基于遗传算法的单矢量水听器多目标方位估计

孟春霞^{1,2},李秀坤¹,杨士我¹,胡园¹

(1. 哈尔滨工程大学水声工程学院,黑龙江哈尔滨 150001; 2 大连测控技术研究所,辽宁大连 110613)

摘要: 矢量水听器能同时获得声场中某一点的声压标量和质点振速矢量,获得了比常规声压水听器更多的信息。矢 量水听器自身是一个空间共点阵,具有一定的空间指向性,这些特点使矢量信号处理技术与声压信号处理技术具有 重大差异。根据单个矢量水听器多目标分辨的数学模型,即声压和振速的偶次阶矩组成的非线性联立方程组,研究 了该方程的解算方法,给出了可以使用遗传算法求解该非线性方程组的结论和计算精度。

关键词: 矢量水听器;方位估计;遗传算法

中图分类号: TB565.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2007) -02-0169-04

Direction estimation of multi-sources using a single vector transducer with genetic algorithm

MENG Chun-xia^{1,2}, LI Xiu-kun¹, YANG Shi-e¹, HU Yuan¹

School of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
 Dalian Scientific Test & Control Technology Institute, Dalian 116013, China)

Abstract: Vector transducers consisting of both acoustic pressure and acoustic particle velocity transducers can get more information from a point in the sound field than an ordinary acoustic pressure transducer. Although all elements in a vector array are situated at one point, the vector transducer is spatially directional. For this reason, vector signal processing techniques are different from the pressure signal processing technique. In this paper, we study the method for calculating the system of non-linear equations derived with even order moments of acoustic pressure and acoustic particle velocity received by a single vector transducer. We show that genetic algorithms are effective in solving the system of nonlinear equations. Simulation results on accuracy are presented. Key words: vector transducer; estimation of DOA; genetic algorithm

1 引 言

矢量水听器测量的是目标信号的声能流矢量, 当存在多个相互独立的信号源时,获得的将是各目 标声能流的矢量和,此时若要分辨各目标的方位,最 有效的方法是使用多个矢量传感器按一定规则形成

收稿日期:2005-11-08;修回日期:2006-02-20 基金项目:国防科技重点实验室基金项目资助(51445020303ZS2301) 作者简介:孟春霞(1979-),女,博士研究生,主要从事海洋声传播研究。 通信作者:孟春霞,E-mail:mengchunxia0404@sina.com.cn 空间多波束接收基阵^[1,2]。但若只能用单只矢量水听器进行测量时,可考虑通过求解单个矢量水听器接收到的声压和质点振速信号的偶次矩所形成的非线性方程组来确定目标方位^[3]。

得到准确的目标方位,需要找到一种能够求解 该方程的计算方法。传统的方法往往是从解空间中 的一个初始点开始求最优解的迭代搜索过程,对一 些非线形、多模型、多目标的函数优化问题,难以得 到其最优解^[4]。下面将讨论利用单个矢量水听器测 向和遗传算法来求解以目标的方位信息为未知数的 非线性方程组的一些问题。

2 矢量水听器接收信号模型

声波在各向同性的水下均匀声场中传播,投射 到一个三维矢量水听器上。第 k 个声源信号的平面 波从 u_k(*φ*_k, *θ*_k)方向入射为

 $u_{k}=[\cos(\phi_{k})\sin(\theta_{k})\sin(\phi_{k})\sin(\theta_{k})\cos(\theta_{k})]^{T}$ (1) 则在单个矢量水听器上的单位幅度响应为 $h_{k}=[1 \ u_{k}]^{T}$

=[1 $\cos(\phi_k)\sin(\theta_k)\sin(\phi_k)\sin(\theta_k)\cos(\theta_k)$]^T(2) 其中,第一项为声压水听器输出量,第二、三、四项分 别为沿 x 轴、y 轴、z 轴方向放置的振速水听器输出 分量, $\phi_k(0 \phi_k 2\pi)$ 是水平方位角, $\theta_k(0 \theta_k \pi)$ 是 俯仰角。设 $v_k(r,t)$ 是第 k 个声源信号在位置 r 处和 时刻 t 的振速, $p_k(r, t)$ 是声压,则有

$$v_{k}(r,t) = -\frac{p_{k}(r,t)}{\rho_{0}c}u_{k}$$
(3)

其中, ρ_0 为介质密度, c 为声波在介质中的传播速度。 除了一个常数以外, 三个振速分量与声压分量同相。 为书写方便, 略去介质阻抗 ρ_0 C, 相当于在测量记录 中对声压与质点振速选取相同的计量单位。因此单 个矢量水听器可视为四元共点阵, 各路输出之间没 有延时相位差; 而且无论源参数如何, 单位幅度响应 向量 h_k 的后三项的 Frobennius 范数等于它的第一 项。对于二维矢量水听器式(2) 简化为

h_k=[1 u_k]^T=[1 cos(φ_k) sin(φ_k)]^T (4) 若有 k 个声源入射到矢量水听器上,单位幅度响应 向量为:

 $H=[h_1, ..., h_k]$ (5)

3 单矢量水听器多目标方位估计方程组

若海洋环境条件可认为属于准分层介质, 自声 源发出的声波在传播过程中虽然存在多途效应, 但 其水平方位角偏转很小, 可以忽略不计。这时利用 二维矢量传感器进行接收, 对较远距离的目标来说, 沿不同途径到达接收点信号的合成, 可近似认为来 自目标所在水平方位的平面波, 其声压与质点振速 同相, 两者的互相关, 等于该目标信号到达接收点的 声能流在质点振速测量方向上的分量。相互独立的 信号源的声压或质点振速的互相关将等于零。

设有三个相互独立的噪声源,到达接收点处的 信号强度分别为 I₁、I₂、I₃,声压和质点振速分别为 p₁、 p₂, p₃, v₁、v₂、v₃ 水平方位角分别为 θ₁、θ₂, θ₃, 则接收点 处测得的结果将分别为:

$$P = \sum p_i \tag{6}$$

$$V_{x} = \sum v_{i} \cos \phi_{i} \tag{7}$$

$$V_{\rm y} = \sum v_{\rm i} \sin \phi_{\rm i} \tag{8}$$

 $I_i = p_i \cdot v_i \tag{9}$

其中, P 为接收到的声压值, V_x 为 x 轴振速分量, V_y 为 y 轴振速分量。在未考虑噪声项时, 计算测量量的 二阶矩和四阶矩, 依次可得到 14 个独立的方程。其 中方程右边的系数见文献[3]。由于每个声源有两 个未知数 I 和 θ , 因此最多可解 7 个未知目标。

3 遗传算法

3.1 遗传算法概念

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进 化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算 法。它的基本框架如图1示。



3.2 编码及初始种群的选取

本文选取 14 个独立方程中的 8 个作为目标方 程, 通过遗传算法来解算三个信号源的声强和方位 信息。用随机产生的浮点数表示决策变量 $I_{1,1}I_{2,1}$, $\theta_{1,1}\theta_{2,1}\theta_{3,2}$, 其中 I_{i} 和 θ_{i} 分别是三个信号源的声强和方 位信息。因此个体的基因型可以表示为 X: $[I_{1,1}I_{2,1}I_{3,1},$ $\theta_{1,1}\theta_{2,2}\theta_{3}]$ 。这里 I 和 θ 的变化范围根据要求适时选 取, 在浮点数编码方法中, 必须保证基因值在给定的 区间限制范围内, 遗传算法中所使用的交叉, 变异等 遗传算子也必须保证其运算结果所产生的基因值也 在这个区间限制范围内。种群数可以根据函数的复 杂性确定其大小。

3.3 适应度函数

目标适应度函数取为1/(Σ|y[i] - α[i] |), 其中

y[i]为以上 8 个方程由遗传算法算出的仿真值; α[i] 为给定声强和方位值代入方程得到的理论值。由此 可以得知误差越大, 个体的适应度值就越小。

3.4 基本运算

选择运算采用比例选择,设群体大小为 M, 个 体 i 的适应度为 f, 则 i 被选中的概率 P;

$$P_{i}=f_{i}/\sum_{i=1}^{M}f_{i}$$
(10)

交叉运算采用了浮点数编码的非均匀算术交 叉,通过线性组合运算产生两个新的个体。设两个母 代个体 X^t_A, X^t_b产生[0, 1]间的随机数 r,则交叉运算 后所产生的两个子代是:

$$\begin{bmatrix} X^{t+1}_{B} = r X^{t}_{B} + (1 - r) X^{t}_{A} \\ X^{t+1}_{B} = r X^{t}_{A} + (1 - r) X^{t}_{B} \end{bmatrix}$$
(11)

变异是算法获得全局最优解的不可缺少的重要 环节,一般变异可能在个体的任一个基因发生。为 了能使得最优解的搜索过程更加集中在某一最有希 望的重点区域中,本文采用的是非均匀变异。取系 统参数 k=0.4,产生[0,1]间的随机数 y。变异点 X^k 处的基因值取值范围为[L, R],则产生的子个体为:

 $X^{k} = X^{k} + k(R - X^{k}) \text{ of } X^{k} = X^{k} - (k(X^{k} - L))$ (12)

仿真过程中,取种群数为 300,交叉概率为0.83, 变异概率为 0.001,迭代次数为 1 000。

4 仿真结果

4.1 窄带信号实验仿真

选取三个相互独立的目标信号,环境噪声设为 均值为 0,方差为 1 的高斯白噪声。设它们的信噪比 均为 20dB,方位到达角分别是 30 °,85 和 165 °。图 2 和图 3 分别给出这三个目标的声强和方位的最佳估 计值随进化代数的增加而变化的关系曲线,表 1 给 出不同信噪比条件下参数的相对均方根误差。

4.2 宽带信号实验仿真

选取三个相互独立的信号,它们的带宽分别为: 1 000Hz~2 000Hz,2 000Hz~3 000Hz 和 3 000Hz~ 4 000Hz。信号方位到达角分别为 30 °,85 和 165 °。 三个信号的信噪比取值均为 20dB。图 4 和图 5 分别 给出这三个目标的声强和方位的最佳估计值随进化



Fig.3 Target orientation estimation

代数增加而变化的关系曲线。表 2 给出不同信噪比 条件下的参数相对均方根误差。

当三个目标信号的带宽相同时,在不同信噪比 条件下进行仿真。从仿真结果能够得到相同的规律, 即未知数的个数固定时,估计精度仅与信噪比有关, 信噪比越大,估计结果的偏差越小,估计值越接近真 实值。这是由于信噪比低时,噪声的干扰强,遗传算 法对微弱信号的搜索能力就差。

5 结束语

从大量的仿真结果来看,当目标间隔大于5时, 无论信号频率如何,目标的声强和方位的最佳估计

	衣1 1	三出出三	在个问后	喋���	相刈均力的	ほたたい	小沼	
Table 1	Compariso	n of th	e relative	RMS	estimation	error	for	narrowband

~ ㅋ ㅎ ㅋ 나 ㅋ ㅋ ㅋ ㅋ ㅋ ㅋ ㅋ ㅋ

相对均方根误差	I ₁	l ₂	I ₃	$ heta_3$	$ heta_3$	$ heta_3$	
不加噪声	0.009 0	0.017 9	0.027 8	0.002 8	0.020 9	0.002 3	
SNR 20dB	0.026 4	0.028 4	0.029 8	0.002 9	0.017 7	0.003 1	
SNR 10dB	0.119 3	0.069 4	0.032 5	0.014 5	0.181 3	0.004 7	
SNR 5dB	0.695 5	0.639 1	0.679 2	0.262 4	0.034 0	0.006 3	
SNR 0dB	1.539 1	2.273 4	1.452 4	0.978 0	0.373 1	0.370 9	

表 2 宽带信号在不同信噪比时相对均方根误差对照

Table 2 Comparison of the relative RMS estimation error for broadband

相对均方根误差	I ₁	2	I ₃	$ heta_3$	$ heta_3$	$ heta_3$
不加噪声	0.017 2	0.018 9	0.009 5	0.020 1	0.003 0	0.0020
SNR 20dB	0.030 7	0.024 4	0.025 9	0.019 3	0.002 2	0.0029
SNR 10dB	0.1396	0.289 1	0.180 2	0.146 7	0.007 0	0.0037
SNR 5dB	0.542 4	0.761 1	0.608 9	0.202 7	0.021 8	0.0076
SNR 0dB	1.504 7	3.081 2	1.599 8	0.669 8	0.048 4	0.0520



值都随着进化代数的增加而逐渐的趋近于理想值。 可以得出结论:遗传算法克服了其它优化算法的缺 点,能快速地找到含有6个变量的高阶非线性方程 组的全局最优解。由于本文采用的非线性方程组的 未知数较多,搜索过程复杂,使得估计值与目标的实 际方位之间存在着一定的偏差,而且这个偏差随信 噪比的降低而增大。在信噪比大于零时,得到的目 标方位估计值的相对均方根误差很小,落在工程允 许的范围内。遗传算法是一种有效的求解单个矢量 水听器所接收的声压和质点振速偶次阶矩所组成的 非线性方程组的工具。对于研究单矢量水听器多目 标方位估计具有重要的意义。

参考文献



Far-Field Azimuth & Elevation Angle Estimation Using a Single Vector-Hydrophone[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(11): 2498-2510.

- [2] Wong K T, Zoltowski M D. Self-Initiating MUSIC-Based Direction Finding in Underwater Acoustic Particle Velocity-Field Beam space[J]. IEEE J. of Oceanic Engineering, 2000, 25(2): 262-273.
- [3] 杨士莪. 单矢量传感器多目标分辨的一种方法[J]. 哈尔 滨工程大学学报, 2003, 24(6): 591-595.
 YANG Shie. Method of multi-sources distinguishing by single vector transducer. Journal of Harbin Engineering University[J]. 2003. 24(6): 591-595.
- [4] 王小平.曹立明.遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.25-31.
 WANG Xiaoping, CAO Liming Genetic algorithm-theory, application and software implement[M]. San: Sian Communication University publishing company, 2002.25-31.