

# 双曲调频信号的级联原子库参数估计

林聪仁 原玉婷 孙海信 齐洁 古叶  
(厦门大学 信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 为降低水下通信中出现的多径和多普勒效应, 提高水下目标探测精度, 采用双曲调频信号作为探测信号, 利用双曲调频信号(hyperbolic modulation frequency, HFM)时频变化具有双曲线的特征, 通过建立 HFM 信号时间-尺度级联原子库模型, 在原子库中寻找最优解, 进而对 HFM 信号的两个频率变化因子进行估计。计算机仿真和水池实验的结果均证明, 相较于现在常用的小波-拉东变换(wavelet-Radon)估计方法, 本方法的均方根误差小于 1%, 因此在水下目标探测中有较大的应用价值。

**关键词:** 水声通信系统; 级联原子库; 双曲调频信号; 参数估计; 时间-尺度原子; 小波-拉东变换

**doi:** 10.11990/jheu.201501025

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1390.u.20160127.1137.028.html>

中图分类号: TB52+9 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2016)04-0625-04

## Estimating parameters of hyperbolic modulation frequency signal based on cascade dictionary

LIN Congren, YUAN Yuting, SUN Haixin, QI Jie, GU Ye  
(College of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** To reduce the multi-path and Doppler effects occurring in underwater communications and to increase the precision of underwater target detection, we employ a modulation frequency signal as the detection signal. A hyperbolic modulation frequency (HFM) signal is hyperbolic in the time-frequency domain. In view of this feature, we establish a time-scale cascade dictionary model to find the optimal solution; furthermore, two frequency variation factors of the HFM signal are estimated. The simulation results and the pool trials show that the proposed algorithm performs well, and its accuracy is superior to that of the commonly used wavelet-Radon transform. The root mean square error of the frequency variation factors is 1% lower than that achieved using the wavelet Radon transform. This demonstrates the potential of the suggested algorithm for underwater target detection.

**Keywords:** underwater acoustic communication; cascade dictionary; HFM modulation signal; parameter estimation; time-scale atomic; wavelet-Radon transform

非平稳信号由于具有频率时变、截获概率低等技术特点, 因此在雷达、声呐和无线通信领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。双曲调频(hyperbolic modulation frequency, HFM)信号是一种典型的非平稳信号, 在时频平面中呈现双曲线形状, 在多径情况下仅造成双曲线的水平移动, 而不会造成信号失真, 从而能有效地对信号进行时频分析<sup>[3]</sup>; 不仅如此, HFM 信号是多普勒不变信号, 因此可以将其作为导频信号来计算恶劣水声通信环境中的多普勒偏移, 从而实现系

统同步<sup>[4-5]</sup>。这些优点使得 HFM 信号成为水下通信以及无线通信领域的研究热点。通过计算信号的瞬时频率来进行 HFM 信号的检测<sup>[6]</sup>, 可以减少计算量, 但是并未给出具体参数估计的过程, 因此只能用于 HFM 信号探测, 而不能用于信号解调; 采用尺度宽容小波检测器处理 HFM 信号时<sup>[7]</sup>, 虽然可以在短时间内检测到信号, 但是却忽略了目标速度引起的尺度影响, 使检测精度降低; 目前通信系统中广泛采用 wavelet-Radon 法对 HFM 信号进行检测, 其结果相对准确, 但是会引起连带误差<sup>[8]</sup>。

在信号分析中, 为了提高信号处理的效率与速度, 总是希望找到一种最稀疏的数据来表示和取代原始数据, 从而减少数据处理量, 提高信号的检测效率<sup>[9]</sup>。本文提出一种基于级联原子库参数估计的信号处理方法。该方法是根据信号的相关性进行自适应分解, 将信号分解到一组高度冗余的过完备基

收稿日期: 2014-09-29. 网络出版日期: 2016-01-27.  
基金项目: 国家自然科学基金项目(61471309, 61107023); 国家教育部博士点基金项目(20110121120020); 福建省自然科学基金项目(2013J01258); 福建省重点基金项目(2012H1012); 福建省自然科学基金项目(2010J01344).  
作者简介: 林聪仁(1963-), 男, 副教授, 硕士生导师;  
齐洁(1974-), 女, 讲师, 硕士生导师.  
通信作者: 齐洁, E-mail: qjie@xmu.edu.cn.

(即原子库)上进行。用来表示信号的过完备基可以自适应地根据信号本身的特点灵活选取。

### 1 双曲调频信号(HFM)

发射信号为矩形包络的双曲调频信号:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot \exp\left\{-j\left[2\pi k \ln\left(1 - \frac{t}{t_0}\right)\right]\right\} \quad (1)$$

式中:  $\text{rect}(t) = 1, |t| \leq \frac{1}{2}$ 。

HFM 信号的调频规律为双曲函数:

$$f_1(t) = \frac{k}{t_0 - t} \quad (2)$$

式中:  $k = \frac{T f_{\max} f_{\min}}{B}, t_0 = \frac{f_0 T}{B}$ , 且  $f_0$  为算术中心频率。

由式(2)可以看出,HFM 信号的调频率是一条双曲线,下面通过建立级联原子库来进行信号的参数估计。

### 2 级联原子库

虽然单个的原子库已经是过完备的,但其是由一个函数离散化得出的,具有单一结果,通常只适合分解一类信号,进行单一参数的估计。若分解多分量信号并进行多参数估计,单个原子库分解必然会有一些局限,导致分解后的稀疏度不高。而使用级联原子库进行稀疏分解则能很好的解决这个问题。

常用的单一类型原子库主要有频率原子、时间尺度原子以及时频原子,用这三类原子库进行组合即可得到级联原子库。构造级联原子库时,需要充分考虑信号的特点,由信号的特点来选择合适的原子库组成级联原子库<sup>[10]</sup>。本文所选取的级联原子库是时间尺度原子和时频原子。

#### 2.1 时间尺度原子

设信号为  $f$ , 在尺度  $s$ , 位置  $\mu$  的时间尺度变换可以定义为下面的形式:

$$Wf(\mu, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\mu}{s}\right) dt \quad (3)$$

其中,  $\gamma = (\mu, s)$  是原子库的参数组。 $\psi((t-\mu)/s)$  构成过完备原子库  $D$ , 通过对参数的确定,可以在过完备原子库  $D$  中选择与信号  $f(t)$  最匹配的原子。

#### 2.2 时频原子

设信号为  $f$ , 其长度为  $N$ ,  $D$  为过完备原子库,  $g$  为原子库中经归一化的原子  $\|g\| = 1$ , 信号分解时,在过完备原子库  $D$  中选择与信号  $f(t)$  最匹配的原子,其选择原则为内积最大,设第一个最匹配原子为  $g_1$ , 则

$$|\langle f, g_1 \rangle| = \sup_{g \in D} |\langle f, g \rangle| \quad (4)$$

已知原子满足归一化条件,因此,信号  $f$  可以分解为两部分:原子  $g_1$  上的分量和残差  $R^1 f$ , 即

$$f = \langle f, g_1 \rangle g_1 + R^1 f \quad (5)$$

然后对每次匹配的残差进行分解,直到终止条件,若对信号分解了  $n$  次,则可以表示成

$$f = \sum_{k=0}^{n-1} \langle R^k f, g_{r_k} \rangle g_{r_k} + R^n f \quad (6)$$

通过时间尺度原子和时频原子构建关于参数  $k$  和  $t_0$  的原子库:

$$H_f\{g_d\} = \begin{pmatrix} g_r(s_1, \tau_1) & \cdots & g_r(s_1, \tau_m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_r(s_n, \tau_1) & \cdots & g_r(s_n, \tau_m) \\ g_s(t_{01}, k_1) & \cdots & g_s(t_{01}, k_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_s(t_{0M}, k_1) & \cdots & g_s(t_{0M}, k_N) \end{pmatrix} \sim \quad (7)$$

式中:  $g_r(s_n, \tau_m)$  是根据信号所建立的时间尺度原子库,  $g_s(t_{0M}, k_N)$  是根据信号所建立的时频原子库。

### 3 参数估计流程

对水下宽带主动系统而言,相关处理方法是利用回波与发射波的相似性来完成信号的检测与参数估计,这与建立时间尺度原子库是相符合的。所以,可以通过建立时间尺度原子库的方法进行参数估计。图 1 是参数估计流程图。

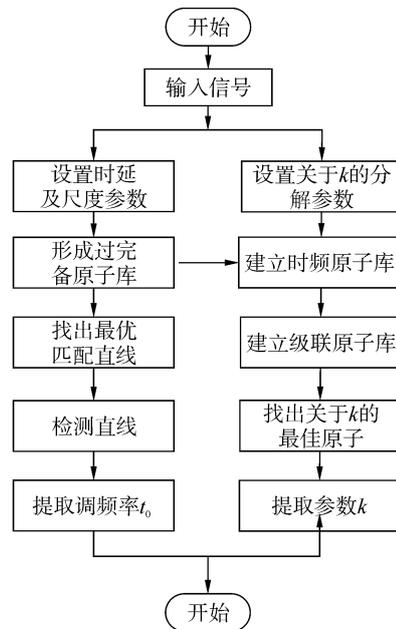


图 1 参数估计流程图

Fig.1 The flow chart of parameter estimation

### 4 计算机仿真

利用级联原子库法和 wavelet-Radon 法来进行参数估计对比。

信道参数设置为: 信噪比 SNR=0 dB, 最大频偏  $f_d=5$  Hz, 功率衰落  $A=-10$  dB, 时延  $S=10$  s; 设双曲调频信号的具体形式为

$$u(t) = \sqrt{20} \times \text{rect}(20t) \exp\left\{-j\left[2\pi k \ln\left(1 - \frac{t}{t_0}\right)\right]\right\} \quad (8)$$

式中:  $k=2\ 770$   $t_0=3$ 。

接收信号如图 2 所示。由图 2 可以看出信号完全淹没在噪声中。对比图 3 和图 4、图 5 和图 6 可以看出, 利用级联原子库进行参数估计时, 参数峰值聚集度较高, 因此参数估计的准确性更高。图 3~6 给出了 SNR=0 dB 时两种方法的处理结果。

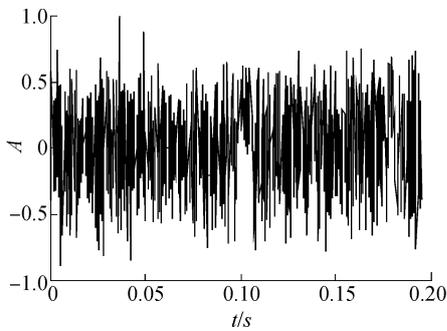


图 2 SNR=0dB 时域信号

Fig.2 The time domain signal of SNR=0 dB

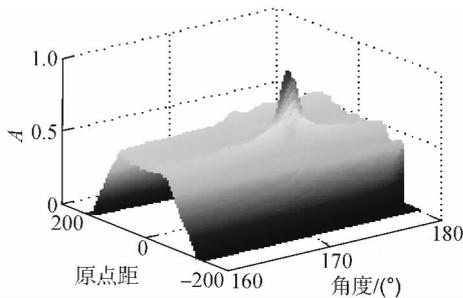


图 3 基于 wavelet-Radon 的  $t_0$  估计

Fig.3 The estimation of  $t_0$  based on wavelet-Radon

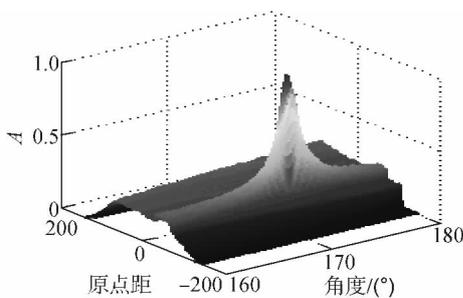


图 4 基于级联原子库的  $t_0$  估计

Fig.4 The estimation of  $t_0$  based on cascade atom library

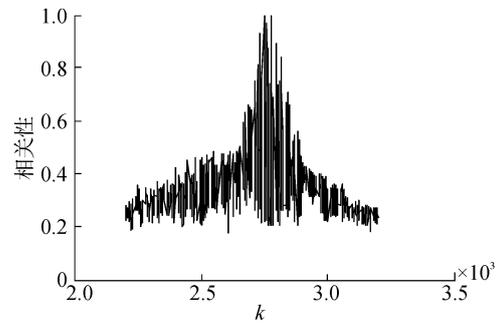


图 5 基于 wavelet-Radon 的  $k$  估计

Fig.5 The estimation of  $k$  based on wavelet-Radon

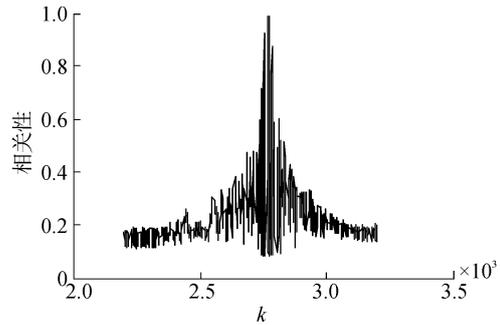


图 6 级联原子库的  $k$  估计

Fig.6 The estimation of  $k$  based on cascade atom library

### 5 水池实验

下面通过水池实验来进行进一步的验证。实验在长 15 m, 宽 5 m 的水池中进行, 换能器和水听器之间的距离为 8 m。流程如图 7 所示。系统参数设置为: 采样率 66 kHz, 中心频率 11 kHz, 带宽 4 kHz, 偏置设置为 0.35; 共进行 6 次实验, 每次传输 200 帧数据, 共 1 200 组样本。

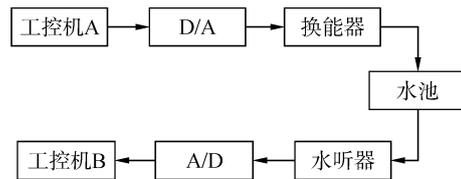


图 7 水池实验过程示意图

Fig.7 The process of pool experiment

工控机 A 输出 HFM 信号, 待估计参数设置为:  $k=4\ 770$   $t_0=2$ 。图 8 为工控机 B 从水池中接收到的信号, 可以看出信号噪声的能量在整个时间段内都比较大。实验中, 使用均方根误差作为参数估计准确度的衡量标准。均方根误差的表达式为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_0)^2}{n}} \quad (8)$$

式中:  $x_0$  为准确值(真值),  $x$  为估计值,  $n$  为数据点数。

将级联原子库法和 wavelet-Radon 法进行对比

验证 结果如表 1 所示。

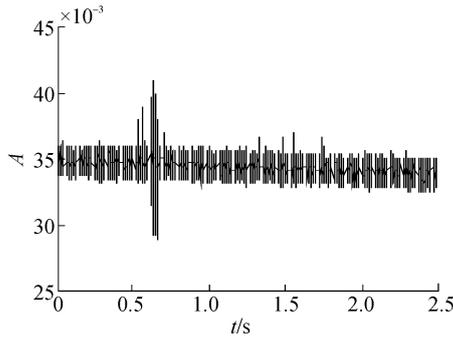


图 8 接收信号

Fig.8 The received signal

表 1 级联原子库和 wavelet-Radon 处理结果比较

Table 1 Comparing with the results of the cascade atom library and wavelet-Radon

	级联原子库	wavelet-Radon
$k$	4 770	4 770
RMSE( $k$ )	3.257	10.232
$t_0$	2	2
RMSE( $t_0$ )	0.056	0.091

由表 1 可知 ,采用级联原子库法得到的参数  $k$  和  $t_0$  的均方根误差皆小于 wavelet-Radon 法 通过建立级联原子库进行参数估计的方法 误差约为 wavelet-Radon 法的 1/3。其原因是: wavelet-Radon 法需要根据  $t_0$  的估计结果来估计  $k$  造成连带误差;而级联原子库法是同时进行参数  $k$  和  $t_0$  的估计 因此不存在连带误差 从而提高了信号参数估计的精度。

## 6 结论

根据 HFM 信号频域的双曲特性 本文提出了基于级联原子库的 HFM 信号参数估计方法 并与常用的 wavelet-Radon 法进行了对比。结果表明:

1) 采用该方法可以同时估计信号的初始频率和调频率 减少由于信号初始频率误差而导致的调频率准确度降低的现象 相较于常用的 wavelet-Radon 法 本方法具有更高的检测精度。

2) 该方法可以使信号获得非常简洁的表达(即稀疏表示) 减少了数据处理量 加快了计算速度。

## 参考文献:

[1]冯成旭,许江湖,罗亚松.消除冗余循环前缀的水声信道 OFDM 频域均衡算法[J].哈尔滨工程大学学报,2014,35(4):482-487.  
FENG Chengxu, XU Jianghu, LUO Yasong. Frequency-domain equalization algorithm to eliminate redundant circular prefix for OFDM underwater acoustic communications [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(4): 482-487.

[2]KUIAI Xiaoyan, SUN Haixin, SHEN Weijie, et al. Peak-to-average power ratio reduction in underwater acoustic CE-OFDM system by phase modulation [J]. Journal of convergence information technology, 2012, 7(9): 380-386.

[3]YANG Changsheng, LIAN Hong, YANG Shenggang. Analysis of Self-CWT ridge of wideband HFM signal [J]. Journal of system simulation, 2008, 20(19): 5324-5327.

[4]YANG J, SARKAR T K. Doppler-invariant property of hyperbolic frequency modulated waveforms [J]. Microwave and optical technology letters, 2006, 48(6): 1174-1179.

[5]张学森,孔繁慧,冯海泓.用双曲线调频信号实现水声通信的频偏估计和同步[J].声学技术,2010,29(2):210-213.  
ZHANG Xuesen, KONG Fanhui, FENG Haihong. Frequency offset estimation and synchronization of underwater acoustic communication with hyperbolic frequency modulation signal [J]. Technical acoustics, 2010, 29(2) 210-213.

[6]ZHANG Lan, XU Xiaomei, FENG Wei, et al. Doppler estimation, synchronization with HFM signals for underwater acoustic communications [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 198/199: 1638-1645.

[7]PHAM V L, WONG K P. Antidistortion method for wavelet transform filter banks and nonstationary power system waveform harmonic analysis [J]. IEEE proceedings: generation, transmission and distribution, 2001, 148(2): 117-122.

[8]杨长生,陈航.一种基于 Wavelet-Radon 变换的宽带双曲调频信号检测方法[J].鱼雷技术,2009,17(1):18-21.  
YANG Changsheng, CHEN Hang. A wideband HFM signal detection method based on wavelet-radon transform [J]. Torpedo technology, 2009, 17(1): 18-21.

[9]ZHANG Gexiang. Time-frequency atom decomposition with quantum-inspired evolutionary algorithms [J]. Circuits, systems and signal processing, 2009, 29(2): 209-233.

[10]JIANG Hong, WANC Defa, LIU Chang. Joint parameter estimation of DOD/DOA/polarization for bistatic MIMO radar [J]. The journal of China universities of posts and telecommunications, 2010, 17(5): 32-37.