

## 一种新颖的水声信道参数估计算法

张 行<sup>1</sup>, 常 颖<sup>1</sup>, 宋 康<sup>2</sup>, 李春国<sup>1</sup>, 杨绿溪<sup>1</sup>

(1. 东南大学水声信号处理教育部重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 青岛大学电子信息学院, 山东青岛 266071)

**摘 要:** 宽带水声信道通常被建模为多扩展多时延 (MSML) 信道, 不同路径的多普勒扩展不同给信道参数估计带来了挑战. 本文提出一种新颖的 MSML 信道参数估计算法, 称之为改进的粒子群优化 (MPSO) 算法. 该算法创建一个多径列表来记录局部最优粒子的位置和适应度值, 并用于迭代中粒子速度的更新. 算法结束时, 根据多径列表的记录值, 可以同时估计出每一径的多普勒扩展、时延和幅度参数. 仿真结果表明: MPSO 算法的参数估计精度优于匹配追踪 (MP) 算法和分数阶傅里叶变换 (FrFT) 算法.

**关键词:** 水声通信; 参数估计; 多扩展多时延信道; 粒子群优化算法

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2019)02-0509-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.02.036

## A Novel Parameter Estimation Algorithm for Underwater Acoustic Channels

ZHANG Xing<sup>1</sup>, CHANG Ying<sup>1</sup>, SONG Kang<sup>2</sup>, LI Chun-guo<sup>1</sup>, YANG Lu-xi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Underwater Acoustic Signal Processing of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract:** The wideband underwater acoustic multipath channels are usually modeled as a multi-scale multi-lag (MSML) channel. Different paths possess different Doppler scales which brings great challenge to channel parameter estimation. In this paper, we propose a novel algorithm for parameter estimation of MSML channels, which is called modified particle swarm optimization (MPSO) algorithm. This algorithm creates a multi-path list to record positions and fitness values of particles which are local best (*lbests*), and uses these *lbests* to update particles' velocities at each iteration. At the end of the algorithm, the Doppler scale, the time delay and the amplitude can be estimated simultaneously for each path according to the multi-path list. Simulation results show that, the MPSO algorithm outperforms both the matching pursuit (MP) algorithm and the fractional Fourier transform (FrFT) algorithm in estimation accuracy.

**Key words:** underwater acoustic communication; parameter estimation; multi-scale multi-lag (MSML) channel; particle swarm optimization (PSO) algorithm

### 1 引言

近年来水声通信受到了广泛的关注和研究<sup>[1,2]</sup>, 然而, 水声信道严重的多径扩展和多普勒效应却限制了水声通信的性能. 在陆地无线通信中, 多普勒效应可以近似为多普勒频移, 而在水声通信中, 由于信号带宽与声波频率相当, 水声信道呈现出宽带特性, 不同频率受到的多普勒效应影响不同, 因而将多普勒效应处理为多普勒扩展<sup>[3]</sup>. 另外, 水下实验<sup>[4]</sup>发现, 不同路径的多普勒扩展因子不同, 因而本文采用 MSML 信道模型<sup>[5]</sup>.

在 MSML 信道模型中, 每一条路径被参数化为幅

度、时延和多普勒扩展因子三个参数. 现有的信道参数估计算法主要是基于压缩感知 (compressed sensing, CS) 和 FrFT. CS 常用的算法包括基追踪 (basis pursuit, BP) 和 MP, BP 算法过高的计算复杂度使其在实际应用中受限. 文献[6]在每一次迭代中, 使用 MP 算法找出字典中与接收信号相关值最大的列, 作为一条路径的参数, 并减去该径以更新接收信号; 文献[7]提出在 MP 算法中使用最小方差 (least squares, LS) 准则来选取字典中的列; 在 MP 算法的基础上, 文献[4]采用正交匹配追踪 (orthogonal matching pursuit, OMP) 算法进行信道参数估计; 文献[8]提出的分块傅里叶变换算法降低了 OMP

收稿日期 2017-04-10; 修回日期 2018-06-27; 责任编辑: 郭游

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划 (No. 2013CB336600); 国家自然科学基金 (No. 61671144, No. 61521061); 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2014AA01A704)

算法的计算量. 然而, MP 算法及其改进算法都有一个共同的缺点: 使用预定义的字典来近似目标信号, 估计精度受限于字典的大小和计算量的要求.

基于 FrFT 的算法采用线性调频 (linear frequency modulation, LFM) 信号作为前导, 因为选取合适的阶数, LFM 信号可以变换为 FrFT 域上的一个冲激信号<sup>[9]</sup>. 文献[10]提出一种最佳阶数的搜索算法, 根据发射的 LFM 信号与接收的 LFM 信号对应的最佳阶数的变化可以计算出多普勒扩展因子. 在此基础上, 文献[11]利用迭代的方式估计 MSML 信道参数, 在每一次迭代中, 依次估计出多普勒扩展因子、时延和幅度, 并更新接收信号. 基于 FrFT 的算法的主要缺点在于 LFM 的时间分辨率较差, 因而导致时延和多普勒扩展估计精度的降低.

根据以上分析, 本文提出 MPSO 算法进行水声信道参数估计, 该算法适用于基于训练序列进行信道估计的水声系统. 最后仿真验证了所提算法的估计性能优于 MP 算法和 FrFT 算法.

## 2 系统模型

正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术将频率选择性衰落信道划分为多个正交子信道, 每个子信道频率平坦衰落, 以避免符号间干扰, 能较好的抵抗水声信道中严重的多径干扰, 因而本文采用基于循环前缀的 OFDM 调制<sup>[4]</sup>. 令  $B$  为信道带宽,  $N$  为子载波个数, 则子载波间隔为  $\Delta f = B/N$ , 一个 OFDM 符号持续时间为  $T = 1/\Delta f$ , 每个 OFDM 符号的循环前缀时间长度为  $T_g$ .

令  $\mathbf{s} = \{s_0, s_1, \dots, s_{N-1}\}^T$  为发送数据序列, 则基带发射信号为

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{j2\pi\tau_n} q(t), \quad t \in [-T_g, T] \quad (1)$$

式中,  $q(t)$  为成形滤波器. 本文中,  $q(t)$  采用矩形脉冲成形器:

$$q(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, T] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

经频率为  $f_c$  的载波上变频, 得到的带通信号为:

$$\tilde{x}(t) = \text{Re}\left\{e^{j2\pi f_c t} \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{j2\pi\tau_n} q(t)\right\}, \quad t \in [-T_g, T] \quad (3)$$

MSML 信道模型为

$$h(\tau, t) = \sum_{l=1}^L A_l(t) \delta(\tau - \tau_l(t)) \quad (4)$$

式中,  $L$  为信道抽头数,  $\delta(\cdot)$  为单位冲激函数,  $A_l(t)$  和  $\tau_l(t)$  分别为第  $l$  条路径的增益和时延. 在一帧信号持续时间内, 假定路径增益恒定, 即:  $A_l(t) \approx A_l$ ; 且路径时延可以用该路径的多普勒扩展因子  $a_l$  表示为

$$\tau_l(t) = \tau_l - (a_l - 1)t \quad (5)$$

信号经过上述信道, 到达接收端为

$$\tilde{y}(t) = \sum_{l=1}^L A_l \tilde{x}(a_l t - \tau_l) + \tilde{n}(t), \quad t \in [-T_g, \frac{T}{a_l}] \quad (6)$$

式中,  $\tilde{n}(t)$  是 高 斯 白 噪 声.

## 3 MPSO 算法

水声信道具有稀疏特性<sup>[11]</sup>, 信道能量集中在较少的路径上, 因而信道模型中的抽头数  $L$  取值通常是一个较小的正整数, 这  $L$  条路径的  $\{a_l, \tau_l, A_l\}$  参数对可以用 MPSO 算法进行估计.

在粒子群算法<sup>[12]</sup>中, 令共有  $p$  个粒子, 每个粒子的位置表示一个可能的  $\{a_l, \tau_l\}$  参数对, 在第  $k+1$  次迭代中, 根据下式更新粒子  $i$  的位置:

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \quad (7)$$

式中  $v_{k+1}^i$  的计算公式为

$$v_{k+1}^i = \omega_k v_k^i + c_1 r_1 (p_k^i - x_k^i) + c_2 r_2 (p_k^g - x_k^i) \quad (8)$$

式中,  $\omega_k$  为惯性权重,  $r_1$  和  $r_2$  为  $0 \sim 1$  之间的随机数,  $c_1$  和  $c_2$  为常数, 通常取值为 2.  $p_k^i$  为粒子  $i$  在  $k$  次迭代中的最优值,  $p_k^g$  为所有粒子的最优值.

迭代结束时, 全局最优值对应的粒子的位置即为多普勒扩展和时延的最优估计值. 因此, 粒子群算法仅可以估计出最强径的参数值, 不适用于 MSML 信道参数估计. 在 MPSO 算法中, 我们通过时延差值来区分两条路径, 即两条不同路径的时延差值需满足:

$$|\tau_i - \tau_j| > \Delta_{peak}; \quad i \neq j \quad (9)$$

式中  $\Delta_{peak}$  是设定的阈值. 选取被划分为同一径的粒子中的最大适应度值作为该路径的适应度值, 并用局部最优值代替式(8)中的  $p_k^g$  对粒子速度进行更新. 详细的算法步骤如下:

(1) 初始化

① 设置常量值  $c_1, c_2, \omega_k$ , 最大迭代次数  $k_{max}$ , 设置迭代计数器  $k=0$ .

② 初始化粒子的二维位置值  $x_0^i \in D, i=1, \dots, p$  和速度值  $v_0^i \leq v_{max}, i=1, \dots, p$ , 其中  $D$  为粒子的位置空间.

③ 计算粒子的适应度值  $f_0^i, i=1, \dots, p$ , 且当  $f_0^i > thr1$  时,  $x_0^i$  和相应的  $f_0^i$  将被加入多径列表中, 并分别记作  $p_{lbest}^i$  和  $lbest(i)$ .

④ 设置  $f_{lbest}^i = f_0^i, p_0^i = x_0^i, i=1, \dots, p$ .

(2) 优化

① 对每一个粒子, 从多径列表中找出与其最邻近的  $\tau_l$ , 如果  $f_k^i < lbest(l)$ , 执行下一步, 否则, 跳至③.

② 根据  $v_{k+1}^i = \omega_k v_k^i + c_1 r_1 (p_k^i - x_k^i) + c_2 r_2 (p_{lbest}^i - x_k^i)$  更新粒子速度, 式中  $p_{lbest}^i$  是局部最优值  $lbest(l)$  对应的位置.

- ③根据  $v_{k+1}^i = \omega_k v_k^i + c_1 r_1 (p_k^i - x_k^i)$  更新粒子速度.
- ④根据式(7)更新粒子位置,设置  $i = 0$ .
- ⑤计算粒子  $i$  的适应度值  $f_{k+1}^i$ .
- ⑥如果  $f_{k+1}^i > \min(lbest)$ , 执行下一步, 否则, 设置  $i = i + 1$ , 并跳至⑤.
- ⑦更新  $f_{best}^i$  和  $p_{k+1}^i$ ; 从多径列表中选择与粒子  $i$  时延距离最近的  $\tau_l$ , 并计算差值  $\Delta_\tau = |\tau_i - \tau_l|$ .
- ⑧如果  $\Delta_\tau > \Delta_{peak}$ , 将  $x_{k+1}^i$  及对应的  $f_{k+1}^i$  添加进多径列表, 跳至⑩, 否则执行下一步.
- ⑨如果  $lbest(l) < f_{k+1}^i$ , 更新  $lbest$ .
- ⑩如果  $i > p$ , 设置  $k = k + 1$ , 执行下一步, 否则, 设置  $i = i + 1$ , 跳至⑦.
- ⑪循环执行步骤① ~ ⑩, 直至  $k > k_{max}$ .
- ⑫选取多径列表中  $lbest(l) > thr2$  的粒子位置值  $\{a_l, \tau_l\}$ , 即为第  $l$  条路径的多普勒扩展因子和时延的估计值.

注:  $\Delta_{peak}$ ,  $thr1$  和  $thr2$  是 MPSO 算法中需要设定的三个阈值,  $\Delta_{peak}$  为可以区分两条路径的最小时延差值;  $thr1$  和  $thr2$  都是归一化能量门限, 一般取  $thr1 \in [0.05, 0.15]$ ,  $thr2 \in [0.4, 0.6]$ .

## 4 仿真实验

通过大量的仿真实验, 对本文提出的 MPSO 算法进行性能测试, 并与 MP 算法<sup>[6]</sup> 和 FrFT 算法<sup>[11]</sup> 进行比较. 仿真参数设置如下: 信道带宽为 9.77KHz, 子载波数目为 1024, OFDM 符号持续时间为 104.86ms, 循环前缀时间长度为 24.6ms, 载波频率为 13KHz; 多径数目设置为 8, 各径归一化幅度均匀分布, 多普勒扩展因子  $a_l$  ( $l = 1, 2, \dots, L$ ) 在  $[1, 1.02]$  均匀分布<sup>[11]</sup>, 时延在一个符号持续时间内随机分布. MPSO 算法参数设置为: 惯性权重为 1, 粒子数为 200, 最大迭代次数为 30, 阈值  $\Delta_{peak}$ ,  $thr1$  和  $thr2$  分别为 3.07ms, 0.1 和 0.4.

仿真采用零相关带 (zone correlation zone, ZCZ) 序

列<sup>[13]</sup> 作为训练序列, 记作  $Z$ , 在接收端, 使用粒子的位置  $\{a_i, \tau_i\}$  中的多普勒扩展因子  $a_i$  重采样本地 ZCZ 序列, 得到  $Z_{a_i}(t) = Z(a_i t)$ , 与接收信号进行互相关运算, 得到粒子适应度值, 也即为路径幅度值<sup>[11]</sup>:

$$M = |C|^2 / P^2 \quad (10)$$

式中,  $C = \sum_{m=0}^{M-1} y(\tau_i + m) Z_{a_i}^*(m)$ ,  $P = \sum_{m=0}^{M-1} [z_{a_i}(m) \cdot z_{a_i}^*(m)]$ ,  $M$  为  $z_{a_i}$  的长度.

图 1 为三种算法对信道时延扩展函数估计的归一化均方误差 (normalized mean squared error, NMSE) 比较图, 信道时延扩展函数的定义可参见文献<sup>[11]</sup>. 由图可知, MP 算法的性能最差; 信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 低于 -4dB 时, MPSO 算法较之于 FrFT 算法可获得约 4dB 的性能增益, 随着 SNR 的增加, MPSO 算法的优势更加明显.

图 2 比较的是多普勒扩展因子估计的 NMSE, 其计算式为

$$NMSE_{scale} = \frac{\sum_{l=1}^L |\hat{\alpha}_l - \alpha_l|^2}{\sum_{l=1}^L |\alpha_l|^2} \quad (11)$$

图 2 中, MPSO 算法的估计性能明显优于其他两种算法, 在 -10dB 时的估计精度与 FrFT 算法在较高的 SNR 下的估计精度相当.

图 3 比较的是时延估计差值, 即

$$Error_{delay} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |\hat{\tau}_l - \tau_l| \quad (12)$$

从图中可以看出, MP 算法的估计误差在 2.6 个采样点附近波动, 性能较差; FrFT 算法的估计误差随着 SNR 的增加略有降低, 但仍然远大于 MPSO 算法的估计误差; 相比之下, 在 -5dB 时, MPSO 算法的估计误差就接近于 0, 估计精度极高.

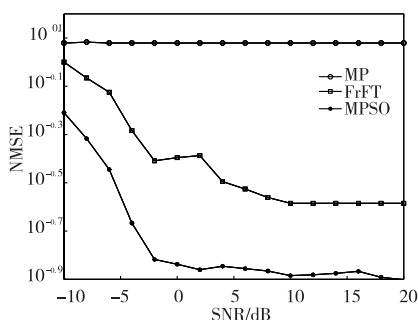


图1 时延扩展函数估计的NMSE

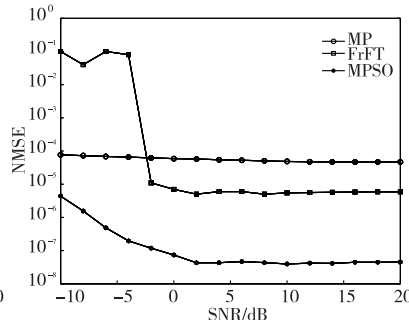


图2 多普勒扩展因子估计的NMSE

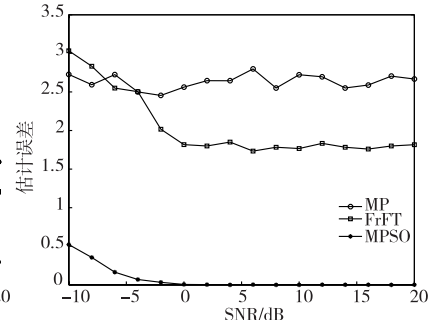


图3 时延估计误差 / samples

## 5 结语

本文提出一种新颖的 MPSO 算法用于宽带水声信道参数估计. MPSO 算法可以同时估计出各条路径的多

普勒扩展、时延和幅度参数, 适用于 MSML 信道模型. 仿真实验表明, 对于时延扩展函数、多普勒扩展因子以及路径时延的估计, MPSO 算法的性能均优于 MP 算法和 FrFT 算法.

## 参考文献

- [1] Mason S F, Berger C R, et al. Detection, synchronization, and Doppler scale estimation with multicarrier waveforms in underwater acoustic communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(9): 1638 – 1649.
- [2] Singer A C, Nelson J K, Kozat S S. Signal processing for underwater acoustic communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1): 90 – 96.
- [3] Li B, Zhou S, et al. Multicarrier communication over underwater acoustic channels with nonuniform Doppler shifts [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(2): 198 – 209.
- [4] Berger C R, Zhou S, et al. Sparse channel estimation for multicarrier underwater acoustic communication: from subspace methods to compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1708 – 1721.
- [5] Xu T, Tang Z, et al. Multi-rate block transmission over wideband multi-scale multi-lag channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(4): 964 – 979.
- [6] Cotter S, Rao B. Sparse channel estimation via matching pursuit with application to equalization [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(3): 374 – 377.
- [7] Li W, Preisig J C. Estimation of rapidly time-varying sparse channels [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(4): 927 – 939.
- [8] Yu F, Li D, et al. Block-FFT based OMP for compressed channel estimation in underwater acoustic communications [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(11): 1937 – 1940.
- [9] 殷敬伟, 惠俊英, 蔡平等. 分数阶 Fourier 变换在深海远程水声通信中的应用 [J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1499 – 1504.  
YIN Jing-wei, HUI Jun-ying, et al. Application of fractional fourier transform in long range deep-water acoustic communication [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1499 – 1504. (in Chinese)
- [10] Zheng L, Shi D. Maximum amplitude method for estimating compact fractional Fourier domain [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(3): 293 – 296.
- [11] Zhao Y, Yu H, et al. Parameter estimation of wideband underwater acoustic multipath channels based on fractional Fourier transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(20): 5396 – 5408.
- [12] 吴晓军, 李峰, 马悦等. 均匀搜索粒子群算法的收敛性分析 [J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1115 – 1120.
- WU Xiao-jun, LI Feng, MA Yue, XING Yun-hong. The convergence analysis of the uniform search particle swarm optimization [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6): 1115 – 1120. (in Chinese)
- [13] Wang Y, He S, et al. Joint timing synchronization and channel estimation based on ZCZ sequence set in SC-MIMO-FDE system [J]. EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking, 2016, 2016(49): 1 – 17.

## 作者简介



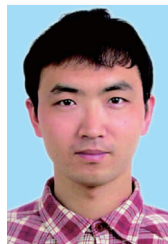
张 行 女, 1992 年 9 月生于安徽广德, 东南大学硕士生, 主要研究方向为水声信号处理。  
E-mail: 220150713@seu.edu.cn



常 颖 女, 1994 年 5 月生于江苏扬州, 东南大学硕士生, 主要研究方向为水声信号处理。  
E-mail: 119709443@qq.com



宋 康 男, 1986 年 9 月生于山东青岛, 青岛大学讲师, 主要研究方向为 MIMO 无线通信。  
E-mail: sk@qdu.edu.cn



李春国 (通信作者) 男, 1983 年 1 月生于山东胶州, 东南大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为多天线中继传输理论与技术研究、水声信号处理。  
E-mail: chunguoli@seu.edu.cn



杨绿溪 男, 1964 年生于安徽桐城, 东南大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理。  
E-mail: lxyang@seu.edu.cn