

基于盲源分离的水声信道盲均衡处理方法¹

童 峰 陆佳人

(东南大学无线电工程系 南京 210096)

摘 要 提出了一种基于盲源分离的水声信道盲均衡处理方法。通过对接收信号过采样构成源信号,采用了基于信息最大化原理 (Infomax) 的在线分离算法进行了水声信道的盲均衡,并研究了时变水声信道条件下算法的均衡情况。仿真实验结果表明:该处理方法对多径水声信道具有较好的均衡效果,同时不受最小相位的条件限制。

关键词 盲源分离,盲均衡,多径

中图分类号 TN911.5

1 引言

在陆-海-空三维现代立体通信网的建设中,水下通信是一个技术瓶颈。因为光及电磁波在水中衰减严重(超长波除外),无法进行中等距离以上的传输。对水下环境,由于声的传输衰减减小,水声通信是当前唯一的有效手段^[1]。

水声信道并不是理想的传输信道,其主要特点:随机时、空变,背景噪声强、可用带宽窄、多径,严重影响着水下通信系统的可靠性。最早应用在无线电信道中的信道均衡技术在很多情况下对水声信道也是一种有效的处理方法,但较空中信道难度大,这方面国内外进行了大量的研究^[2,3]。传统的信道均衡处理需要利用训练序列来学习信道特性,构造均衡器,而盲均衡算法不需要训练过程,只要发射数据的统计特性满足一定的条件(这对通信系统不难满足),就可以自动辨识出均衡器的参数,进行发射数据的恢复,因而具有更好的应用意义,是水下通信技术研究中的新的热点^[4]。

在盲均衡算法中,由于接收信号的二阶平稳统计量不包括信道的相位特性,常用的基于最小均方误差的常数模算法(CMA)的应用条件是只能对最小相位信道进行均衡^[4],但水声信道在很多场合下不满足这个条件;基于子空间的盲均衡算法需进行矩阵分解等运算量极大的处理,算法开销极大;基于高阶统计量的盲均衡算法估计方差较大,只适合观测数据很长的序列。本文研究了对多径水声信道采用基于盲源分离的盲均衡处理,仿真实验表明算法对多径水声信道具有较好的均衡效果。

2 盲源分离与盲均衡

2.1 盲源分离问题^[4-7] 与传统的信号恢复手段相比,盲源分离最大的特点是对信号及信道的先验知识要求甚少,源信号为相互之间统计独立的实信号是盲源分离的基本假设。盲源分离基本的数学模型为(见图 1)。

$$X = HS \tag{1}$$

$$Y = GX = GHS = \hat{S} \tag{2}$$

其中 S 是相互独立的 n 个源信号, X 是观测到的 n 阶混合信号(X 的阶数一般取等于 S 的阶数), Y 是分离后的源信号, H 是 $n \times n$ 阶混合矩阵, G 是分离矩阵。

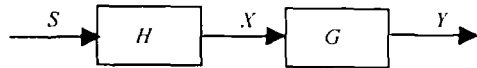


图 1 盲源分离原理

¹ 2001-09-03 收到, 2002-01-17 改回
国防科技重点实验室(99JS24.3.1.JW0608)等项目资助

2.2 信道的盲均衡 考虑时不变离散信道中的单输入单输出系统 (SISO) :

$$x(t) = \sum_t s(k)h(t - kT_s) + n_m(t) \quad (3)$$

其中 $\{s(k)\}$ 是输入序列, $h(t)$ 是信道的冲激响应, T_s 是码元周期, $n(t)$ 是加性噪声, $x(t)$ 是输出信号. 对系统输出进行时间过采样 (过采样系数为 M), 可以把上述单输入输出系统 (SISO) 表示成单输入多输出系统 (SIMO) :

$$x_m(k) = \sum_t h_m(l)s(k-l) + n_m(k) \quad m = 1, \dots, M \quad (4)$$

其中 $x_m(k)$ 为第 m 子信道的输出. 对通信系统, 信道输出进行过采样和多信道传输在数学上是等价的^[4]. 盲均衡的目的是恢复出系统的输入信号, 把通过过采样后的系统进一步转化可把盲均衡问题转化为盲源分离问题处理^[5]. 为简化起见, 采用过采样系数 $M = 2$ 构造:

$$\begin{aligned} \text{系统输出 } X_k &= \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}, & \text{信道响应 } H_l &= \begin{bmatrix} h_1(L-1) & h_1(L-2) & \dots & h_1(0) \\ h_2(L-1) & h_2(L-2) & \dots & h_2(0) \end{bmatrix}, \\ \text{系统输入 } S_k &= \begin{bmatrix} s(k+L-1) \\ s(k+L-2) \\ \vdots \\ s(k) \end{bmatrix}, & \text{系统加性噪声 } N_k &= \begin{bmatrix} n_1(k) \\ n_2(k) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

则有

$$X_k = H_l S_k + N_k \quad (5)$$

进一步构造 L 阶观测矢量 (观测向量阶数应大于等于信道阶数, 这里取等于) :

$$\begin{bmatrix} X_k \\ X_{k+1} \\ \vdots \\ X_{k+L-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_l & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_l & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & H_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_k \\ s_{k+1} \\ \vdots \\ s_{k+2L-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_k \\ N_{k+1} \\ \vdots \\ N_{k+L-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

把 (6) 式中的输入矢量、综合信道响应、输入矢量及噪声矢量分别表示为 O_k, H_p, I_k, N_k , 则可写为

$$O_k = H_p I_k + N_k \quad (7)$$

此时 H_p 为混合矩阵, I_k 为源信号, 可以利用盲源分离算法恢复源信号, 亦即相当于恢复 $S(k)$, 从而完成了盲均衡的过程.

3 基于盲源分离的盲均衡算法

把盲均衡问题转化为盲源分离问题处理后, 我们采用文献 [5] 中基于信息最大化 (Infomax) 的盲源分离算法进行盲均衡.

3.1 基于 Infomax 的盲源分离算法^[5] 如图 2 所示, H_p 为混合矩阵, W_k 是为了抑制噪声的影响进行预白化处理的白化矩阵, G_k 为分离矩阵. 白化过程的学习算法为 (u 为学习步长) :

$$\left. \begin{aligned} W_{k+1} &= W_k(1 + u - uv_k v_k^T) \\ v_k &= W_k \cdot O_k \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

按图 1 的盲源分离模型, 基于 Infomax 的盲分离迭代算法为 (q 为学习步长):

$$\left. \begin{aligned} G_{k+1} &= G_k(1 + q - qf(Y)Y^T) \\ Y &= GX \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 $f(Y)$ 为一个非线性函数.

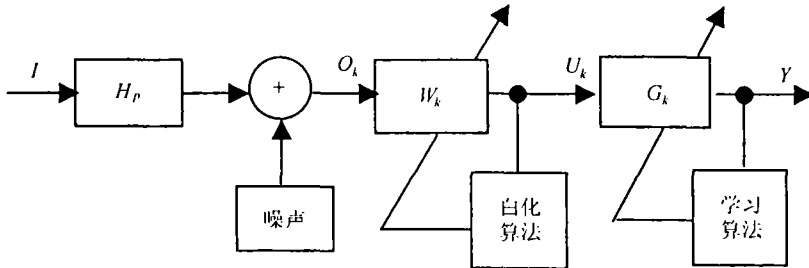


图 2 基于盲源分离的盲均衡算法

3.2 算法的假设条件 为了达到收敛, 算法的假设条件为

- (1) 混合矩阵 H_p 是列满秩矩阵, 即观测信号的阶数应大于等于信道阶数, 且当 H_p 为方阵时, H_p 应为非奇异阵;
- (2) 源信号是独立同分布的非高斯序列. 通常的通信系统能满足这一条件;
- (3) 系统噪声为加性的零均值高斯白噪声.

4 仿真实验结果

4.1 时不变水声信道盲均衡 仿真采用的水声信道为一个 5 径的多径信道, 其冲激响应和零极点分布分别如图 3(a), 3(b) 所示, 可以看到存在单位圆外的零点, 这是一个非最小相位的信道. 首先用 BPSK 信号对算法进行学习, 过采样系数 $M = 2$.

图 3(c), 3(d) 分别是信噪比为 64dB 和 30dB 时算法的收敛情况, 分别在约 1800 和 2500 点处算法达到收敛; 图 3(e) 为经过多径信道传输后的 4-QPSK 信号星座图, 3(f) 为经收敛后的系统盲均衡后的信号星座图 (SNR=22dB); 算法对不同信噪比情况下的时不变多径水声信道有较好的均衡效果.

4.2 时变水声信道盲均衡 考虑到水声信道是随机时-空变信道, 而上述均衡算法是以离散时不变信道为前提推出的. 为了适应实际的水声信道情况, 我们研究了时变情况下本算法的均衡情况. 在时不变信道上叠加一个随时间变化的增益 A 和相位延迟 τ 来模拟由海洋环境变化而产生的简单的水声信道幅度和相位的时变特性:

$$x(k) = \{A(k)\delta[k - \tau(k)]\} \left[\sum_t (h(l)s(k-l)) \right] + n(k) \quad (10)$$

根据海上实验统计表明^[8], 水声信道的随机起伏在时域呈一定的相关性. 考虑比较简单情况, 把信道的随机时变部分增益 A 和相位延迟 τ 都简化为正弦函数, 通过改变其变化周期观察算法对时变多径水声信道的适应性.

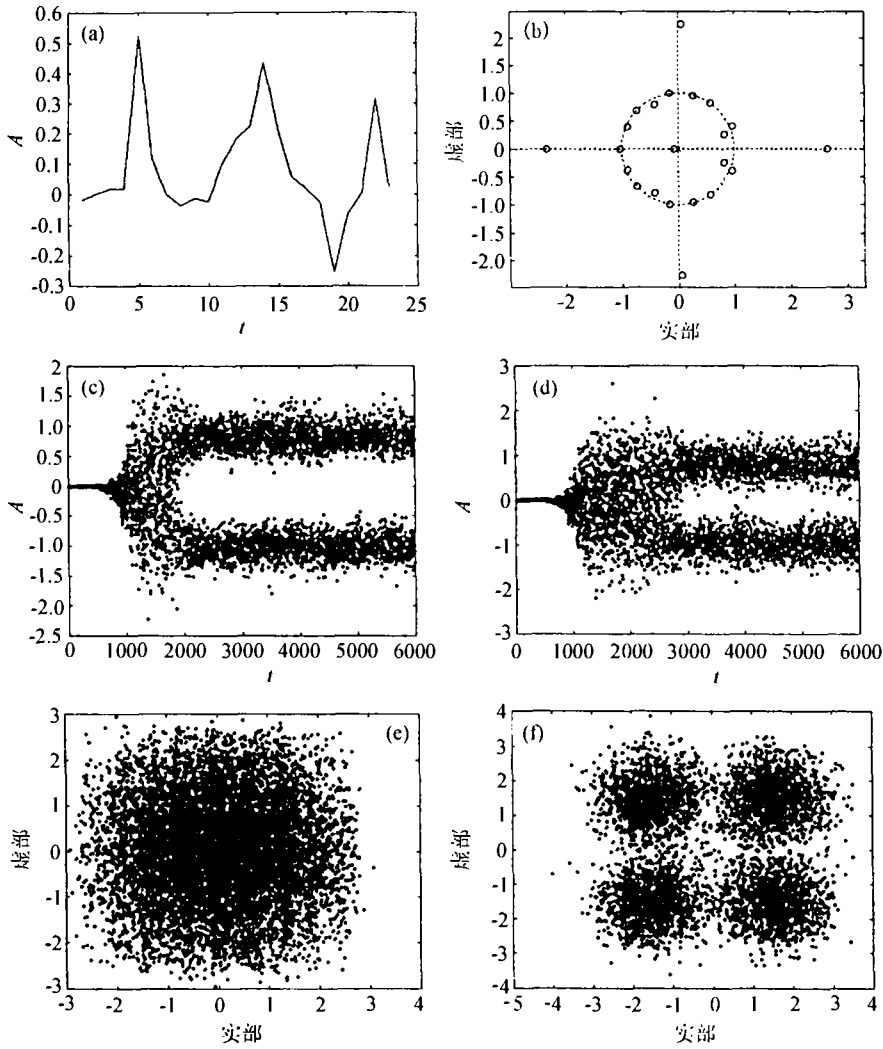


图 3 时不变信道盲均衡仿真实验结果

图 4(a), 4(b) 是信道只存在幅度起伏, 起伏周期分别为码元长度的 5, 25000 倍时算法对 BPSK 信号的收敛情况 (SNR=42dB), 从仿真实验结果可以看出, 均衡算法对信道的幅度时变起伏的适应性较强, 在快变及缓变情况下均可收敛, 只是在快变情况下的收敛效果不如慢变情况; 图 4(c), 4(d) 是信道同时存在幅度和相位起伏, 起伏周期分别为码元长度的 5, 25000 倍时算法对 BPSK 信号的收敛情况 (SNR=42dB), 对此类信道, 在缓变 (本例中为起伏周期大于 5000 个码元长度) 情况下算法仍然可以达到收敛, 对快速时变 (本例中为起伏周期小于 500 个码元长度) 信道, 收敛性能恶化, 甚至不能收敛。

6 结 论

根据过采样得到的信号独立性, 利用盲源分离的思想进行水声信道的盲均衡, 仿真实验表明, 此方法可有效实现对水声信道的盲均衡, 同时不受最小相位的条件限制。

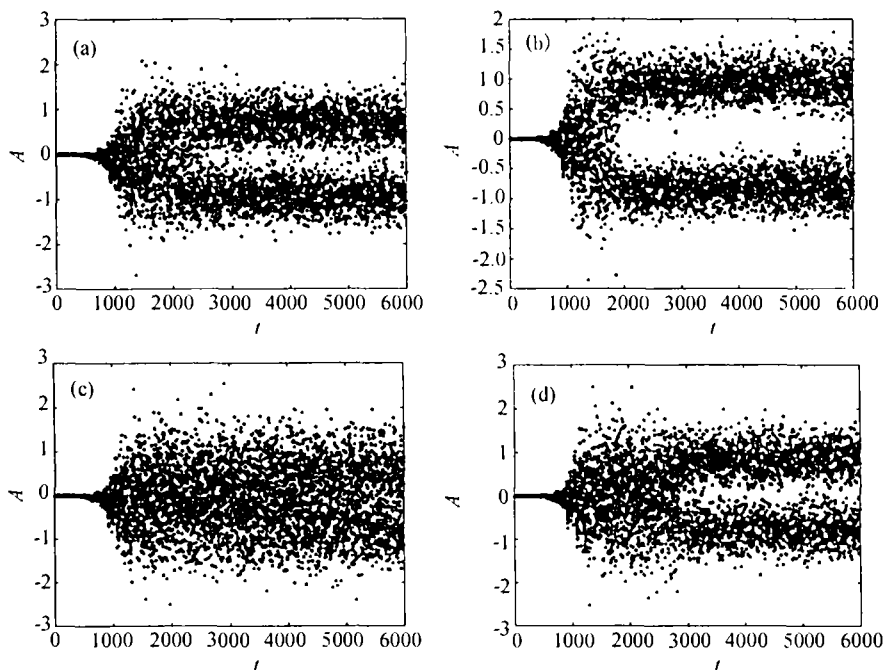


图 4 时变信道盲均衡仿真实验结果

参 考 文 献

- [1] 许克平, 许天增, 许茹, 等, 基于水声的水下无线通信研究, 厦门大学学报, 2001, 40(2), 311-319.
- [2] 陈庚, 海洋声信道自适应匹配实验研究, 声学学报, 1996, 21(3), 139-148.
- [3] 艾宇慧, 惠俊英, 高静, 水声信道相关均衡器仿真研究, 声学学报, 1999, 24(11), 589-597.
- [4] 张贤达, 保铮, 通信信号处理, 北京, 国防工业出版社, 2000, 226-232.
- [5] Howard Hua Yang, On-line blind equalization via on-line blind separation, Signal processing, 1998, 68(8), 271-281.
- [6] Paris Smaragis, Blind separation of convolved mixtures in the frequency domain, Neurocomputing, 1998, 22(11), 21-34.
- [7] 陈健, 盲源分离及其在水声信号处理中的应用, [硕士论文], 南京, 东南大学, 2001.
- [8] 许天增, 数字时间相关积累 (I) —— 自相关积累, 声学学报, 1990, 15(3), 208-214.

BLIND SOURCE SEPARATION BASED
UNDERWATER ACOUSTIC CHANNEL BLIND EQUALIZATION

Tong Feng Liu Jiren

(Radio Engineering Dept., Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract An underwater acoustic channel blind equalization method via the blind source separation theory is presented. Constructing source signal by oversampling of the received signal, an on-line separation algorithm based on infomax principle is employed to equalize the underwater acoustic channel. Convergence results in both time-invariant and time-variant channel are studied. Simulation experiment shows that without the limit of minimum phase, the proposed algorithm gains promising results in multipath underwater acoustic channel.

Key words Blind source separation, Blind equalization, Multipath

童 峰: 男, 1973 年生, 博士, 现在东南大学无线电工程系信息与通信博士后流动站工作, 主要研究领域: 水下高速率数据传输, 声信号处理, 超声波传感系统.

陆信人: 男, 1938 年生, 教授, 研究方向: 目标检测与识别, 非线性信号处理, 盲信号处理.