

## 一种用于水声信道的稀疏权超指数迭代盲均衡算法研究

孙丽君<sup>\*\*</sup> 孙超<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>(西北工业大学声学工程研究所 西安 710072)

<sup>\*\*</sup>(河南工业大学信息科学与工程学院 郑州 450052)

**摘要:** 超指数算法的迭代算法便于跟踪时变信道,但是,其计算量与权长的平方成比例,不利于工程实现。该文利用水声信道的稀疏性,采用超指数算法的部分步骤,估计权向量并进行稀疏处理,初始化超指数迭代算法,不但减小了算法的计算量,而且加快了算法的收敛速度。计算机仿真证明了该方法的有效性。

**关键词:** 水声信道,盲均衡,稀疏权,水声通信

**中图分类号:** TP911.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2005)08-1205-03

## Improved Sparse Blind Equalizer Using Super-Exponential Iterative Form Algorithm for Underwater Acoustic Channels

Sun Li-jun<sup>\*\*</sup> Sun Chao<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>(Institute of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

<sup>\*\*</sup>(Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract** The iterative form of the Super-Exponential (SE) algorithm has good convergence capability, but its complexity increases with the square of the equalizer length, which makes it unsuitable for hardware implementation. According to the properties of sparse underwater channels, a novel improved sparse Super-Exponential Iterative (SEI) blind equalization algorithm is proposed, which uses part of the SE algorithm to estimate the equalizer. After sparse processing, the equalizer is used to initialize the SEI algorithm. Less complexity and faster convergence rate is attainable with this method. The computer simulation results confirm the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words** Underwater acoustic channel, Blind equalization, Sparse equalizer, Underwater acoustic communication

### 1 引言

由于传播损失和严重的多径效应,在海洋信道利用声波进行数据传输与其它媒质存在很大差异,主要表现在时空变化快、环境噪声强、可用带宽窄、码间干扰严重、数据传输速率低等方面<sup>[1,2]</sup>,严重影响了水声通信的有效性和可靠性。在过去的 20 年里,与非相干系统相比,相位相干水声通信系统得到了相当大的发展<sup>[1]</sup>。经典相干接收机的最终实现是由 Jarvis<sup>[3]</sup>设计完成的,其传输速率为 900 – 1800bit/s,浅海作用距离为 4km,深海为 8km。文献[4]描述了安装在一个自主式水下潜器(AUV)上的相位相干水声通信系统的具体实现,并说明了该技术的成熟水平。在此基础上,文献[1]总结并提出了一种将自适应判决反馈均衡与锁相环结合起来的普通而有效的接收机结构。这些相干水声通信系统的共同特点是均采用自适应均衡技术来抑制码间干扰。然而,自适应均衡技术需重复发送训练序列,浪费大量有限带宽。与自适应均衡算法相比,盲均衡算法不需要训练序列,可有效节省带宽,提高通信速率。现有文献表明,盲均衡算法已应用到了较近距离的水声信道,

并且收到了很好的效果<sup>[1]</sup>。

收敛速度和计算量是衡量盲均衡算法性能优劣的主要参数之一。文献[5]提出了一种非常快的以近乎超指数速度收敛的超指数(Super-Exponential, SE)盲均衡算法及其迭代算法(Super-Exponential Iterative, SEI)。SE 盲均衡算法是根据数据段进行运算的,而 SEI 盲均衡算法针对数据进行逐点运算。因此,SEI 算法比 SE 算法更适合于跟踪水声信道的时变特性。但是 SEI 算法的计算量随着权长的平方倍增长,不利于工程实现。研究表明在中短距离的高速水声通信中,水声信道会呈现稀疏性<sup>[6-8]</sup>。所谓稀疏性,是指大多数信道系数的能量较小,而几个能量较大的抽头分布相隔较远。文献[6]采用部分显著抽头迭代法,有效降低了 LMS 算法的计算量。文献[7]利用水声信道固有的稀疏性,为给定信道设计了最佳稀疏参数化方法,通过处理实测数据证明该方法使 RLS 算法的平均计算量降低了一个数量级。文献[8]同样采用稀疏自适应均衡方法,并运用试验数据证实该方法可以降低 75% – 90%的计算量。上述文献的讨论都是针对自适应均衡器的,而对于盲均衡算法,由于无法得到水声信道响应的估计,采用稀疏权方法一直比较困难。本文利用水声信道的稀疏性,采用超指数盲均衡算法

2004-03-19 收到, 2004-12-28 改回

河南省自然科学基金(0511011700)和河南省教育厅自然科学计划(200510463007)资助课题

的部分运算对权向量进行初步估计, 经过稀疏处理后, 初始化 SEI 算法, 有效降低了 SEI 算法的计算量, 加快了算法收敛速度, 因此具有很强的工程意义。

## 2 SE 算法与 SEI 算法计算量分析

文献[5]提出了一种超指数盲均衡算法, 在其收敛过程中, 对码间干扰的抑制接近超指数规律。该算法基带等效框图如图 1 所示:

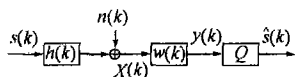


图 1 SE 算法基带等效框图

图中,  $s(k)$  表示发射机发射信号, 为白色独立同分布序列。 $h(k)$  为长度为  $N_h$  的水声信道脉冲响应向量, 且

$$h(k) = [h_0(k), h_1(k), \dots, h_{N_h-1}(k)]^T$$

$T$  为转置运算。 $n(k)$  为信道噪声, 一般在关于盲均衡算法的研究中, 均假设为高斯白噪声, 且与信号统计独立<sup>[9]</sup>。

$w(k)$  为长度为  $N_w$  的均衡器权系数向量, 且

$$w(k) = [w_0(k), w_1(k), \dots, w_{N_w-1}(k)]^T$$

$y(k)$  为均衡器输出序列。 $Q$  表示量化判决,  $\hat{s}(k)$  为对均衡器输出  $y(k)$  的判决值。为了讨论方便, 令均衡器输入递归向量  $X(k)$  具有如下形式:

$$X(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-N_w+1)]^T$$

在超指数盲均衡算法中, 接收信号为

$$x(k) = \sum_{i=0}^{N_h-1} h_i(k)s(k-i) + n(k) \quad (1)$$

该算法通过求取均衡器输入序列自相关矩阵和均衡器输入输出序列之间的四阶互累积量, 来求解权向量。SE 算法的迭代过程如下, 令

$$w' = R^{-1}c \quad (2)$$

式中上标  $[\cdot]^{-1}$  表示矩阵求逆运算。权向量:

$$w = \frac{1}{\sqrt{(w')^T R w'}} w' \quad (3)$$

上式是对  $w'$  进行归一化操作, 式中  $R$  是  $N_w \times N_w$  维的矩阵, 其元素为

$$R_{nm} = \frac{E\{x(k-n)x^*(k-m)\}}{E\{s(k)s^*(k)\}} \quad (4)$$

式中  $E[\cdot]$  表示数学期望,  $c$  为  $N_w \times 1$  的向量, 其元素为

$$c_n = \frac{\text{cum}\{y(k): 2; y^*(k): 1; x^*(k-n)\}}{\text{cum}\{s(k): 2; s^*(k): 2\}} \quad (5)$$

式(5)中,  $\text{cum}$  表示取互四阶累积量,  $*$  表示共轭运算。SE 算法中, 反复迭代式(2), 式(3)至算法收敛。对该算法的计算量可作如下估计: 假设发射信号为实信号, 数据长度为  $N_s$ , 权向量长度为  $N_w$ 。计算  $R$  矩阵需  $N_s N_w$  次乘法(一段数据仅计算 1 次), 计算式(5)的  $c_n$  需  $(2N_w + 1)N_s$  次乘法。

另外, 计算  $R^{-1}$ ,  $R^{-1}$  与  $c$  的乘积(式(2)), 以及权向量的归一化(式(3)), 均需要  $N_w^2$  量级的乘法。相比而言, 如果权向量长度  $N_w$  远远小于数据长度  $N_s$ , 则这些乘法可以忽略。

同时, 文献[5]给出了一种超指数算法的迭代形式(SEI 算法)。与采用数据段运算的 SE 算法相比, 该算法可有效地跟踪信道的时变特性。但是, 该算法每步迭代均需计算一  $Q$  矩阵, 其计算量随着权长的平方成指数增长, 当权向量很长时, 其计算量增长很快, 不利于硬件实现。该算法的  $Q$  矩阵计算迭代式为

$$Q(k+1) = \frac{1}{1-\mu} \left[ Q(k) - \frac{\mu Q(k) X^*(k) X^T(k) Q(k)}{1-\mu + \mu X^T(k) Q(k) X^*(k)} \right] \quad (6)$$

式中  $\mu$  表示迭代步长。权向量迭代式为

$$w(k+1) = w(k) + \mu \cdot Q(k) X^*(k) y(k) (|y(k)|^2 - \gamma) \quad (7)$$

式中  $\gamma$  为常数, 且

$$\gamma = \frac{E\{|s(k)|^4\}}{E\{|s(k)|^2\}} \quad (8)$$

## 3 稀疏权 SEI 算法

在本节, 我们讨论如何采用 SE 算法的部分步骤对 SEI 算法进行稀疏处理。针对式(5)互四阶累积量  $c$ , 由著名的 BBR 公式<sup>[10]</sup>可得  $c$  向量中的元素:

$$\begin{aligned} c_n &= \text{cum}\{x(k); x(k); x^*(k); x^*(k-n)\} \\ &= \gamma_0 \sum_I h_{n+1}^2 h_{n+1}^* h_I^* \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $\gamma_0$  表示发射信号的峰度。由该式可见, 当信道呈现稀疏性, 只有当  $n$  是较显著的信道抽头间隔时, 式(9)右侧才有较显著的取值。即当信道呈现稀疏性, 则互四阶累积量  $c$  也会出现稀疏性。由式(2)计算所得的权向量也会呈现稀疏性。当然由于 SE 算法需几次迭代才能收敛(一般 5-10 次迭代可收敛), 所以对权向量的一次估计只是初步估计。对该估计的权向量作稀疏处理, 所得的权向量来初始化 SEI 算法。

具体的权向量的稀疏处理方法如下: 对式(2)估计的权向量系数与一阈值  $M_0$  比较, 保留高于该阈值的系数, 其余系数赋给零值, 即不再参与迭代运算。之后, 将该权向量初始化 SEI 算法, SEI 算法每迭代 100 次, 对权向量作进一步的稀疏处理。即重新与一阈值比较, 并舍弃较小的抽头。

由于 SE 算法采用数据段估计权向量, 其收敛速度快于 SEI 算法, 因此, 该方法不但减小了 SEI 算法的计算量, 还快了算法的收敛速度。现将本文提出的稀疏权 SEI 算法总结如下:

- (1) 采用一段数据, 计算相关矩阵  $R$ , 互四阶累积量  $c$
- (2) 初始化  $Q(0) = R^{-1}$
- (3) 求解权向量  $w = R^{-1}c$
- (4) 权向量稀疏处理

(5) 迭代以下各式, 每隔 100 次迭代进行一次稀疏处理

$$y(k) = X^T(k)w(k)$$

$$w(k+1) = w(k) + \mu \cdot Q(k)X^*(k)y(k)(|y(k)|^2 - \gamma)$$

$$Q(k+1) = \frac{1}{1-\mu} \left[ Q(k) - \frac{\mu Q(k)X^*(k)X^T(k)Q(k)}{1-\mu + \mu X^T(k)Q(k)X^*(k)} \right]$$

#### 4 仿真性能分析

下面通过仿真观察第 2 节中提出的算法的性能。信道取如下典型的稀疏两径信道模型<sup>[11]</sup>:  $1 + 0.4z^{-12}$ 。

稀疏化处理门限 0.05, 仿真均衡器权长 61, 信噪比取 20dB, 发射信号为 BPSK 信号, 迭代步长取 0.001。用于 SE 算法估计权向量的数据长度为 500 点。

图 2 是采用式(2)估计权向量后, 经过稀疏化处理的结果。61 个权系数仅有 9 个较显著, 将该权向量初始化 SEI 算法, 仅有 9 个权系数参与迭代, 计算量从  $61^2$  降到了  $9^2$  的量级。经过 SEI 算法 100 次迭代后, 再次对 9 个权系数进行筛选, 仅有 4 个系数保留, 如图 3 所示。SEI 算法的计算量得到了进一步的简化。在之后的稀疏处理中, 权系数并没有进一步减少。图 4 给出了本文算法与 SEI 算法的收敛均方误差曲线。由图可见, 本文算法的剩余均方误差比 SEI 算法略有增加, 这是进行稀疏处理付出的代价。同时可以看到, 本文算法的收敛速度加快了。扣除 SE 算法估计权向量的 500 点数据, 本文算法仍比 SEI 算法快 500 次迭代 (从图中两曲线交叉的位置可以看出)。

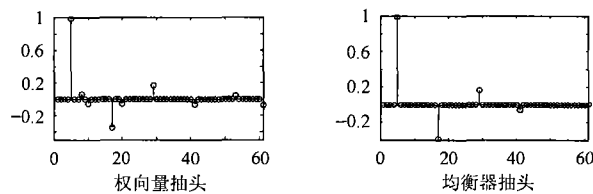


图 2 式(2)估计的权向量稀疏化处理后的结果

图 3 SEI 算法迭代 100 次后稀疏化的结果

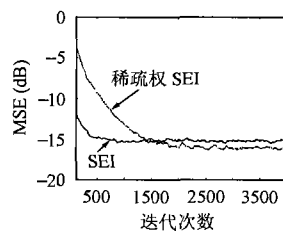


图 4 本文算法与 SEI 算法的剩余均方误差曲线对比

本文算法增加的计算量的部分来自于采用 SE 算法估计权向量的部分, 由第 1 节的分析, 其计算量与权长成比例, 即  $N_w N_s$  的量级 ( $N_s$  为数据长度), 而非与其平方成比例。本文采用了 500 点数据估计权向量, 所以其计算量在  $10^4$  的量级。

以 1000 点数据长度对比本文的稀疏权 SEI 算法和 SEI 算法的计算量, 稀疏权 SEI 算法的权数目按 4 计算。采用

$N_w^2 N_s$  估计计算量。

本文算法:  $4^2 \times 10^3 + 10^4$ , 该式加号后的计算量为 SE 算法的计算量。可见该算法的计算量在  $10^4$  的量级。

原 SEI 算法:  $61^2 \times 10^3$ , 可见该算法的计算量在  $10^6$  的量级。因此本文算法与原算法相比计算量下降了 2 个数量级。

#### 5 结束语

利用水声信道的稀疏性, 本文提出了一种稀疏权 SEI 盲均衡算法。该算法采用 SE 算法的部分步骤计算权向量, 经稀疏处理后初始化 SEI 算法, 不但有效地降低了 SEI 算法的计算量, 而且加快了算法的收敛速度。计算机仿真证明了该算法的有效性。

#### 参考文献

- [1] Kilfoyle D B, Baggeroer A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25(1): 4 - 27.
- [2] 童峰, 陆估人. 基于盲源分离的水声信道盲均衡处理方法. *电子与信息学报*, 2003, 25(2): 70 - 274.
- [3] Jarvis S, Janiesch R, Fitzpatrick K, et al.. Results from recent sea trials of the underwater digital acoustic telemetry system. *IEEE OCEANS 1997 Conference Proceedings*, 1997, 1: 702 - 708.
- [4] Freitag L, Grund M, Singh S, et al.. A bidirectional coherent acoustic communication system for underwater vehicles. *IEEE OCEANS 1998 Conference Proceedings*, 1998, 1: 482 - 486.
- [5] Shalvi O, Weinstein E. Super-exponential methods for blind equalization. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1993, 39(2): 505 - 519.
- [6] Geller B, Capellano V, Jourdain G. Equalizer for real time high rate transmission in underwater communications. *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1995, 5: 3179 - 3182.
- [7] Kocic M, Brady D, Stojanovic M. Sparse equalization for real-time digital underwater acoustic communications. *IEEE OCEANS 1995 Conference Proceedings*, 1995, 3: 1417 - 1422.
- [8] Johnson M, Brady D, Grund M. Reducing the computational requirements of adaptive equalization in underwater acoustic communications. *IEEE OCEANS 1995 Conference Proceedings*, 1995, 3: 1405 - 1410.
- [9] Haykin S. *Adaptive Filter Theory*. Third Edition, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1996, ch.18.
- [10] 张贤达. *通信信号处理*. 北京: 清华大学出版社, 2000: 280.
- [11] 王峰. *基于高阶统计量的水声信道盲均衡理论与算法*. [博士学位文], 西安: 西北工业大学, 2003.

孙丽君: 女, 1968 年生, 副教授, 博士生, 研究方向为信号与信息处理、数字通信。

孙超: 女, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理、水声通信。