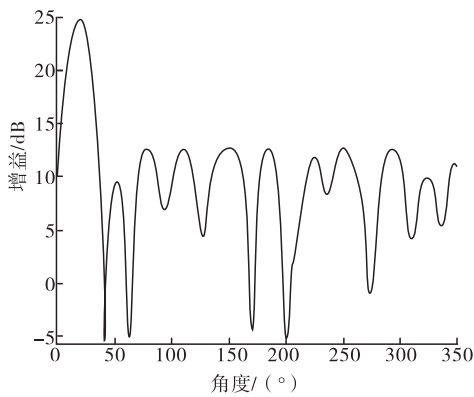


图 5 无优化的阵列增益方向图

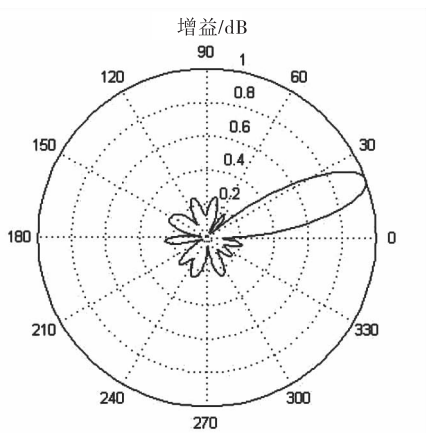


图 6 无优化阵列归一化极化阵列方向图

测试二:利用常规智能天线自适应波束形成优化算法 SMI (sample matrix inverse),通过加权调整波束的阵列天线抑制噪声,对阵列天线的辐射方向、增益方向、归一化阵列方向进行仿真,结果如图

7—图 9 所示.

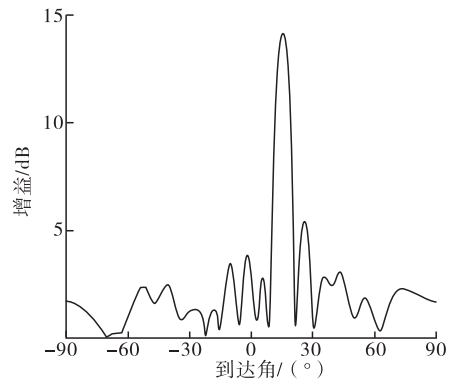


图 7 SMI 算法优化后阵列辐射方向图

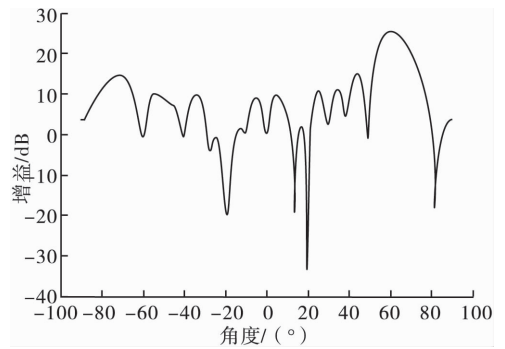


图 8 SMI 算法优化后的阵列增益方向图

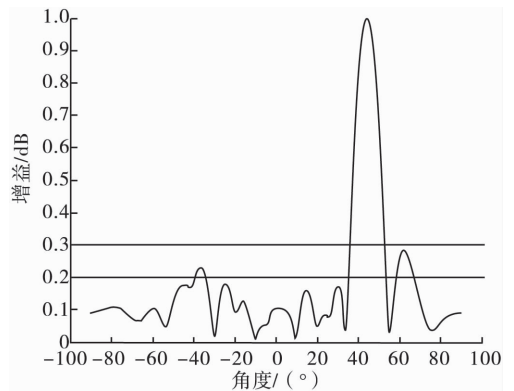


图 9 SMI 算法优化后的归一化阵列方向图

测试三:在达到 SMI 的优化效果后,利用 QPSO 算法调整相位与圆周阵列半径,对阵列天线的辐射方向、增益方向、归一化阵列方向进行仿真,结果如图 10—图 12 所示.

通过以上仿真能够看出,利用 SMI 算法调整抑制噪声方向是非常准确的,但主瓣方向增益没有得到明显的增强;在达到 SMI 优化效果后,利用 QPSO 算法,既可以优化增益主瓣和旁瓣的峰峰比,又能实现分别将主瓣和零陷对准特定方向的目的,相较于测试一,主瓣增益增强 10 dB,噪声方向增益降低

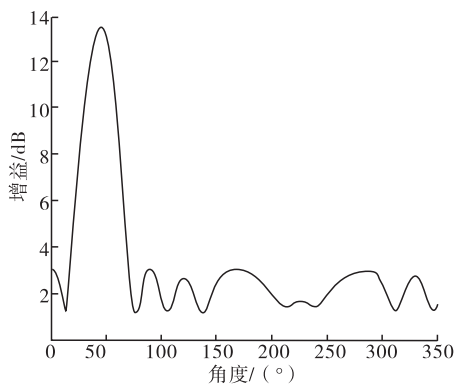


图 10 QPSO 算法优化后的阵列辐射方向图

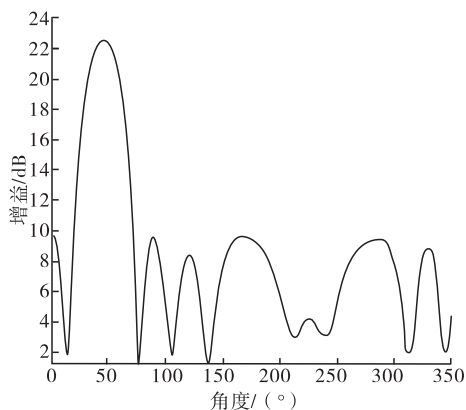


图 11 QPSO 算法优化后的阵列增益方向图

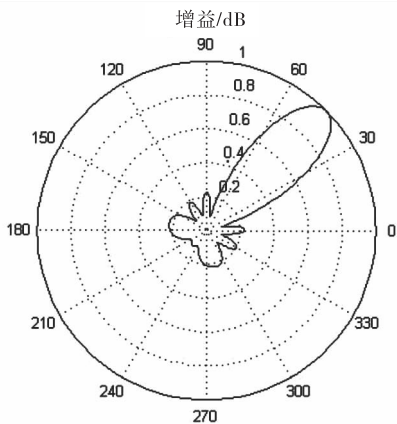


图 12 QPSO 算法优化后的归一化阵列方向图

了 3.75 dB,说明使用本文方法有效增加了接收功率,在扫描角度上呈现出普适性.

### 5 结语

本文研究了智能天线的声阵列自适应波束形成算法及优化,提出用 QPSO 算法优化圆周阵列天线半径和阵元初始相位的方法,并将模型应用到智

能天线声阵列自适应接收波束,使阵列波束主瓣对准期望声源方向,零陷对准干扰信号方向,且得到最优增益主瓣和旁瓣的峰峰比,与无优化测试对比,使用本文模型主瓣增益增强 10 dB,噪声方向增益降低了 3.75 dB,有效提升了系统通信能力和抗干扰能力,并且在扫描角度上呈现普适性.

### 参考文献:

[1] Li Y, Wang H W, Xu H. Capacity analyses and comparisons of pure-full-duplex and half-duplex wireless communication systems[J]. *Mobile Communications*,2014(18) : 63.

[2] Zhang L P, Zhao P, Wang W, et al. The adaptive beam forming algorithm based on MIMO array with particle swarm optimization [J]. *Educational and Information Technology*,2010(1) :397.

[3] Zhang H Z, Yang Y J, Wang X F. Research on variable step size LMS adaptive beam-forming algorithm for smart antenna[J]. *Computer Simulation*, 2014(8) :2338.

[4] He H, Wu C C, Li H, et al. Smart antenna adaptive interference suppression in TD-SCDMA system[J]. *Advanced Materials Research*,2011(204 - 210) :476.

[5] Abu-Al-Nadi D I, Ismail T H, Al-Tous H, et al. Design of linear phased array for interference suppression using array polynomial method and particle swarm optimization [J]. *Wireless Personal Communications*,2012,63(2) :501.

[6] Jin L, Zhao P, Wang Y W, et al. The application of QP-SO algorithm for waveform optimization of antenna array [J]. *Electronic Design Engineering*,2014(12) :130.

[7] Ying H E, Hong H E, Li L I, et al. Application of smart antenna interference suppression techniques in TD-SCDMA systems [C] // *Proceedings of the Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Piscataway: IEEE, 2009:525 - 529.

[8] Zhao P, Shi H S. A kind of algorithm for increasing accuracy of position location in mobile network system [C] // *Proceedings of the 2003 International Conference on Neural Networks and Signal Processing*, Piscataway: IEEE, 2003:723 - 726.

[9] Zhao P, Han X, Cheng S, et al. The research of location algorithm model based on fuzzy identification with stratified synchronization and cooperative difference [C] // *Proceedings of the 2nd International Congress on Image and Signal Processing*, Piscataway: IEEE, 2009:1 - 5.

[10] 王维博,冯全源. 粒子群优化算法在天线方向图综合中的应用 [J]. *电子科技大学学报*,2011,40(2) :237.