基于单比特量化的单频信号时延估计算法

高 杰[1,2]，冯海弘[1]，黄敏燕[1]，郭 霖[1]
(1. 中国科学院声学研究所东海研究站，上海 200032；2. 中国科学院研究生院，北京 100190)

摘要：提出了一种基于单比特量化的单频信号自适应时延估计算法，采用该算法在保持信号频谱特性不发生变化的基础上，极大地去除信号冗余量，对简化后的信号框架采用包络检测，估计时延。对接收信号进行单比特量化能够最大限度地降低数据量，同时量化结果又进一步简化了单频信号滤波器的输入响应函数结构，自适应算法则保证了时延估计的高分辨率。通过仿真实验表明，该算法在不造成频偏和频率衰减的同时，又很好保证了时延估计精度。最后利用湖上实验验证了算法的有效性和可靠性。

关键词：单比特量化；Notch 滤波；时延估计
中图分类号：TB556 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2009)-02-0176-04
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2009.02.018

Time-delay estimation of sinusoidal signals based on one-bit quantification

GAO Jie[1,2], FENG Hai-hong[1], HUANG Min-yan[1], GUO Lin[1]
(1. *Shanghai Acoustic Laboratory*, *Chines Academy of Sciences*, *Shanghai* 200032, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

Abstract: A new method to estimate time-delay of sinusoidal signals is proposed in this paper. In the described method, the sinusoidal signals are one-bit quantified on the basis of keeping the signal's amplitude-frequency characteristics. In this way the amount of data is reduced maximally. The quantified result also simplifies the response function of the Notch filter. The simulation shows that the algorithm guarantees the high accuracy of time delay estimation without frequency bias or reduction. And, lake-trial data are provided to demonstrate the effectiveness and precision of the proposed algorithm.

Key words: one-bit quantification; notch filter; time-delay estimation

1 引 言

时延估计是雷达、声纳、通信等领域被广泛研究的重要问题，尤其在水声信号处理领域，其研究的基本问题是根据所接收到的目标信号，准确、快速地估计和测定接收信号相对于基准时间的延迟，或是所接收的不同信号之间由于传播距离的不同所导致的相对时间延迟。时延估计技术最为典型的应用是在各种定位系统中，在水声定位系统中，其精度直接影响着定位精度。

就窄带信号特别是单频信号造成的时延估计精度限制，国内外学者研究了多种高分辨率的时延估计方法[1-3]。这些基于时域或频域实现的自适应算法，虽然估计精度比较高，但是算法相对复杂，计算量和数据量都非常大，对于实时系统来说应用存在一定的局限性。

针对目前主流算法在应用上的局限性，本文提出了一种基于单比特量化时延估计算法，本算法首先将接收信号转化为单比特量化信号，从而最大限度地降低了数据量，量化信号由于其结果简单，无论经过何种滤波器，都能很好地将滤波器输入响应函数结构化简。为了保证时延估计的高分辨率，本算法采用自适应估计，由于信号结构进行了最大限度地简化，从而也很好地避免了自适应算法计算量大的缺点。

2 算法推导

设接收信号的时域形式为 $x(t)$，在时域上将其量化，即

$$x(t)=\begin{cases}1 & x(t)>0\\ 0 & x(t)\le 0\end{cases} \tag{1}$$

此时，接收信号为一幅度离散量，且幅值均为

收稿日期：2008-10-31；**修回日期**：2009-02-24
基金项目 国家高技术研究发展计划资助课题(2006AA09Z310)
作者简介：高杰(1981-)，男，浙江慈溪人，硕士研究生，研究方向为水声定位与导航。
通讯作者：高杰，E-mail: gaojie@mail.ioa.ac.cn

单比特量，有利于数据的编码和传输。

2.1　单比特信号拟合

如图 1 所示，输入信号由输入目标信号 $s(k)$和高斯白噪声 $n(k)$所组成。

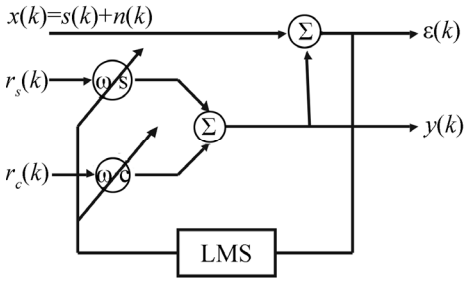


图 1　自适应 Notch 滤波器原理图

Fig.1　Principle of adaptive Notch filter

设两路正交参考信号分别为：

$$r_s(k)=A\sin\omega_0 k\ ,\quad r_c(k)=A\cos\omega_0 k \tag{2}$$

式(2)中 ω_0 为已知常数，即为目标信号的中心频率，先验已知。

采用 LMS 算法对两个正交权系数 w_s、w_c 进行自适应学习，其离散形式迭代公式为：

$$w_s(k+1)=w_s(k)+\mu\varepsilon(k)\sin(\omega_0 k) \tag{3}$$

$$w_c(k+1)=w_c(k)+\mu\varepsilon(k)\cos(\omega_0 k) \tag{4}$$

$$\varepsilon(k)=x(k)-y(k) \tag{5}$$

$$y(k)=w_s(k)\sin(\omega_0 k)+w_c(k)\cos(\omega_0 k) \tag{6}$$

式中 μ 为自适应步长，由式(7)确定：

$$\mu=\frac{2\pi\tau_s B}{A^2} \tag{7}$$

其中 τ_s 为采用间隔，B 为滤波器带宽，A 为参考信号幅度。

将式(1)代入式(5)得：

$$\varepsilon(k)=\begin{cases}1-y(k) & x(k)>0\\ -y(k) & x(k)\le 0\end{cases} \tag{8}$$

则迭代公式化为：

$$w_s(k+1)=\begin{cases}w_s' & x(k)\le 0\\ w_s'+\mu\sin(\omega_0 k) & x(k)>0\end{cases} \tag{9}$$

式中 $w_s'=w_s(k)-\mu y(k)\sin(\omega_0 k)$。

$$w_c(k+1)=\begin{cases}w_c' & x(k)\le 0\\ w_c'+\mu\cos(\omega_0 k) & x(k)>0\end{cases} \tag{10}$$

式中 $w_c'=w_c(k)-\mu y(k)\cos(\omega_0 k)$。

显然，式(9)和式(10)的迭代结构要比式(3)、式(4)简单许多。

经过上述迭代步骤，可以拟合出目标信号，设拟合信号为 $y(k)$。经过拟合重构，目标信号的幅度又一次被复杂化，为了降低信号检测的复杂度，将拟合信号幅值重新离散量化，即单比特化，重构出单比特量化信号。

2.2　单比特信号检测

单比特信号的检测相对来说并不复杂，虽然信号经历了两次单比特量化，但无论是量化信号还是拟合信号，其信号结构依然保持不变，可采用常规的包络检测方法[4]提取单比特量化信号的包络。图 2 给出了本算法采用的包络检测判时延法的流程图。

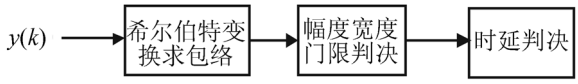


图 2　信号检测算法流程框图

Fig.2　The architecture of the algorithm

3　算法实验结果

3.1　仿真实验

仿真实验中信号表示形式为：

$s(t)=\sin(2\pi ft)$，　$0<t<T_w$

中心频率 f 取 25kHz，脉宽 T_w 取 10ms。

首先考察算法对信号频率偏移的影响，仿真条件取信噪比 SNR=10dB 的单频信号，仿真结果如图 3、图 4 所示。

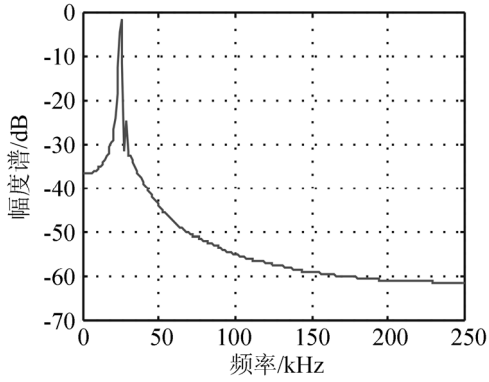


图 3　原始信号 Notch 输出频谱

Fig.3　The normal signal spectrum of Notch filter output

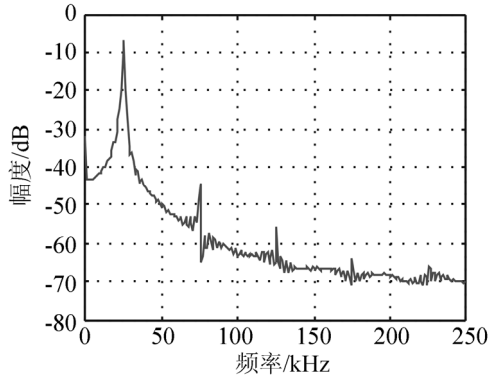


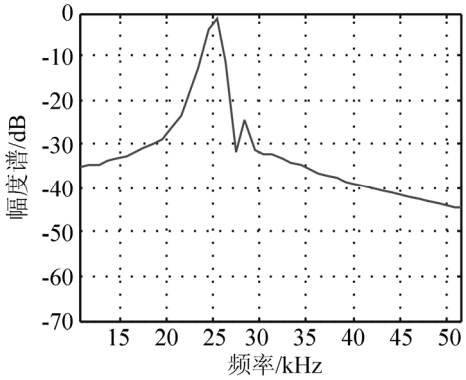
图 4　单比特量化信号 Notch 输出频谱

Fig.4　The one-obit signal spectrum of Notch filter output

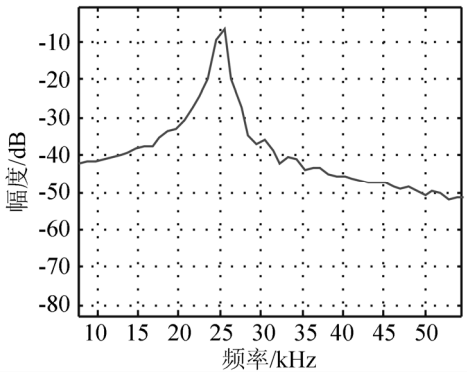
从图 3、图 4 可以看出，单频信号的频谱特性并未因此发生严重畸变，单比特量化信号的滤波器

输出信号虽然出现好多细小的旁瓣，但未影响主瓣，其频率分辨率并未降低。

对峰值点位置的考察，如图 5 所示。从图 5 中可以看出，本算法对滤波器输出信号并不造成频率偏移。



(a) 原始信号



(b) 单比特量化信号

图 5 信号中心频率处频谱

Fig.5 The signal spectrum at center frequncy

考察不同信噪比下算法的检测概率，仿真条件跟上面相同，在不同信噪比下，统计算法的检测概率、虚警概率和漏报概率，每个信噪比做 100 次独立统计。统计结果如表 1 所示。

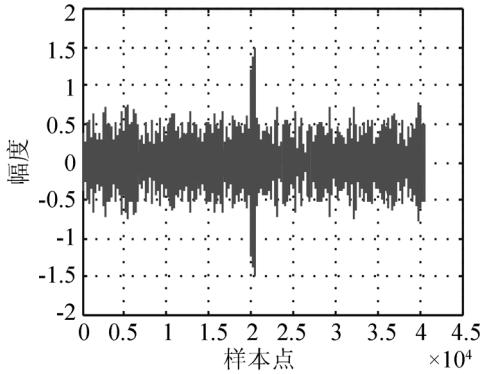
表 1 不同信噪比下检测概率比较

Table 1 The detection probabilities for different SNRS

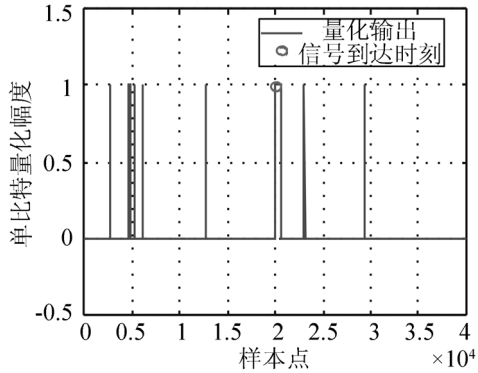
SNR/dB	检测概率/%	虚警概率/%	漏报概率/%
5	62	33	5
10	100	0	0
15	100	0	0
20	100	0	0

从表 1 可以看出，算法在低信噪比下检测概率仍然极高，这说明低信噪比下算法对信号时延估计仍有可行性。

考察算法对信号时延估计的效果。仿真条件为信噪比 SNR=10dB 下的单频正弦信号，接收阵元的接收信号如图 6(a)所示，算法估计时延结果如图 6(b)所示。



(a) 仿真信号波形



(b) 时延估计结果

图 6 仿真实验结果

Fig.6 Simulation results

从仿真结果中可以看出，本算法对信号时延估计是有效的。

3.2 湖上实验

在浙江淳安县千岛湖进行了湖上实验。实验声源为 25kHz 声信标，发射信号形式为 25kHz CW 脉冲信号，接收端采样率为 f_s=500kHz，信噪比为 17.4dB，Notch 滤波器带宽取 1.5kHz，声源和接收点水平距离为 20m。

3.2.1 算法有效性验证

采用湖试数据对本算法时延估计的有效性进行验证，时延估计结果如图 7 所示。

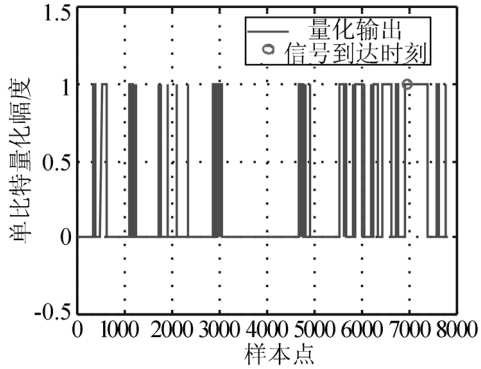


图 7 算法时延估计结果

Fig.7 The result of time delay estimation

湖试时测得的声速为 1450m/s，根据图 7 所估计的时延结果为 13.96ms，因此可以看出本算法是有效的。

3.2.2 算法可靠性验证

为了验证算法的可靠性，采用不同湖试数据对算法进行验证。并与常规单频信号自适应时延估计算法作比较，结果如图 8、图 9 所示。

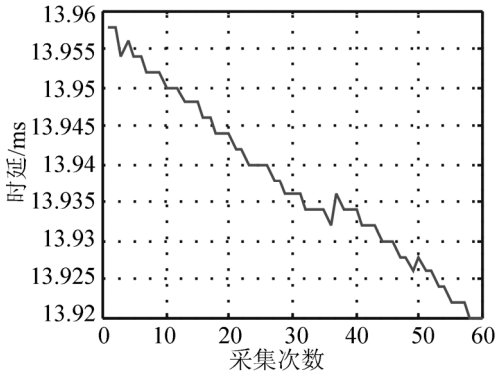


图 8　常规自适应时延估计精度

Fig.8　The time delay estimation with normal algorithm

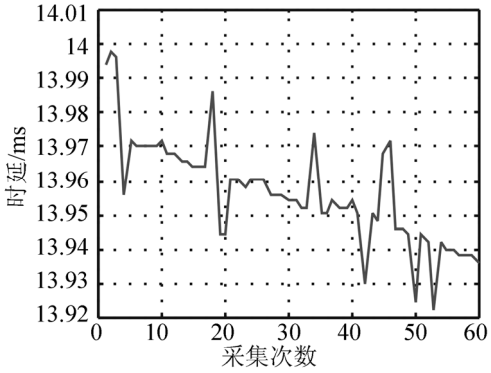


图 9　单比特量化算法时延估计精度

Fig.9　The time delay estimation with one-bit quantification algorithm

按公式 $\sigma=\sqrt{(t_i-t_0)^2/N}$ 计算常规算法和单比特量化算法的标准差分别为 0.15ms 和 0.17ms，可见估计精度损失并不大。

比较图 8 和图 9 可以看出，单比特量化算法与常规算法都具有收敛性，但是单比特量化在收敛过程中出现波动，其主要原因是时域单比特量化受噪声干扰较大，这也是造成了估计精度的重要原因。

4　结 论

基于单比特量化的单频信号时延估计算法是在简化信号结构但又不改变信号结构的基础上对信号进行滤波和检测的一种时延估计算法，通过仿真实验和湖上实验的验证，本算法具有常规自适应时延估计的高分辨率优势，同时又保持了单频信号频谱特性，实验充分证明本算法具有有效性和可靠性，并具有实际工程应用价值。

参 考 文 献

[1] 陈华伟，赵俊渭，郭业才，等. 一种维纳加权频域自适应时延估计算法[J]. 声学学报, 2003, **28**(6): 514-517.
CHEN Huawei, ZHAO Junwei, GUO Yecai, et al. A Wiener Weighting Algorithm of Adaptive Time Delay Estimation in Frequency Domain[J]. ACTA ACUSTICA, 2003, **28**(6): 514-517.

[2] 童峰，许肖梅，方世良. 一种单频水声信号多径时延估计算法[J]. 声学学报, 2008, 33(1): 62-68.
TONG Feng, XU Xiaomei, FANG Shiliang. Multipath time-delay estimation of underwater acoustic simusoidal signals[J]. ACTA ACOUSTICA, 2008, **33**(1): 62-68.

[3] Wu Renbao, Lijian. Time-delay estimation via optimizing highly oscillatory cost function[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1998, **23**(3): 235-244 .

[4] 张绪省，朱怡盛，成晓雄，等. 信号包络提取方法——从希尔伯特变换到小波变换[J]. 电子科学学刊, 1997, **19**(1): 120-123.
Zhang Xusheng, Zhu Yisheng, Cheng Xiaoxiong, et al. The methods of extracting signal envelope——From hilbert transform to wavelet transform[J]. Journal of Electronics, 1997, **19**(1): 120-123.