

遗传算法在矢量传感器对目标进行定向中的应用

韩引海^{①②} 孙勇^① 赵俊渭^①

^①(西北工业大学声学工程研究所 西安 710072)

^②(海军 91388 部队 湛江 524022)

摘要: 矢量传感器通过测量水中质点的振速信息, 仅用单个的矢量传感器就可以进行水下目标的方位估计。本文分析了声压梯度法和互谱声强法的定向原理, 并将遗传算法引入互谱声强法目标定向中。通过构建适应度函数, 根据信号适应度函数进行遗传选择, 舍弃不稳定信号, 对有用信号进行杂交, 从而获得较高的定向精度。仿真结果表明, 该算法可以有效地进行目标方位估计, 进一步提高定向精度。

关键词: 定向; 矢量传感器; 声强; 遗传算法

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0747-04

Genetic Algorithm Applied to Bearing of Target by Acoustic Vector-Sensor

Han Yin-hai^{①②} Sun Yong^① Zhao Jun-wei^①

^①(Institute of Acoustic Eng., Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

^②(Army of 91388 of Navy, Zhanjiang 524022, China)

Abstract: Vector hydrophone can measure energy and particle velocity at a point in space with one sensor and can estimate the bearing of target. This paper, sound pressure gradient method and acoustic intensity method and apply genetic algorithm for acoustic intensity method bearing of target are analyzed. Instable signal and intercros steady signal for upper precision through construct adaptive function and process genetic selection with construct adaptive function are abnegated. The result of computer simulation indicates the algorithm can effectively bearing of target and enhance the precision of bearing.

Key words: Vector-sensor; Acoustic intensity; Genetic algorithm; Bearing

1 引言

矢量传感器的出现, 给信号处理带来了一个全新的空间。矢量传感器可以同时获得声场中的声压和质点振速信息, 因此矢量传感器的信号处理可以在相空间中进行, 这是传统的传感器所不具备的。信息量的增加使信号处理空间得到扩展, 从而大大改善了目标方位估计的性能。如单个声压传感器无法对目标的方位进行估计, 这是因为单个的声压传感器没有指向性, 只有多个声压传感器组成的传感器阵, 才具有指向性^[1,2]。矢量传感器在声场中能够获得质点振速在 3 个垂直方向上的投影, 因此矢量传感器具有天然的指向性, 不需要成阵就能对目标进行方位估计。声压梯度法和互谱声强法就是运用声压和振速联合处理的方法, 该方法利用在远场平面波假设条件下, 声压和振速是完全相关的这个特点, 来对信号的方位进行估计^[3]。

遗传算法^[4]是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化搜索算法, 已经在工程领域得到广泛应用。为

了更有效地利用水下目标的频谱特性, 提高矢量传感器的定向精度, 本文把遗传算法引入到矢量传感器的信号处理当中, 希望给矢量传感器信号处理带来新的扩展。

2 矢量传感器定向原理

介质中的声场可以用几个声场参量(声压, 声强, 质点振速和速度势函数等参量)来描述。这几个参量之间存在一定的关系, 并可以互相求解和计算。在这几个声学参量中, 声压和速度势函数是标量, 而质点速度是矢量。在声场远场的情况下, 在观测点处测量的质点速度的方向就是声源的方向^[5], 因此, 如果能求得声场中质点振动速度的方向, 就能实现声源的定向。由于声强和质点速度具有相同的方向, 所以也可以估计声强的方向来对声源目标定向。

如图 1 所示, 设一平面波声场声波入射到观测点 o , 其入射的方位角为 φ , 俯仰角为 θ 。在声源目标的定向问题中, 关键技术就是如何估计出 φ 和 θ , 而且要有较高估计精度。

要实现三维空间中的声源目标的定向, 则需要空间中某一点处的 3 个互相垂直的声速或声强分量。在自由声场中, 质点振动速度方向也就是声源的方向, 而质点振动速

2005-06-17 收到, 2006-01-16 改回

国防科技重点实验室基金(51445020405HK0304, 51452040105HK0301)资助课题

度可以通过矢量传感器来测量。

如图2所示,设在 x 方向上有两个声压传感器 P_1, P_2 ,下面由 P_1, P_2 分析推导 P_1, P_2 声压传感器中点 o 的质点振速 v_x 值。由声学运动方程可以得到

$$v_x = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial P}{\partial r} dt \quad (1)$$

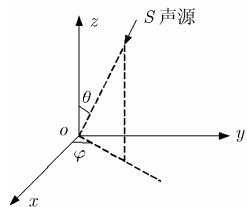


图1 声源空间方向示意图

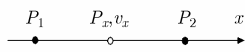


图2 声传感器声压和质点速度的示意图

由此, v_x 可由 x 方向上靠的很近的两点的声压值 P_1, P_2 近似求得

$$v_x \approx -\frac{1}{\rho d} \int (P_1 - P_2) dt \quad (2)$$

对上式两边进行傅里叶变换,得

$$V_x(f) \approx \frac{j[P_1(f) - P_2(f)]}{2\pi f \rho d} \quad (3)$$

对上式取模,得

$$|V_x(f)| \approx \frac{|P_1(f) - P_2(f)|}{2\pi f \rho d} \quad (4)$$

由此求出 x 方向上质点振动速度谱,同理可求出其他方向上的离子速度。由此求出的只是质点的绝对值大小,要对声源定向,还应确定速度的正负方向^[6]。这可以由声源到达 P_1, P_2 声压传感器的先后,用相位差确定速度正负。这样声源的方位角大小可表示为

$$\varphi(f) = \arctg \left| \frac{V_y(f)}{V_x(f)} \right| \quad (5)$$

这就是声压梯度定向原理,在互谱声强法定向原理中,根据声强的定义

$$I_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} P(t)v_x(t) dt = E[PV_x] = R_{PV_x}(0) \quad (6)$$

这里测量点 o 的声压用下式

$$P(t) \approx \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2} \quad (7)$$

近似求得。质点振动速度 $v_x(t)$ 还用式(2)。把测量点质点速度和声压代入式(6)定义式。两边取傅里叶变换可得

$$I_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} E[P(f)V_x^*(f)]/T \quad (8)$$

式中 $I_x(f)$ 为该方向声强谱, $P(f), V_x^*(f)$ 分别是 $P(t)$ 和 $V_x(t)$ 的傅里叶变换,“*”表示复数共轭。最后得到

$$I_x(f) = -\frac{1}{2\pi f \rho d} \text{Im} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} E(P_1(f)P_2^*(f))/T \right] \quad (9)$$

式中 Im 表示取复数虚部。同理可得其他方向的声强谱,则声源的方位角可表示为

$$\varphi(f) = \arctg \frac{I_y(f)}{I_x(f)} \quad (10)$$

为了简单,俯仰角的计算分析在这里略去。

3 算法原理

遗传算法是一个多点并行的迭代过程。该算法从很多个体所组成的一个初始群体开始最优解的搜索过程,而不是像传统的算法从一个点开始。在对这个群体的选择、交叉、变异等运算中,产生了新一代群体。这些信息可以避免搜索不必要的点,是遗传算法所特有的一种隐含的并行性,它以较少的计算获得较大的收益。本文根据矢量传感器测向的实际情况,对传统遗传算法进行了改进,并采用了无重叠的稳态繁殖和种群自适应变化的新算法,以获取水下目标的方位信息。

3.1 编码方式和种群设定

遗传算法的编码方案一般分为三大类:二进制编码、浮点数编码和符号编码等方法。浮点数编码方法能适用于精度要求较高的算法,而且它能改善遗传算法的复杂性,提高算法的运算效率^[4],同时,由于矢量传感器测量的声压和振速信息都是以浮点方式保存,所以在该算法中每个染色体都采用浮点编码方式。

根据互谱声强法定向原理,首先估计测量点声压谱和质点振速谱,然后计算特定方向每个频率对应的方位值。在这里,各个频率的方位信息和能量信息就作为一个染色体,选定频率点的染色体,就构成了遗传初始种群。

3.2 适应度函数

在噪声干扰情况下,信号的稳定度要比噪声的高,又由于声压的噪声和振速的噪声是不相关的,因此互功率谱具有更强的抑制噪声能力。可按如下方法构造单个染色体的适应度函数。在 t 时刻

$$S(t, f) = \frac{P(f) - V_x(f) - V_y(f) - V_z(f)}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}} \quad (11)$$

则设适应度函数为

$$F_1(f) = \frac{1}{D(S(t, f))}, \quad t = 1, \dots, T \quad (12)$$

其中 T 表示时间长度, D 表示对 t 做方差运算。

在遗传过程中,根据每个染色体方位角估计值的稳定性改变适应度函数,对于不稳定的染色体,大幅度降低其适应度,如式(13)

$$F_2(f) = \frac{F_1(f)}{(\Delta\varphi + 1)} \quad (13)$$

式中 $\Delta\varphi$ 表示不同时刻染色体方位估计的变化值。

3.3 遗传过程

声源目标大多是宽带信号,所以在矢量传感器方位估计中,最终的解应当是多个染色体。在具体的操作中,首

先将部分染色体直接加入到种群中, 在新的染色体加入种群前, 先检查该染色体和种群中有没有重复, 若重复就舍弃, 这样保证种群中的染色体始终不重复。

具体遗传过程如图 3 所示:

(1)初始化参数, 根据互谱声强法生成最初种群。

(2)计算适应度函数 $F_1(f)$, 根据适应度函数 $F_1(f)$ 的方差值确定最优染色体, 并将选定的最优染色体存入待遗传种群。

(3)确定遗传种群的大小 N , 用赌盘的方式按照染色体适应度的概率选择没有重串的染色体。

(4)估计下一时刻各频率的声强与方位信息, 与种群中对应频率的染色体进行单点杂交运算, 保留优质染色体。计算种群染色体的方位角改变值 $\Delta\varphi$ 。

(5)计算适应度函数 $F_2(f)$, 大幅降低 $\Delta\varphi$ 不稳定染色体的适应度函数值。

(6)判断各个染色体的适应度是否超过门限, 低于门限值则返回(4)重复运算, 直到所有染色体都大于期望适应度门限, 遗传过程结束。

(7)根据遗传结果计算目标的方位。

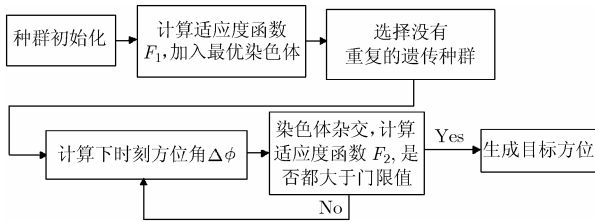


图 3 遗传过程流程图

4 仿真实验

4.1 适应度函数

适应度函数具有较强的抑制噪声能力, 该特点可以用来提高检测信号的能力, 如图4和图5所示。目标声源为500–700Hz的宽频信号, 采样率为15.7kHz, 水平方位角为45°, 俯仰角为40°。图4给出了原来信号的声压功率谱, 图5为利用适应度函数的信号检测结果。由仿真结果可以看出: 在信噪比较低情况下, 通过适应度函数可以提高信噪比5–15dB。在本文的遗传算法中, 种群染色体就是根据适应度函数来选择的。

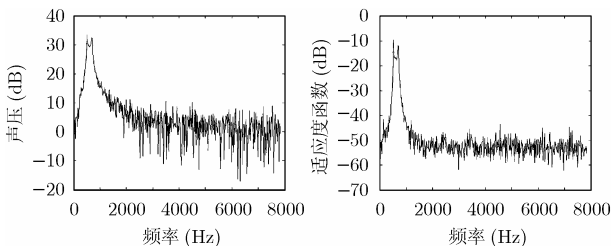


图4 声压功率谱

图5 适应度函数 F_1

4.2 声源目标定向

如图6, 图7所示, 目标声源为500–650Hz的宽频信号,

采样率为15.7kHz, 水平方位角为45°, 俯仰角为40°, 信噪比20dB。图6给出了互谱声强法的定向误差, 图7给出了经过遗传算法处理后的水下目标定向误差, 两种方法均经过100次统计运算。

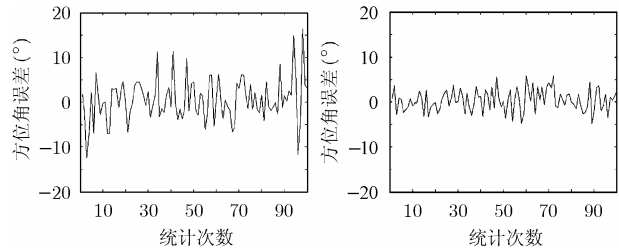


图6 互谱声强法的误差统计

图7 遗传算法的误差统计

仿真结果表明: 互谱声强法的平均绝对误差为4.55°, 均方误差为1.76°, 应用本文所提遗传算法进行处理后, 其平均绝对误差降为2.18°, 均方误差降为0.85°, 定向精度提高约52.1%。

设目标信号为300–600Hz的宽频信号, 采样率为15.7kHz, 水平方位角为45°, 俯仰角为40°。图8和图9分别给出了互谱声强法和应用本文所提遗传算法后, 在不同信噪比下的均方误差和平均绝对误差, 统计次数为50次。

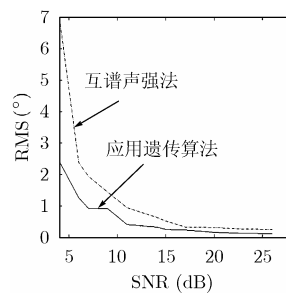


图8 两种算法均方误差与信噪比的关系曲线

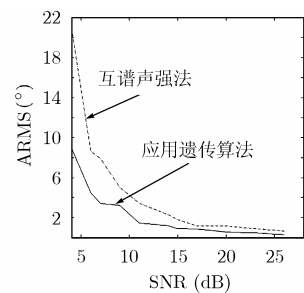


图9 两种算法绝对误差与信噪比的关系曲线

图8和图9表明, 在不同的信噪比下, 应用遗传算法都可以提高矢量传感器的定位精度, 而且, 在低信噪比下, 精度改善幅度更高。

5 结束语

本文分析了矢量传感器的定向原理, 并通过矢量传感器接收到的声压信号和振速信号, 构建适应度函数, 进一步将遗传算法应用于矢量传感器的测向算法中, 并对传统遗传算法进一步扩展和改进。仿真结果表明, 该算法能明显提高矢量传感器的目标定向精度约52.1%。

参考文献

[1] Berliner M J and Lindberg J F. Acoustic Particle Velocity Sensors: Design, Performance and Applications [M]. New York: AIP, 1996: 12–15.
 [2] Nehorai A and Paldi E. Acoustic vector-sensor array processing. [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, 42(5): 2481–2495.

- [3] Robert Hickling and Wei Wei. Use of pitch-azimuth plots in determining the direction of a noise source in water with a vector sound-intensity probe. *J Acoust. Soc., Am.*, 1995, (4): 856–876.
- [4] Quagliarella D and Cioppa A D. Genetic Algorithms Applied to the aerodynamic design of transonic airfoils. AIAA94-1896. 1994, (3): 686–695.
- [5] Hickling R and Wei W. Finding the direction of a sound source using a vector sound-intensity probe. *J Acoust Soc Am.*, 1993, 94(3): 2408–2412.
- [6] 刘勋, 相敬林, 罗建, 沈远海. 基于声强向量法和声压梯度法的水中目标定向. *兵工学报*, 2001, 22(1): 90–94.
Liu Xun, Xiang Jing-lin, Luo Jian, and Shen Yuan-hai. Determination of bearings of underwater objects based on acoustic intensity and acoustic pressure gradient. *Acta Armamentarii*, 2001, 22(1): 90–94.
- [7] 时胜国, 杨德森. 矢量水听器的源定向理论及其定向误差分析. *哈尔滨工程大学学报*, 2003, 4(2): 132–135.
Shi Sheng-guo, Yang De-sen. Acoustic source location by acoustic vector-sensor and its bearing error. *Journal of Harbin Engineering University*, 2003, 4(2): 132–135.
- [8] Hawkes M and Nehorai A. Wideband source location using a distributed acoustic vector-sensor array. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2000, 48(11): 2981–2993.
- 韩引海: 男, 1973 年生, 硕士生, 从事声呐信号处理的研究.
孙 勇: 男, 1981 年生, 博士生, 从事声呐信号处理的研究.
赵俊渭: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 长期从事声呐信号处理、水声通信等方面的教学和研究工作, 主要研究方向为声呐技术、水声信号处理、水声通信、超声应用等.