

文章编号:1004-9037(2014)02-0186-05

# 坐标变换并行软切换盲均衡算法及其 DSP 实现

郭业才<sup>1,2,3</sup> 吴彬彬<sup>2</sup> 张冰龙<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京, 210044;

2. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京, 210044;

3. 南京信息工程大学江苏省气象传感网技术工程中心, 南京, 210044)

**摘要:**针对超指数迭代盲均衡算法(Super-exponential iteration, SEI)均衡高阶非常模 QAM 信号时均方误差较大甚至失效的缺陷,提出了一种坐标变换指数迭代并行软切换(Coordinate transformation SEI-decision directed, CTSEI-DD)盲均衡算法。该算法将坐标变换引入到超指数迭代盲均衡算法中,并与判决引导 DD 算法结合,以软切换方式并行运行,充分发挥了坐标变换、超指数迭代算法及 DD 算法的优点,收敛速度快、均方误差小,适合于对高阶非常模 QAM 信号进行有效均衡。在利用 Matlab 工具对该算法性能进行验证并获得该算法中各参数值的基础上,在集成开发环境(Code composer studio, CCS)中,编写 C 语言代码并进行调试,在 TMS320VC5509 芯片实现了该算法。

**关键词:**超指数迭代;软判决引导;变换坐标;DSP;集成开发环境

中图分类号:TN911.72

文献标识码:A

## Coordinate Transformation Parallel Soft Switching Blind Equalization Algorithm and Its DSP Implementation

Guo Yecai<sup>1,2,3</sup>, Wu Binbin<sup>2</sup>, Zhang Binglong<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing,

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China;

2. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology,

Nanjing, 210044, China; 3. Jiangsu Technology & Engineering Center of Meteorological Sensor Network,

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China)

**Abstract:** Aiming at the defects of the large mean square error or failure in equalizing higher-order non-constant modulus signals for super-exponential iteration(SEI) blind equalization algorithm, a parallel soft switching coordinate transformation super-exponential iterative decision directed(CTSEI-DD) blind equalization algorithm is proposed. In the proposed algorithm, the coordinate transformation method is introduced into the SEI blind equalization algorithm to obtain CTSEI blind equalization algorithm. CTSEI is combined with the DD algorithm in soft switching way. Accordingly, the proposed algorithm has many advantages such as fast convergent rate, small mean square error, and the high performance in equalizing higher order QAM signals. On the basis of testing the performance of the proposed algorithm and obtaining its relative parameters, the codes are written with C language and debugged in code composer studio(CCS) integrated development environment software, then the proposed algorithm is implemented on the digital signal processor(DSP).

**Key words:** super-exponential iteration; soft decision directed; coordinate transformation; digital signal processor; code composer studio

**基金项目:**江苏省高校自然科学基金(13KJA510001)重大资助项目;高校科研成果产业化推进工程(JHB 2012-9)资助项目;全国优秀博士学位论文作者专项资金(200753)资助项目;江苏省高校“传感网与现代气象装备”优势学科建设工程资助项目。

**收稿日期:**2013-12-21;**修订日期:**2014-01-07

引言

由于盲均衡技术能有效节省信道带宽、抑制码间干扰、提高通信质量,而受到越来越多关注。在盲均衡技术中,超指数迭代常模盲均衡算法(Super-exponential iteration, SEI)<sup>[1-2]</sup>收敛速度快,但稳态误差大;而 SEI 结合判决引导(Decision directed, DD)硬切换双模式常模盲均衡算法<sup>[3-4]</sup>先由收敛能力强的 SEI 算法作冷启动,当判决错误率达到足够低的水平时,切换到 DD 算法,虽能降低稳态误差,但需要设置切换门限。无论是 SEI 或 SEI+DD 常模盲均衡算法在均衡高阶 QAM 信号时,剩余误差较大甚至失效,主要原因在于它们对相位不敏感。高阶 QAM 信号不仅含有幅度信息,而且含有相位信息,当它通过畸变信道时会产生相位旋转,引起较大的误判。为了有效均衡高阶 QAM 信号,文献[5]给出了一种基于坐标变换的盲均衡算法,该算法的基本思路在于利用坐标变换将高阶多模 QAM 信号变换为常模 4QAM 信号,然后再对变换后的高阶 QAM 信号进行均衡,均衡效果明显,但收敛速度不够快。

本文利用 SEI 盲均衡算法、DD 算法及坐标变换盲均衡算法的优点<sup>[6-11]</sup>,提出一种坐标变换超指数迭代并行软切换(Coordinate transformation SEI-DD, CTSEI-DD)盲均衡算法,并在 MATLAB 仿真基础上,由 DSP 实现并获得较好效果。

1 变换坐标超指数迭代盲均衡算法

1.1 坐标变换原理

以 16QAM 为例,16QAM 的星座坐标为  $\{\pm 1 \pm i, \pm 1 \pm 3i, \pm 3 \pm i, \pm 3 \pm 3i\}$ ,分布在 4 个半径相同的圆上,各个圆的圆心坐标为  $\{2+2i, -2+2i, -2-2i, 2-2i\}$ ,如图 1 所示。将输入信号按箭头调整,坐标变换为  $\{1+i, -1+i, -1-i, 1-i\}$ 。

设信号的原始坐标为  $x$ ,新坐标为  $y$ ,坐标变换公式为

$$y = [x_r - 2\text{sgn}(x_r)] + j[x_i - 2\text{sgn}(x_i)] \quad (1)$$

式中:  $x_r$  和  $x_i$  分别为  $x$  的实部和虚部;  $\text{sgn}$  为符号函数。16QAM 信号星座坐标变换前后对比,如表 1 所示。

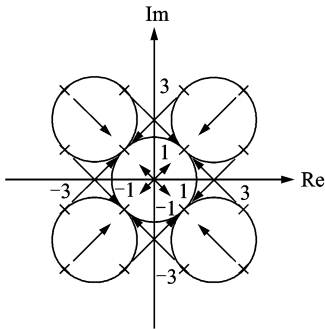


图 1 16QAM 坐标变换图

Fig. 1 Coordinate transformation of 16QAM signals

表 1 16QAM 坐标变换表

Table 1 Comparison of 16QAM signals' coordinate transformations

原始坐标	新坐标	原始坐标	新坐标
1+i	-1-i	-1-i	1+i
1+3i	-1+i	-1-3i	1-i
3+i	1-i	-3-i	-1+i
3+3i	1+i	-3-3i	-1-i
-1+i	1-i	1-i	-1+i
-1+3i	1+i	1-3i	-1-i
-3+i	-1-i	3-i	1+i
-3+3i	-1+i	3-3i	1-i

1.2 坐标变换超指数迭代盲均衡算法

基于坐标变换的常数模盲均衡算法<sup>[5]</sup>是利用坐标变换将多模 16QAM 信号变换为常模 4QAM 信号,再进行盲均衡,取得了良好的均衡效果,但收敛速度不够快。为了获得收敛速度快、均方误差小,且适合于均衡高阶 QAM 信号的盲均衡算法,现将坐标变换原理与 SEI 盲均衡算法相结合,得到坐标变换超指数迭代盲均衡算法。该算法的迭代式为

$$f_{\text{CTSEI}}(k+1) = f_{\text{CTSEI}}(k) - \mu Q(k) y_{\text{CTSEI}}(k) e_{\text{CTSEI}}(k) x^*(k) \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为迭代步长;  $f_{\text{CTSEI}}(k)$  为 CTSEI 的权向量;  $y_{\text{CTSEI}}(k)$  与  $e_{\text{CTSEI}}(k)$  分别是对均衡器输出信号  $y(k)$  和误差函数  $e(k)$  进行坐标变换后的结果,且

$$y_{\text{CTSEI}}(k) = \{y_R(k) - 2\text{sgn}[y_R(k)]\} + j\{y_I(k) - 2\text{sgn}[y_I(k)]\} \quad (3)$$

$$e_{\text{CTSEI}}(k) = R_{\text{CTSEI}}^2 - |y_{\text{CTSEI}}(k)|^2 \quad (4)$$

$$R_{\text{CTSEI}}^2 = \frac{E\{|[a_R(k) - 2\text{sgn}[a_R(k)]] + j[a_I(k) - 2\text{sgn}[a_I(k)]]|^4\}}{E\{|[a_R(k) - 2\text{sgn}[a_R(k)]] + j[a_I(k) - 2\text{sgn}[a_I(k)]]|^2\}} \quad (5)$$

式(2)中  $\mathbf{Q}(k)$  为白化矩阵,对数据起到白化作用,用以加快速收敛速度,其迭代公式为

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

式中  $\mu_Q$  为  $\mathbf{Q}(k)$  的迭代步长。式(2~6)构成了 CTSEI 盲均衡算法。

## 2 坐标变换并行软切换盲均衡算法

为了避免 SEI+DD 硬切换需要设置误差门限的缺陷,现将 CTSEI 和 DD 以软切换方式相结合,得到 CTSEI-DD 盲均衡算法,该算法通过 CTSEI 与 DD 算法之间的软链接方式实现,原理如图 2 所示。

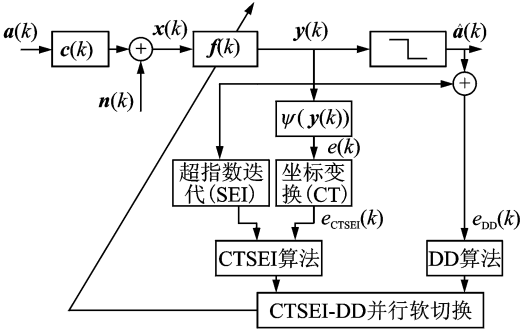


图 2 CTSEI-DD 盲均衡算法模型

Fig. 2 CTSEI-DD blind equalization algorithm model

图 2 中:  $\mathbf{a}(k)$  为发射端发送的原始信号;  $\mathbf{c}(k)$  为信道的冲击响应;  $\mathbf{n}(k)$  为加性高斯白噪声;  $\mathbf{x}(k)$  为均衡器输入信号;  $\mathbf{f}(k)$  为均衡器权向量且长度为  $2N+1$  ( $N$  为整数);均衡器为长度为  $N$  的横向滤波器,  $\psi(\cdot)$  为误差函数  $e(k)$  的生成函数,  $e_{DD}(k)$  为判决引导误差项;  $\mathbf{y}(k)$  为均衡器输出;  $\hat{\mathbf{a}}(k)$  为量化判决后对信号的估计。在 CTSEI-DD 算法中

$$\mathbf{f}(k+1) = \mathbf{f}_{CTSEI}(k) + \mathbf{f}_{DD}(k) \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{f}_{CTSEI}(k)$  为 CTSEI 部分权向量;  $\mathbf{f}_{DD}(k)$  为 DD 部分权向量,都采用随机梯度法最小化代价函数得到。即

$$J_{CTSEI}(\mathbf{f}) = E\{[e_{CTSEI}(k)]^2\} = E\{[R_{CTSEI}^2 - |z_{CTSEI}(k)|^2]^2\} \quad (8)$$

$$J_{DD}(\mathbf{f}) = E\{[e_{DD}(k)]^2\} = E\{[\hat{\mathbf{a}}(k) - \mathbf{y}(k)]^2\} \quad (9)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{f}_{CTSEI}^T(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{f}_{DD}^T(k) \mathbf{x}(k) \quad (10)$$

CTSEI 部分权向量迭代公式为

$$\mathbf{f}_{CTSEI}(k+1) = \mathbf{f}_{CTSEI}(k) - \mu_C \mathbf{Q}(k) \mathbf{y}_{CTSEI}(k) e_{CTSEI}(k) \mathbf{x}^*(k) \quad (11)$$

式中  $\mu_C$  为 CTSEI 的步长。

DD 部分权向量迭代公式为

$$\mathbf{f}_{DD}(k+1) = \mathbf{f}_{DD}(k) -$$

$$\mu_D \delta[\hat{\mathbf{a}}(k) - \mathbf{a}(k)] [\hat{\mathbf{a}}(k) - \mathbf{y}(k)] \mathbf{x}^*(k) \quad (12)$$

式中  $\mu_D$  为 DD 的步长,  $\hat{\mathbf{a}}(k)$  为  $\tilde{\mathbf{y}}(k)$  的判决输出,且

$$\tilde{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{f}_{CTSEI}^T(k+1) \mathbf{x}(k) + \mathbf{f}_{DD}^T(k) \mathbf{x}(k) \quad (13)$$

式中  $\delta(k)$  为冲激响应函数  $\delta(k) = \begin{cases} 1, & k=0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}$ ,即 DD 算法的权向量的更新取决于  $\mathbf{y}(k)$  与  $\tilde{\mathbf{y}}(k)$  的判决输出是否相同。当  $\mathbf{y}(k)$  和  $\tilde{\mathbf{y}}(k)$  的判决输出相同时,就能保证 DD 算法的正确判决,此时就对 DD 算法权向量进行更新并加快收敛速度和降低稳态误差。为了加快收敛速度,令  $\mu_D > \mu_C$ 。

## 3 MATLAB 仿真与 DSP 实现

为了检验 CTSEI-DD 算法的性能,以 CTSEI 算法与 MSEI 算法<sup>[12]</sup>为比较对象,进行仿真与实现研究。首先利用 MATLAB 仿真获取 CTSEI-DD 算法性能最佳时的相关参数,再利用所获参数进行 DSP 实现。

### 3.1 MATLAB 仿真

混合相位水声信道脉冲响应为  $\mathbf{c} = [0.313 \ 2 - 0.104 \ 0 \ 0.890 \ 8 \ 0.313 \ 4]$ 。发射信号为 16QAM 信号,取 8 000 个点,信噪比为 25 dB,均衡器权长 16,权向量中心抽头初始化。当 MSEI 算法、CTSEI 算法和 CTSEI-DD 算法的步长  $\mu_{MSEI}$ ,  $\mu_{CTSEI}$ ,  $\mu_{CTSEI-DD}$  分别为 0.000 3, 0.002, 0.000 8, DD 算法的步长  $\mu_{DD}$  为 0.003 时,100 次蒙特卡洛仿真结果表明了 CTSEI-DD 算法的性能最佳。在上述参数下, MATLAB 仿真结果表明, CTSEI-DD 算法具有最快的收敛速度、最小的均方误差,星座图最为清晰、紧凑。

### 3.2 DSP 实现

DSP 是高速信号处理器芯片,应用广泛<sup>[13-14]</sup>。为了用 DSP 芯片实现 CTSEI-DD 算法,本文选用美国 TI 公司的 TMS320C5509 芯片,该芯片低功耗、定点运算、速度达 100 MIPS,能满足实时处理的要求。由 TMS320C5509 设计的均衡器硬件结构,如图 3 所示。图中,SDRAM 是同步动态存储器,通过 CPLD 扩展 DSP 引脚与 SDRAM 连接,利

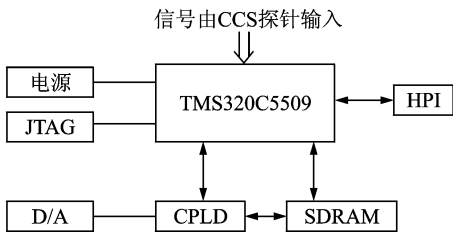


图 3 硬件框图

Fig. 3 Hardware block diagram

用单一系统时钟同步所有的地址数据和控制信号,且 DSP 通过 CPLD 与 D/A 数模转换连接,将处理后的数据实时显示在示波器上。HPI 是一种并行接口总线,外部主处理器通过它可以直接访问 5509 的片上存储器,但不能访问 CPU 寄存器、片上寄存器和片上存储器。HPI 是上位机和 5509 并行通讯的接口,通过 HPI,外部处理器可以方便地与 5509 接口,交换数据。

DSP 实现 CTSEI-DD 算法主要分两部分:先在 CCS 中用 C 语言编写算法代码,编写配置文件,测试算法的可行性。软件流程如图 4,5 所示。

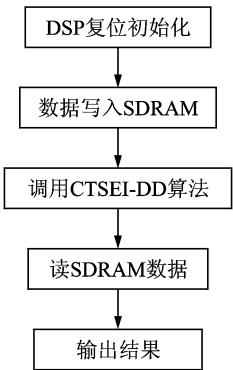


图 4 主流程图

Fig. 4 Main flow chart

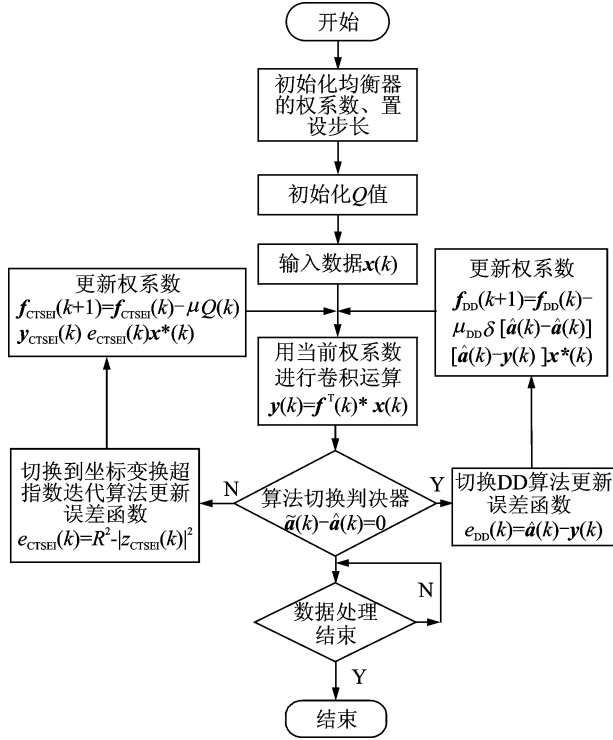


图 5 CTSEI-DD 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of CTSEI-DD algorithm

用 DSP 实现 CTSEI-DD 算法时,通过 JTAG 仿真器将 DSP 与主机相连,在主机上运行 CCS 进行实时观测均衡器输出。实验中需要数据时,通过 MATLAB 导入,但 TMS320C5509 是 16 位定点型 DSP,而均衡器的输入信号 16QAM 是浮点数据,所以,在数据进入均衡器处理前,需要对数据进行定标处理;然后,将该数据由 CCS 的探针导入到 SDRAM 中,通过 SDRAM 对 DSP 进行读写操作,直到数据处理完毕。由 DSP 实现的盲均衡算法输出及误差收敛曲线,如图 6 所示。

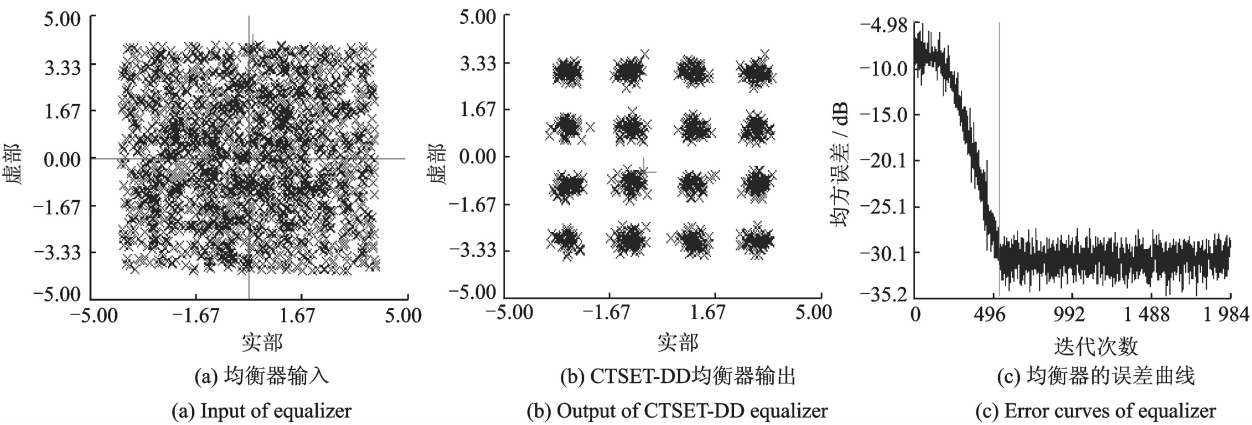


图 6 DSP 实现的结果

Fig. 6 DSP implementation results of CTSEI-DD equalizer

图 6 表明,CTSEI-DD 算法的 DSP 实现后,CTSEI-DD 算法的输出星座张开清晰、紧凑;均方误差在迭代 500 余次就收敛,而收敛后的均方误差能达到 $-30\text{ dB}$ ,但收敛后均方误差的波动性较大,其原因可能为在 CCS 环境中只做了 64 次蒙特卡洛仿实验,实验次数偏少所致。实验结果表明,用 DSP 芯片实现 CTSEI-DD 算法是完全可行的。

## 4 结束语

本文提出了 CTSEI-DD 盲均衡算法,并在 MATLAB 仿真基础上,选用 TMS320C5509 芯片实现了 CTSEI-DD 算法。CTSEI-DD 的 DSP 实现结果表明,该算法对高阶 QAM 信号进行均衡是有效的,用 DSP 实现该算法的方法是可行的。

### 参考文献:

- [1] Shalvi O, Weinstein E. Super-exponential methods for blind equalization[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1993, 39(2):505-519.
- [2] Guo Y C, Zhao X Q. Coordinate transformation based super-exponential iterative blind equalization algorithm[C]//2010 Second Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System (PACCS). Beijing:Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010:125-128.
- [3] 李晓波,樊养余. 一种含软判决引导的超指数迭代盲均衡算法[J]. 测控技术, 2013, 32(8):149-151.  
Li xiaobo, Fan Yangyu. A super exponential iterative blind equalization algorithm based on soft decision directed[J]. Measurement and Control Technology, 2013, 32(8):149-151.
- [4] 宁小玲,李启元,段立. 适用于 QAM 信号的方形判决超指数迭代盲均衡算法[J]. 声学技术, 2013, 32(1): 59-63.  
Ning Xiaoling, Li Qiyuan, Duan Li. Square contour decision-based super-exponential iteration blind equalization for QAM signals[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(1): 59-63.
- [5] 饶伟,郭业才,汪胜前,等. 基于坐标变换的常数模盲均衡新算法[J]. 电子学报, 2011, 39(1):7-12.  
Rao Wei, Guo Yecai, Wang Shengqian, et al. New constant modulus algorithm for blind equalization based on coordinate transformation[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1):7-12.
- [6] Ning Xiaoling, Liu Zhong, Liu Zhikun, et al. New super-exponential iteration blind equalization algorithm for underwater acoustic communications[C]//2011 International Conference on Image Analysis and Signal Processing (IASP). Hubei:IEEE Press, 2011: 468-473.
- [7] Li Jinming, Lu Jing. A modified super-exponential algorithm for joint blind equalization and carrier recovery[C]// Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on. Ningbo:IEEE Press, 2011: 2437-2440.
- [8] Zhang Pu, Yi Jin, He Sailing. Inverse transformation optics and reflection analysis for two-dimensional finite-embedded coordinate transformation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(2):427-432.
- [9] Yang Rui, Tang Wenxuan, Yang Hao, et al. A co-ordinate transformation-based broadband flat lens via microstrip array[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10(4):99-102.
- [10] Kwon Do-Hoon, Emiroglu C D. Low-profile embedded design of endfire scanning arrays with coordinate transformations[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(3): 034508. 1-034508. 8.
- [11] 郭业才,杨超. 基于正交小波变换的超指数迭代联合盲均衡算法[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(1):13-17.  
Guo Yecai, Yang Chao. New combined super-exponential iteration blind equalization algorithm based on orthogonal wavelet transform[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010, 25(1):13-17.
- [12] 丁雪洁,刘纪元,黄海宁. 一种新型频域快速盲分离算法[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(3):261-267.  
Ding Xuejie, Liu Jiuyuan, Huang Haining. Novel fast blind source separation algorithm in frequency domain[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(3):261-267.
- [13] 管庆,朱海,王凯,等. 基于 TMS320DM8168 的视频监控跟踪系统[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(6): 652-658.  
Guan Qing, Zhu Hai, Wang Kai, et al. Video surveillance tracking system based on TMS320DM8168 [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(6):652-658.
- [14] 刘朝晨,吴强,殷超. 一种基于 TMS320C6713 的语音信号频域盲分离算法[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(6):646-652.  
Liu Zhaochen, Wu Qiang, Yin Chao, et al. Blind speech separation in frequency domain based on TMS320C6713 DSK[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(6):646-652.

**作者简介:**郭业才(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向:水声信号处理、通信信号处理、自适应盲均衡技术, E-mail: guo-yecai@163.com;吴彬彬(1988-),男,硕士研究生,研究方向:通信信号处理;张冰龙(1989-),男,硕士研究生,研究方向:通信信号处理、智能优化计算。