

基于并行混合遗传算法的直接盲信号检测^{*}

牛海荣,于舒娟

(南京邮电大学 电子科学与工程学院,江苏 南京 210003)

摘要: 借助接收数据阵补投影算子对待测发送序列向量的零化作用,把信号盲检测问题转化为整数约束下的二次规划问题,提出了基于并行混合遗传算法的直接盲信号检测的方法。仿真结果表明,该算法只需较小的数据量就可以快速地盲恢复出发送信号,误码率较低,收敛速度快,性能稳定,优于现有的经典盲均衡算法。

关键词: 盲检测;遗传算法;盲均衡

中图分类号: TN911

文献标识码: A

Direct blind signal detection based on parallel hybrid genetic algorithms

NIU Hai Rong, YU Shu Juan

(Institute of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper takes the complementary projection operator of a received data matrix as annihilator of a transmitted sequence vector to be detected, and then formulates the blind detection problem into a quadratic optimization with integral. A novel direct blind signal based on parallel hybrid genetic algorithms is proposed. Simulations show that the algorithm which only needs smaller amount of data can quickly blind recover the transmitted signal, low error rate, achieve good astringency and satisfactory performance, better than the existing classical algorithm for blind equalization.

Key words: blind detection; genetic algorithms; blind equalization

通信系统中多径信道引起的码间干扰(ISI)会严重恶化通信系统的性能。消除码间干扰(ISI)的方法是均衡技术,传统的均衡技术需要发送训练序列,因此而降低了通信信道的传输效率。盲均衡是一种只根据接收信号的观测序列,无需发送训练序列的均衡处理技术,进而提高了通信信道的传输效率。盲均衡技术作为通信信号处理中的核心之一,近年来成为研究的热点。由于盲信号处理技术的发展,盲均衡成了通信技术取得的最重要的进展之一。目前已经陆续提出了基于高阶统计量(HOS)、高阶累积量(HOC)和二阶统计量(SOS)的盲均衡算法^[1-3],但这些算法存在一些明显的弱点,数学模型复杂、所需数据量大、很难收敛。遗传算法以其高度的并行处理能力、强鲁棒性和全局搜索能力,已经被广泛应用,

特别是近年来随着盲信号处理技术的发展,遗传算法在盲均衡中的应用也更加广泛,并取得了良好效果,使得遗传算法应用于盲信号处理成为研究的热点。而现有的利用遗传算法解决盲均衡问题的文献中,大多都是利用接收信号的高阶累积量先进行信道辨识,再均衡出发送信号,这样利用信号数据量大,适应度函数构造复杂,信号恢复的性能受限于信道估计的准确性^[4-6]。本文根据信号属于有限字符集的显著特点,利用发送信号的有限字符集元素构成遗传基因,无需编码和解码过程,适应度函数直接针对发送信号,搜索空间有限,所需接受数据量少,寻优过程快速准确,大大降低了遗传算法的复杂度。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 60772060)

1 SIMO 系统模型与问题的提出

考虑输出为 q 的离散线性单输入多输出(SIMO)系统。记 $q \times 1$ 的接收信号向量 $\mathbf{x}(k)$ 和信道噪声向量 $\mathbf{v}(k)$ 为:

$$\mathbf{x}(k)=[x_1(k), x_2(k), \dots, x_q(k)]^T$$

$$\mathbf{v}(k)=[v_1(k), v_2(k), \dots, v_q(k)]^T$$

SIMO 信道输出端的基带离散信号模型常用如下向量模型表示

$$\mathbf{x}(k)=\mathbf{h}(z)s(k)+\mathbf{v}(k)=\sum_{i=0}^M \mathbf{h}(i) \cdot s(k-i)+\mathbf{v}(k)$$

$$=H_q \cdot s_{M+1}(k)+\mathbf{v}(k) \quad (1)$$

式中:信道冲激响应 $\mathbf{h}(z)=\sum_{i=0}^M \mathbf{h}(i) \cdot z^{-i}$, 相应的时域矩阵 $H_q=[h(0), h(1), \dots, h(M)]$, 其中 $M=\max\{M_i | i=1, 2, \dots, q\}$, M_i 是第 i 子信道的阶数; q 是输出子信道的个数, 即过采样因子。

由系统理论 Bezout 恒等式可知, 当且仅当 $\mathbf{h}(z)$ 没有公零点时, 一般存在均衡器 $\mathbf{g}(z)$ 使

$$\mathbf{y}(k)=\mathbf{g}(z)\mathbf{x}(k)=\mathbf{g}(z)[\mathbf{h}(z)s(k)]=\mathbf{g}(z) \left[\frac{1}{c} \mathbf{h}(z) \right] \cdot [cs(k)]$$

$$=\mathbf{g}(z)\tilde{\mathbf{h}}(z) \cdot [cs(k)]=cs(k) \quad (2)$$

式中, c 是模糊因子, 可取任意复数。在通信中, 恢复信号相对源信号存在某种延迟 d 是允许的, 因此可更一般地写成

$$\mathbf{y}(k)=\mathbf{g}(z)\mathbf{x}(k)=cs(k-d) \quad (3)$$

本文讨论的盲问题是: 仅知公式(1)中的接收信号向量 $\mathbf{x}(k)$, 估计发送信号 $s(k)$ 。

在本文作以下假设:

(1) 输入序列 $s(k)$ 均值为 0, 且 $E\{s(k) \cdot s(l)\}=\delta(k-l)$ 。

(2) $\mathbf{v}(k)$ 是均值为零的白噪声, 方差为 σ_v^2 , 且 $E\{\mathbf{v}(k) \cdot$

$$\mathbf{v}(l)\}=\sigma_v^2 \cdot \delta(k-l) \cdot I。$$

(3) 输入信号与噪声是不相关的, 即 $E\{s \cdot v_i | i=1, 2, \dots, q\}=0$ 。

2 SIMO 系统直接盲信号检测的并行混合遗传算法的实现

利用遗传算法进行盲均衡^[5], 大多属于函数优化问题, 其搜索空间大, 收敛速度慢。本文把问题直接指向发送信号, 巧妙地构造出针对发送信号的适应度函数, 属于组合优化问题, 因此在很大程度上简化了算法。

本文利用并行混合遗传算法进行盲均衡, 在其全局搜索过程中, 适应度函数的选取至关重要, 它直接影响到算法的收敛速度以及能否找到最优解。该算法中适应度函数的构造方法如下:

首先构造一个 $(L+1)q \times (L+M+1)$ 的信道卷积 Toeplitz 矩阵:

$$H=\begin{bmatrix} h(0) & h(1) & \dots & h(M) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h(0) & h(1) & \dots & h(M) & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & & & \ddots & & 0 \\ 0 & \dots & 0 & h(0) & h(1) & \dots & h(M) \end{bmatrix}$$

根据公式(1), 当采用 L 阶 FIR 滤波器 $\mathbf{g}(z)$ 对接收信号进行滤波时, 长度为 $(L+1)q$ 的接收信号向量可表述为

$$\mathbf{x}_{L+1}(k)=H \cdot \mathbf{s}_{M+L+1}(k)+\mathbf{v}_{L+1}(k) \quad (4)$$

式中, L 是向量均衡器 $\mathbf{g}(z)$ 的阶, 也称为平滑因子; M 是 SIMO 系统信道 $\mathbf{h}(z)$ 的阶数; $\mathbf{x}_{L+1}(k)=[\mathbf{x}^T(k), \mathbf{x}^T(k-1), \dots, \mathbf{x}^T(k-L+1)]^T$; $\mathbf{v}_{L+1}(k)$ 是噪声向量。

于是, 进一步根据(3)式, 对 N 个连续的估计信号 $y(k), y(k+1), \dots, y(k+N-1)$ 写出

$$\mathbf{y}_N=X_N \cdot \mathbf{g}=S_N \cdot H^T \cdot \mathbf{g} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{x}_N=[x(k), x(k+1), \dots, x(k+N-1)]^T$, $\mathbf{y}_N=[y(k), y(k+1), \dots, y(k+N-1)]^T$ 。则有:

$$\hat{s}_N(k)=\text{sign}\{X_N \cdot \mathbf{g}\} \quad (6)$$

为恢复发送信号 $s_N(k)$, 构造以下参差函数

$$\mathbf{e}_N=X_N \mathbf{g}-s_N \quad (7)$$

由最小均方误差准则可得

$$\hat{s}_N(k)=\arg \min_{\substack{g \in \mathbb{R}^{(L+1)q} \\ \forall s_N \in \{\pm 1\}^N}} \|X_N \mathbf{g}-s_N\|^2 \quad (8)$$

由于均衡器 $\mathbf{g}(z)$ 未知, 所以无法根据(8)式估计发送信号。为了估计发送信号, 现构造补空间投影算子 $Q=I-X_N(X_N^H X_N)^{-1} X_N^H=\overline{U}_C \overline{U}_C^H$, 其中 \overline{U}_C 是 X_N 零空间的正交阵, 可写出补空间残差:

$$\xi_N=Q\mathbf{e}_N=Q[X_N \mathbf{g}-s_N]=-\mathbf{Q} \cdot s_N \quad (9)$$

所以发送序列估计 \hat{s}_N 可以直接通过如下二次规划问题求解获得。

$$\hat{s}_N=\arg \min_{\forall s_N \in \{\pm 1\}^N} \|\xi_N\|^2=\arg \min_{\forall s_N \in \{\pm 1\}^N} s_N^H Q s_N \quad (10)$$

从(10)式不难发现, 并行混合遗传算法特别适用于该优化问题。如果直接以待求解的目标函数转化为适应度函数, 即 $F=\arg \min_{\forall s_N \in \{\pm 1\}^N} s_N^H Q s_N$ ^[7], 虽然简单直观, 但是实际应用时, 存在以下 2 个问题: (1) 不满足常用的赌盘选择非负的要求; (2) 某些待求解的函数值可能彼此相差十分悬殊, 由此得到的平均适应度值可能不利于体现群体的平均性能, 将影响算法的效果。针对此问题本文设计如下的适应度函数:

实际应用时, 存在以下 2 个问题: (1) 不满足常用的赌盘选择非负的要求; (2) 某些待求解的函数值可能彼此相差十分悬殊, 由此得到的平均适应度值可能不利于体现群体的平均性能, 将影响算法的效果。针对此问题本文设计如下的适应度函数:

$$F(J)=\begin{cases} C_{\max}-J & J < C_{\max} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $J=s_N^H Q s_N$ 为目标函数; C_{\max} 为目标函数的理论最大值。

盲检测的并行混合遗传算法的实现步骤:

(1) 初始化, 随机产生 4 个独立的初始种群, 每个种

网络与通信 Network and Communication

群有 40 个基因, 基因长度为 60。本算法进行搜索寻优即为搜索函数 $F(J)$ 的全局最优值, 其中 $J=s_N^H Q s_N$, 其中 Q 为接收序列 X_N 构造的补空间投影算子, s_N 为随机产生的序列, s_N^H 为 s_N 转置矩阵, 对于每个种群是一个的矩阵。

(2) 对于每个种群进行独立进化, 它们具有独立的交叉概率和变异概率。具体步骤如下:

① 计算每个种群的适应度函数, 比较大小, 进行最优保存, 得到子种群的最佳适应度函数和最佳信号;

② 进行锦标赛选优、交叉、变异;

③ 再进行最优保存, 得到子种群当前最佳适应度函数和子种群当前最佳信号;

④ 取出 10% 的精英基因进行贪婪算法;

⑤ 再进行最优保存, 得到子种群当前最佳适应度函数和子种群当前最佳信号。

(3) 在 4 个初始子种群独立进化都完成后, 取出 20% 的优良基因进行子种群间的信息交换, 也就是将 2 个子种群的优良基因进行相互交换, 这种信息交换是任意的。

(4) 不满足终止条件, 进行步骤 2, 重新进行子种群独立进化, 进行寻优搜索。

(5) 满足终止条件, 则将所求得的 4 个子种群的最佳适应度函数进行比较, 得到总体最佳适应度函数和最佳信号, 即为本遗传算法所要恢复的接收信号。

3 仿真试验

本实验采用了 BPSK 和 QPSK 作为发送序列, 分别对实信道和复信道进行仿真。过采样因子为 $q=3$, 数据长度 $N=60$ 。所有仿真结果都是经 100 次 Monte Carlo 试验而得。仿真给出了不同信噪比情况下的信号盲检测误码率-信噪比(BER-SNR)曲线图, 且为了方便, 以下仿真实验将误码率(BER)处理为 10^{-5} 。

实验 1: 采用 BPSK 发送序列, 信道为实信道, 信道采用经典文献信道^[8], 其具体参数为: 2 径, 子信道阶数为 5, 滚降因子 $\alpha=0.10$, $h(t)=P(t)-0.7P(t-T/3)$, 其中, $P(t)$ 为升余弦冲击响应。实验 1 的仿真结果如图 1 所示。

从实验 1 的仿真结果看, 采用 BPSK 发送序列, 本文所提出的并行混合遗传算法(PHGA)在数据长度为 $N=60$, 信噪比(SNR)为 10 dB 时, 就可以恢复出发送序列, 且误码率较低, 效果优于子空间算法(SSA)和恒模算法(CMA)。

实验 2: 采用 QPSK 发送序列对复信道进行仿真, 复信道为 $h(t)=h_r(t)+ih_i(t)$, 其中, $h_r(t)=P(t)-0.7P(t-T/3)$, $h_i(t)=P(t)-0.5P(t-2T/3)$ 。实验 2 的仿真结果如图 2 所示。

从实验 2 的仿真结果看, 采用 QPSK 发送序列, 本

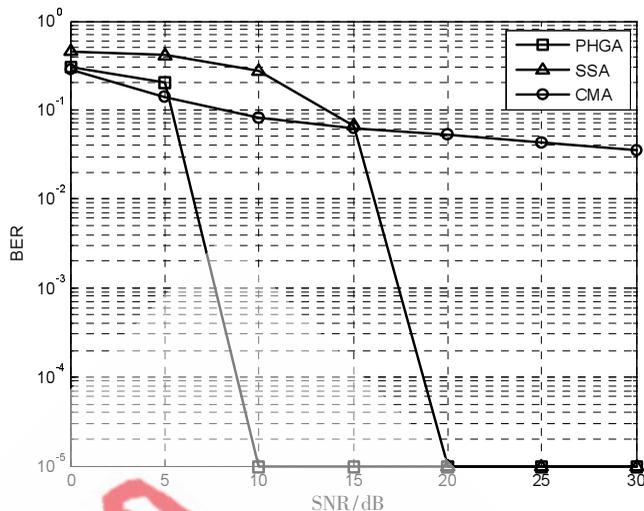


图 1 盲检测 BPSK 信号的 SNR_BER 性能曲线

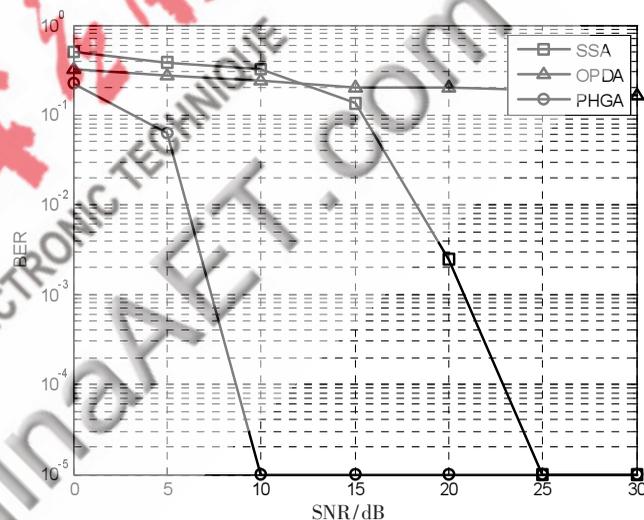


图 2 盲检测 QPSK 信号的 SNR_BER 性能曲线

文所提出的并行混合遗传算法(PHGA)在数据长度为 $N=60$, 信噪比(SNR)为 10 dB 时, 就可以恢复出发送序列, 且误码率较低, 效果优于子空间算法(SSA)和外积分解法(OPDA)。

本文介绍了并行混合遗传算法, 并且把该算法用于 SIMO 直接盲恢复 BPSK 信号和 QPSK 信号, 然后对该算法进行了仿真, 并与经典盲均衡算法随 SNR 变化的 BER 性能进行了比较。仿真实验表明, 当发送符号属于有限字符集时, 借助带整数约束的二次规划, 用本算法只需较小的数据量就可以有效迅速地盲恢复出发送信号, 并且误码率较低, 收敛速度快。

参考文献

- [1] TONG L, XU G, KAILATH T. Blind channel identification and equalization using second-order statistics: A time-domain approach. IEEE Transaction Information, 1994, 40(3): 340-349.

- [2] SHEN J Q, DING Z. Zero-forcing blind equalization based on subspace estimation for multiuser systems [J]. IEEE Transactions on Communication, 2001,49(2):262-271.
- [3] DING Z. Matrix outer-product decomposition method for blind multiple channel identification [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997,45(12):3054-3061.
- [4] CHEN Y W, NARIEDA S, YAMASHITA K. Blind nonlinear system identification based on a constrained hybrid algorithm[J]. IEEE Transactions,2003,52(3):898-902.
- [5] CHEN S, WUT Y, MCLAUGHLIN S. Genetic algorithm optimization for blind channel identification with higher order cumulant fitting[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997,1(4):259-265.
- [6] TAN Y, WANG J. Nonlinear blind source separation using higher order statistics and a genetic algorithm [J]. IEEE Transactions, 2001,5(6):600-601.
- [7] 孔春海,张志涌.基于最优保存并行混合遗传算法的直接盲信号检测[J].西安邮电学院学报,2007,12(1):71-75.
- [8] GIANNAKIS G B, HUA Y B, STOICA P, et al. Signal processing advances in wireless and mobile communications. Volume 1: trends in channel estimation and equalization [M]. 北京:人民邮电出版社,2002.

(收稿日期:2009-05-13)

