

基于 QPSK 系统的盲均衡 TXK 算法

于舒娟¹, 史学军¹, 王立斌²

(1. 南京邮电学院 电子工程系, 江苏 南京 210003; 2. 黑龙江省计量院, 黑龙江 哈尔滨 150036)

[摘要] 由于实际数字信息通过的信道是带限、非理想信道, 将引起符号间干扰, 如果不加补偿, 会产生高的差错率. 均衡器是为补偿这些信道失真而设计的. 提出了基于四相相移键控系统(QPSK)的TXK算法. 该算法能够有效地适用于实单输入多输出信道(SIMO), 其思想是利用信道Toeplitz估计复矩阵 \mathbf{H} 的实部估计发送序列. 通过基于经典文献信道仿真结果表明, 该算法对于四相相移键控系统具有良好的盲信道均衡和盲信号序列检测能力.

[关键词] 盲均衡, 单输入多输出信道, TXK, 四相相移键控

[中图分类号] TN914. 53, [文献标识码] B, [文章编号] 1672-1292-(2004)03-0038-03

0 引言

在 CDMA(Code Division Multiple Access)通信系统中, 各种干扰不可避免. 如何避免这些干扰, 有效地恢复信号, 是近年来研究的热点, 其中多用户检测技术得到广泛深入的研究. 多用户检测技术按照接收端所知发送信号和信道的先验知识可以分为非盲多用户检测及盲多用户检测. 对于未来高速 CDMA 系统来说, 非盲多用户检测中训练序列占用了大量的系统资源, 严重地限制了系统的容量, 所以基于多径衰落信道的各种盲多用户检测技术被相继提出. 随着人们对系统盲均衡研究不断深入, 越来越多的算法不断地充实这一领域. 研究 SIMO(Single-input multiply-output)系统, 并将它进一步推广, 对于描述解决多用户问题大有帮助. 自从 Tong 等发表文献[1~4]以后, 盲信道辨识和均衡发展进入一个新的时期, 即只凭借输出信号的二阶统计量(SOS, second-order statistics)便可以实现对 SIMO 线性离散信道的均衡, 随后在此结果基础上形成多种信道盲辨识和信号序列盲检测算法. 由 Tong L, Xu G, 以及 Kailath T 提出的基于二阶统计量著名的盲信道均衡算法^[1], 简称 TXK 算法, 在文献中是应用于二相相移键控系统(BPSK). 本文在此基础上提出基于四相相移键控系统(QPSK)的 TXK 算法. 该算法能够有效地适用于实单输入多输出信道(SIMO), 并利用 MATLAB 在经典文献信道对该算法进行仿真, 对仿真结果进行了分析.

1 SIMO 信道 QPSK 系统 TXK 算法

考虑一个实 SIMO 信道 QPSK 通信系统, 信号经过一个线性时不变(LTI, linear time-invariant)系统, 该信道具有有限长冲激响应(FIR, finity impulse response), 则信号输出端基带离散信号模型常用如下向量表示:

$$\mathbf{y}(k) = \sum_{j=0}^M \mathbf{h}(j) s(k-j) + \mathbf{v}(k) = [h(0), \dots, h(M)] \cdot \mathbf{s}_{M+1}(k) + \mathbf{v}(k) \tag{1}$$

式中, 发送信号向量 $\mathbf{s}_{M+1}(k) = [s(k), \dots, s(k-M)]$, $s(k) \in A$, 有限字符集 $A = \{\pm 1 \pm j\}$; $s(k)$ 实部、虚部相互独立, 且它们分别以等概率取+1或-1; $\mathbf{h}(j) = [h_1(j), \dots, h_q(j)]^T$ 是 $(q \times 1)$ 的实列向量, $\mathbf{y}(k) = [y_1(k), \dots, y_q(k)]^T$, $\mathbf{v}(k) = [v_1(k), \dots, v_q(k)]^T$ 都是 $(q \times 1)$ 的复列向量, $\mathbf{v}(k)$ 是加性噪声复向量序列, 且 $E\{\mathbf{v}(k) \mathbf{v}^H(l)\} = \sigma_v^2 \cdot \delta(k-l) \cdot \mathbf{I}$ 及发送信号与噪声信号相互独立, q 是输出子信道的数目; $M = \max\{M_i | i = 1, \dots, q\}$, M_i 是子信道 $h_i(\forall i)$ 的长度. 因为是实信道, (1) 式可写成

$$\begin{cases} \text{Re}[\mathbf{y}(k)] = [h(0), \dots, h(M)] \cdot \text{Re}[\mathbf{s}_{M+1}(k)] + \text{Re}[\mathbf{v}(k)] \\ \text{Im}[\mathbf{y}(k)] = [h(0), \dots, h(M)] \cdot \text{Im}[\mathbf{s}_{M+1}(k)] + \text{Im}[\mathbf{v}(k)] \end{cases} \tag{2}$$

若一次观测到的数据长度为 N 个字符, 可以把接收信号向量描述为:

$$\begin{cases} \text{Re}[\mathbf{y}_N(k)] = \mathbf{H} \cdot \text{Re}[\mathbf{s}_{M+N}(k)] + \text{Re}[\mathbf{v}_N(k)] \\ \text{Im}[\mathbf{y}_N(k)] = \mathbf{H} \cdot \text{Im}[\mathbf{s}_{M+N}(k)] + \text{Im}[\mathbf{v}_N(k)] \end{cases} \quad (3)$$

在此, $\mathbf{y}_N(k) = [y(k), \dots, y(k - N + 1)]^T$; $\mathbf{s}_{M+N}(k) = [s(k), \dots, s(k - M - N + 1)]$; $\mathbf{v}_N(k)$ 是加性白噪声复向量, 其大小为 $N_q \times 1$; 信道传输矩阵 \mathbf{H} 是一个块 Toeplitz 实矩阵, 其大小为 $N_q \times (N + M)$. Tong 的文献中指出的 \mathbf{H} 的列满秩条件是二阶统计方法盲检测的前提, 这就要求采样所得各子信道不存在公零点, 另外 \mathbf{H} 阵的列数小于等于它的行数, 即信道输出量至少不小于输入量. Tong 的文献还证明了在无噪声情况下, 利用接收矢量的自相关阵能够在相差常数因子的范围内辨识出信道. 下面导出实 SIMO 信道 QPSK 通信系统中的 TXK 算法. 在无噪声条件下, 设接收信号复向量 $\mathbf{y}_N(k)$ 的自相关阵为 $\mathbf{R}_x(0)$ 和 $\mathbf{R}_x(1)$, 对 $\mathbf{R}_x(0)$ 进行奇异值分解:

$$\mathbf{U}^H \mathbf{R}_x(0) \mathbf{U} = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_d^2, 0, \dots, 0) \quad (4)$$

记 $\mathbf{U}_s = [u_1, u_2, \dots, u_d]$, 其中, u_i 是 \mathbf{U} 的第 i 列.

$$\begin{aligned} \Sigma &= \text{diag}[\sigma_1, \dots, \sigma_d] \\ \mathbf{F} &= \Sigma^{-1} \mathbf{U}_s^H \end{aligned} \quad (5)$$

设 $\mathbf{R} = \mathbf{F} \mathbf{R}_x(1) \mathbf{F}^H$, 对其作如下奇异值分解:

$$[x_1, \dots, x_d]^H \mathbf{R} [z_1, \dots, z_d] = \text{diag}(\gamma_1^2, \dots, \gamma_d^2) \quad (6)$$

在文献[1]中证明了在相差一定相位的范围内, 可以如下辨识原信道:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}_s \sum Q e^{j\phi}, \mathbf{Q} = [x_d, \mathbf{R} x_d, \dots, \mathbf{R}^{(d-1)} x_d] \quad (7)$$

值得指出: 据(7)可得信道 Toeplitz 估计复矩阵 \mathbf{H} , 而本文前提 QPSK 发送序列是在实 SIMO 信道中进行传输, 因此, 由实际信道构成的 Toeplitz 矩阵 \mathbf{H} 也应该是实矩阵, 即信道 Toeplitz 估计复矩阵 \mathbf{H} 的虚部是由误差引起的, 所以与文献[1]算法不同, QPSK 系统可估计发送序列由下式确定

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_{M+N}(k) &= \text{sign}\{\text{Re}\{\text{Re}[\mathbf{H}]^H \cdot \mathbf{Y}_N(K)\}\} + j \cdot \\ &\text{sign}\{\text{Im}\{\text{Re}[\mathbf{H}]^H \cdot \mathbf{Y}_N(K)\}\} \end{aligned} \quad (8)$$

2 仿真实例

仿真采用不含共零点的经典文献信道^[4], 具体参数为: 二径, 窗口宽 $6T$ (既各子信道长度为6), 升余弦脉冲 $P(t)$ 的滚降因子 $\alpha = 0.10$, 且 $h(t) = P(t) - 0.7P(t - T/3)$; 输入为实部, 虚部均独立同分布的 (i. i. d) QPSK 信号, 过采样因子 $q = 3$.

实验 1: 实验中取均衡器阶数 $L = 2$, 信噪比 SNR 分别为 15、25、35 dB, 采用信号序列长度 400, 分别进行 50 次 Monte Carlo 信道均衡仿真试验. 仿真结果见图 1(a)、(b)、(c), 仿真表明该算法的盲信道均衡能力随信噪比的增加变强.

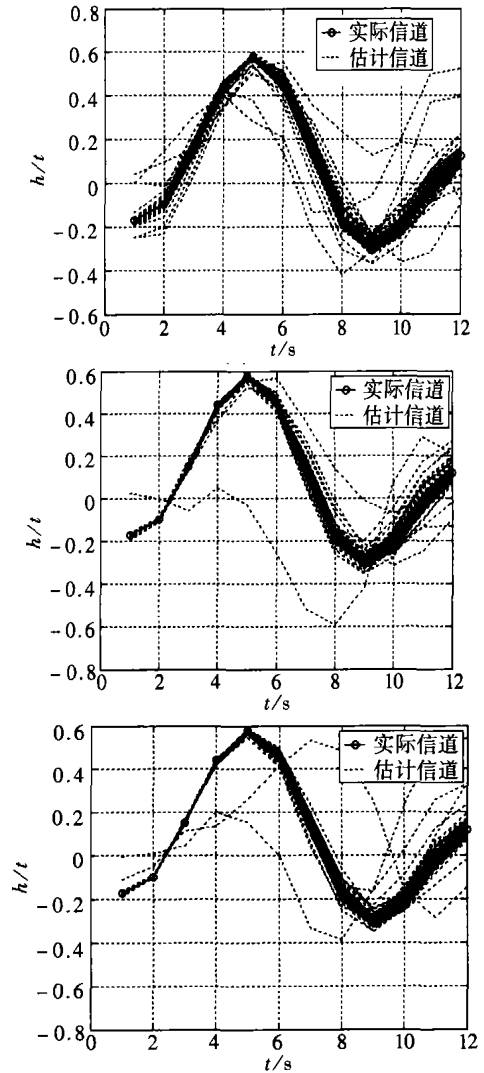


图1 QPSK 系统 TXK 算法信道辨识

实验 2 采用无公零点经典文献信道, 对 QPSK 发送序列分别利用 TXK 算法与文献[2, 3]介绍的子空间法 (SSA, Subspace Algorithm), 文献[2, 4]介绍的外积分解法 (OPD, Outer Product decomposition) 直接盲检测, 并对误码性能进行比较. 实验中取均衡器阶数 $L = 2$, 采用信号序列长度 400, 分别进行 100 次 Monte Carlo 信号序列检测仿真试验, 信噪比 SNR 分别为 5、8、10、12、15、18、20、25 dB. 仿真结果见图 2, 该结果表明, 对于 QPSK 系统, TXK 算法对信号序列具有较好的检测能力, 其性能优于外积分解法 (OPD), 与子空间法 (SSA) 性能相近.

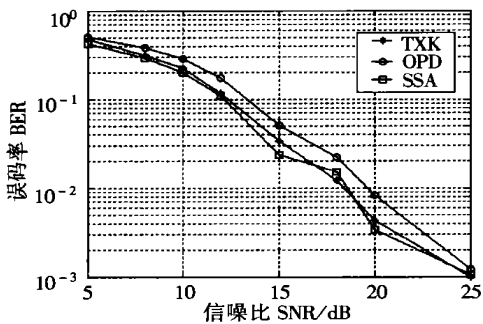


图 2 经典信道不同算法直接盲检测误码率比较

3 结论

本文在文献[1] 给出的 TXK 算法的基础上提出基于四相相移键控系统(QPSK)的 TXK 算法,其思想是利用信道 Toeplitz 估计复矩阵 H 的实部估计发送序列.通过仿真分析,说明该算法能够有效地适用于实单输入多输出信道(SIMO)均衡,并得出以下结论:(1)该算法对于 QPSK 系统的盲信道均衡能力随信噪比的增加变强;(2)通过在无公零

点经典文献信道,不同信噪比条件下对 QPSK 发送序列分别利用 TXK 算法与子空间法(SSA)、外积分解法(OPD)直接盲检测,并对误码性能进行比较表明,对于 QPSK 系统,TXK 算法对信号序列具有较好的检测能力,其性能优于外积分解法(OPD),与子空间法(SSA)性能相近.

[参考文献]

[1] Tong L, Xu G, Kailath T. Blind Channel Identification and Equalization using Second-order statistics: A Time-Domain Approach[J] . IEEE Trans Inform Theory, 1994, 40(3): 340 - 349.
[2] Ding Z, Li Y. Blind equalization and identification[M] . New York: Marcel Dekker, 2000. 167 - 193.
[3] Moulines E, Duhamel P, Cardoso J F, *et al.* Subspace Methods for the blind identification of multichannel FIR filters [J] . IEEE Trans Signal Processing, 1995, 43(2): 516 - 525.
[4] Ding Z. Matrix Outer-Product Decomposition Method for Blind Multiple Channel Identification[J] . IEEE Trans on Signal Processing, 1997, 45(12): 3045 - 3061.

Blind Equalization TXK Algorithm Based on QPSK System

YU Shujuan¹, SHI Xuejun¹, WANG Libin²

(1. Department of Electronic Engineering, Nanjing Institute of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. Institute of Measurement and Verification of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China)

Abstract: Because the channels for the actual digital communications signals are band-limited and non-ideal, symbol interferences will be caused, leading to high error rates if left uncompensated. The equalizers have been designed to compensate for the channel distortions. This article brings forward further the TXK Algorithm based on QPSK system. This algorithm can be applied to real SIMO channels. The principle is to estimate the transmission sequences by the evaluation of the real part of the channels. Simulation results indicate that this method of TXK has the better ability to equalize blind channels and to detect blind sequence in QPSK system.

Key words: blind equalization, single-input multiply-output (SIMO) channel, TXK, quadrature phase shift keying (QPSK)

[责任编辑: 刘健]