

区间小波变换域的2-PAM 信号自适应均衡算法^{*}

A New Adaptive Equalization Algorithm for 2-PAM Signal in the Interval Wavelet Transform Domain

王军锋 尚晓清 宋国乡

(西安电子科技大学理学院数学系 西安710071)

Abstract To make full use of the sparse structure of the wavelet transform correlation matrices and the ability of the interval wavelet to restrain edge effects, a new adaptive equalization algorithm in the interval wavelet transform domain is presented. Also, a new method for getting a sparse correlation matrix is described. The complexity of the new equalization algorithm is about $O(N\log N)$ by using the preconditioned conjugate gradient method. Simulation shows its convergence speed is faster and its computation complexity is smaller.

Keywords Interval wavelets, Wavelet transform, Adaptive equalization, Sparse matrix

1 引言

为了克服数字通信尤其是无线通信中所产生的码间干扰,一般需使用均衡器。最简单的均衡器是用 FIR 滤波器实现并采用最小均方误差(LMS)算法的线性横向均衡器(LTE),其优点是结构简单,易于实现,缺点是收敛速度较慢。为了提高收敛速度,可以对信号作正交变换,然后在变换域中通过自正交等方法降低相关阵的条件数来提高收敛速度^[1],比如文[2]提出的就是一种基于小波变换的自适应均衡算法。

研究表明,经小波变换后信号的自相关阵近似呈稀疏带状分布^[3],小波变换的这一优点使得它在自适应信号处理中的应用范围会更广一些。利用文[3]的结论,文[4]提出了一种 Newton-LMS 类自适应均衡算法,其收敛速度比文[2]的算法要快一些,而且由于对稀疏矩阵进行了 Cholesky 分解,因此其计算复杂度可以达到 $O(N\log^2 N)$ 。但分析后可以发现,文[4]使用的是 $L^2(R)$ 中的小波变换,这样会产生较大的边界效应,从而影响算法的收敛性。另外,文[4]对相关阵的稀疏化结构要先做模块化估计,由于这种估计与信号的性质、小波的消失矩以及小波分解的层次等都有关系,因而在实际中不便于使用。为此,本文试图利用正交区间小波变换^[5,6]来减小边界效应,并提出了一种简便有效的矩阵稀疏化方法。而对于稀疏矩阵的求逆,我们将其转化为求解稀疏正定线性方程组问题,从而使用预条件共轭梯度法^[7,8]将整个算法的计算复杂度进一步减小为 $O(N\log N)$ 。

2 变换域的自适应均衡算法

2.1 自正交算法

一般变换域的自适应均衡结构采用图1的形式,信号矢量 $x(n)=[x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]^T$ 经正交变换后得到信号矢量 $r(n)=[r_0(n), r_1(n), \dots, r_{N-1}(n)]^T$,再将 $r(n)$ 作为输入信号矢量进入均衡器,其中 N 是均衡器的长度。采用自正交等方法^[1,2]来调整均衡器的权系数得到输出信号 $y(n)$,再进行判决得到判决信号 $z(n)$,整个算法的基本步骤如下:

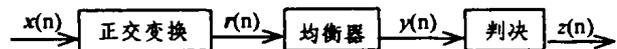


图1 变换域的自适应均衡结构图

$$r(n) = Qx(n) \quad (1)$$

$$y(n) = c^T(n)r(n) \quad (2)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (3)$$

$$c(n+1) = c(n) + 2\mu e(n)\Lambda^{-1}(n)r(n) \quad (4)$$

$$\text{其中 } \Lambda(n) = \text{diag}[\sigma_0^2(n), \sigma_1^2(n), \dots, \sigma_{N-1}^2(n)] \quad (5)$$

$$\sigma_i^2(n+1) = \alpha\sigma_i^2(n) + (1-\alpha)|r_i(n)|^2, i=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (6)$$

Q 为 $N \times N$ 为正交矩阵,由不同的正交变换所产生, $e(n)$ 为误差信号, $d(n)$ 为期望信号,权矢量 $c(n)=[c_0(n), c_1(n), \dots, c_{N-1}(n)]^T$, μ 是收敛步长, $0 < \alpha < 1$ 。与传统的 LTE 算法相比,自正交算法的特点在于先通过式(1)对信号进行正交变换,再利用式(4)中的因子 $\Lambda^{-1}(n)$ 来降低相关矩阵的条件数,从而加快收敛速度。

2.2 Newton-LMS 类算法

由于采用小波变换后信号自相关阵具有文[3]指出的近似的稀疏带状结构,因此文[4]利用这一结构提出了一种 Newton-LMS 类的快速算法,即将式(4)改为:

$$c(n+1) = c(n) - \mu \hat{g}(n) \quad (7)$$

其中下降方向 $\hat{g}(n)$ 由以下方程

$$\hat{R}_r(n)\hat{g}(n) = -2e(n)r(n) \quad (8)$$

确定, $\hat{R}_r(n)$ 为 n 时刻 $r(n)$ 相关矩阵的稀疏化估计。为了确定 $\hat{R}_r(n)$ 的稀疏结构,文[4]首先定义了一个稀疏矩阵模块 M :

$$M(i, j) = \begin{cases} 1, & i=j \text{ 或 } \hat{R}_r(i, j) \text{ 中可能出现} \\ & \text{较大值, } i, j=1 \sim N \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

然后令 $\hat{R}_r(n)$ 与 M 有相同的结构。由于这样定义的 M 中近似有个 $O(\log N)$ 个 1, 因此 $\hat{R}_r(n)$ 中近似有 $O(\log N)$ 个非零元素。利用 Cholesky 分解法求解线性方程组(8), 则其 Cholesky 因子也有同样的稀疏结构和 $O(\log N)$ 个非零元素。于是,该算法将计算复杂度从传统 Newton-LMS 算法的 $O(N^3)$ 降低为 $O(N \log^2 N)$, 是一种较好的算法。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(69972034)。王军锋 副教授,博士生,从事小波分析与自适应信号处理等方面的研究。尚晓清 讲师,博士生,从事小波分析、图像处理、模式识别等方面的研究。宋国乡 教授,博导,从事小波理论与应用、有限元、微分方程数值解等方面的研究。

但对自适应均衡来说,由于实际中信号特别是信道的变化较大,不易事先确定输入信号的特征及阈值, M 的结构也就难以确定,因此上述算法在实际中不便于使用。同时,其计算量还可以进一步降低,这就是以下我们改进后得到的算法。

3 改进的小波变换域中的自适应均衡算法

首先根据式(9)来估计 $\hat{R}_c(n)$:

$$\hat{R}_c(n) = \beta \hat{R}_c(n-1) + (1-\beta)r(n)r^T(n), 0 < \beta < 1 \quad (9)$$

根据文[3]的结论:相关矩阵中元素的大小随着其与对角线距离的增加而呈指数下降,于是在迭代估计到 L 次时,取远小于1的一个值 ϵ ,将 $\hat{R}_c(n)$ 对角线上最大绝对值的 ϵ 倍作为阈值,令 $\hat{R}_c(n)$ 中非角线上绝对值小于阈值的元素置零即估计得 $\hat{R}_c(n)$ 的稀疏结构。在 L 次后,仍按式(9)估计 $\hat{R}_c(n)$,其稀疏结构保持不变。

而对于方程组(8),我们采用预条件共轭梯度法^[7,8]来求解。由于共轭梯度法的收敛速度主要依赖于系数矩阵的条件数,因此需对 $\hat{R}_c(n)$ 作预处理。我们取 $A = \text{diag}(1/\sqrt{r_{11}}, 1/$

$\sqrt{r_{22}}, \dots, 1/\sqrt{r_{NN}})$, 其中 $r_{ii} (i=1 \sim N)$ 是 $\hat{R}_c(n)$ 中对角线上的元素。由于 $\hat{R}_c(n)$ 中元素的大小随着其与对角线距离的增加而呈指数下降^[3], 因此 $A\hat{R}_cA = \hat{R}_c$ 是近似于单位阵的矩阵,其条件数也近似较小。可见 A 选作为预处理矩阵是较为方便和可行的,这样我们就可以将方程组(8)转变为方程组(10):

$$\hat{R}_c(n)\hat{h}(n) = -2e(n)\hat{r}(n) \quad (10)$$

$$\text{其中 } \hat{h}(n) = A^{-1}\hat{g}(n), \hat{r}(n) = Ar(n) \quad (11)$$

$$\text{即下降方向 } \hat{g}(n) \text{ 为: } \hat{g}(n) = A\hat{h}(n) \quad (12)$$

由于 \hat{R}_c 由于是条件数较小的稀疏阵,因此用共轭梯度法求解的迭代次数为 $O(\sqrt{N})$ 数量级;而 $\hat{R}_c(n)$ 每行约有 $O(\log N)$ 个非零元素^[3], L 很小,则用(9)式估计时约需 $O(N \log N)$ 次运算,于是整个自适应均衡算法的计算量约为 $O(N \log N)$ 数量级。根据以上讨论,我们可以将新算法的步骤归结如下:

- 1) 置初值 $\hat{R}_c(0) = 0$, 设定 ϵ 和 L ;
- 2) 计算式(1)、(2)、(3)及式(9);

(下转第114页)

(上接第53页)

法的改进(图5),具体体现在 Pr-PIM 算法的 grant 阶段,也就是当多个输入端口竞争同一输出端口时,输出端口采用一种什么样的策略来决定优胜者,以达到对各输入端口的请求较为公平的效果。以输出端口1为例,grant 部分的裁决按如下步骤执行:

(1) 设初值 $1 \Rightarrow H1$, 相当于初始化时,将逻辑令牌先赋予第一个端口。

(2) 判断竞争者的优先级别,若级别最高信元只有一个时,可直接向该输入端口发出 grant 信息,转(5)。

(3) 若级别最高信元为多端口,则判断竞争端口中有无 $H1$ 号端口,若有,则向 $H1$ 号输入端口发送 grant 信息;若无,则让 $1 + H1 \bmod N \Rightarrow H1$, 相当于逻辑令牌按序下传,而后继续寻找有无与新的 $H1$ 值匹配的竞争输入端口,按此法,直到找到为止。

(4) 逻辑令牌轮询至下一端口: $1 + H1 \bmod N \Rightarrow H1$ 。

(5) 结束该轮裁决。当下一时隙到来时转(2)。

从以上算法可以看出,当出现多输入端口同一优先级信元产生竞争时,竞争优胜者的获胜优先级马上由最高降为最低,同时把下一轮的获胜最高优先权让给下一个端口,在这一问题的处理上,该策略充分体现了一种公平的原则,也从一定程度缓解了“饥饿”现象的发生。同时从硬件实现的角度考虑,由于消除竞争采用的是逻辑令牌轮询的预定方式,从硬件实现上比 PIM 采用的随机方式要简便,在简化硬件的前提下提高了竞争仲裁速度。

4.2 动态优先级权重参数的设置

当 ATM 交换机各输入端口的四优先级队列有相同的到达率,即各业务为均匀分布时,以上算法的处理方法是合理的,但若 ATM 各类业务出现了非均匀性,如果还沿用原来的算法,势必会降低相关业务的 QoS 特性。具体解释是:由以上分析我们知道,各端口优先级队列的划分依据是各类业务的时延及时延抖动特性,在均匀业务的前提下,各端口同一优先级队列的到达率是一致的,所以在出现同优先级信元竞争时

采用的是随机的(Pr-PIM)或兼顾公平原则的基于轮询的优化算法。但在非均匀业务的前提下,各端口同一优先级队列的到达率不相等时,高到达率队列可能由于没有得到及时的服务产生信元丢失。为此,对同一优先级的信元进行竞争仲裁时应加一权重因子(≥ 1),该权重因子的获取应依据当前队长是否处于限定队长边界而定。以上 Pr-PIM 及基于轮询的优化算法对同优先级 HOL 信元的处理方法相当于各队列权重因子皆为1的特例。

4.3 基于滑动窗口的动态迭代轮数调整

参照图3我们知道:随着交换机端口数的增加,经一轮(4次)迭代后,仍有一部分端口未得到匹配;同时由图4可以看到,要让所有端口均得到匹配,应进一步增加迭代次数。为此,我们采用滑动窗口法,突破 HOL 信元的限制,完成第一轮迭代并发现有未匹配端口后,随即对 HOL 后的信元进行下一轮迭代,直至完成所有端口的匹配。

结束语 HOL 阻塞严重影响了输入缓存 ATM 交换机的吞吐率性能,本文在 ATM 交换机四优先级输入缓存的前提下,运用综合治理的方法消除队头阻塞,进一步满足 ATM 交换机的 QoS 需求。

参考文献

- 1 Chen M, Georganas N D, Yang O W W. Fast algorithm for multi-channel/port traffic assignment. IEEE ICC'94, 1994. 96~100
- 2 McKeown N, Anantharam V, Walrand J. Achieving 100% throughput in an inputqueued switch. IEEE INFOCOM'96, 1996. 296~302
- 3 Brown T X, Lin K H. Neural network design of a banyan network controller. IEEE J Sel Areas Commun, 1990, 8:1289~1298
- 4 Nong Ge, et al. Analysis of Nonblocking ATM Switches with Multiple Input Queues[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(1): 60~63
- 5 McKeown N. iSLIP: A Scheduling Algorithm for Input-Queued Switches[J]. IEEE Transactions on Networking, 1999, 7(2)

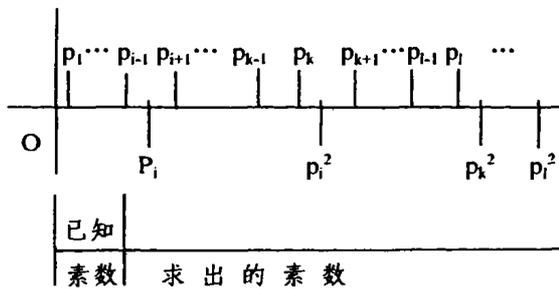
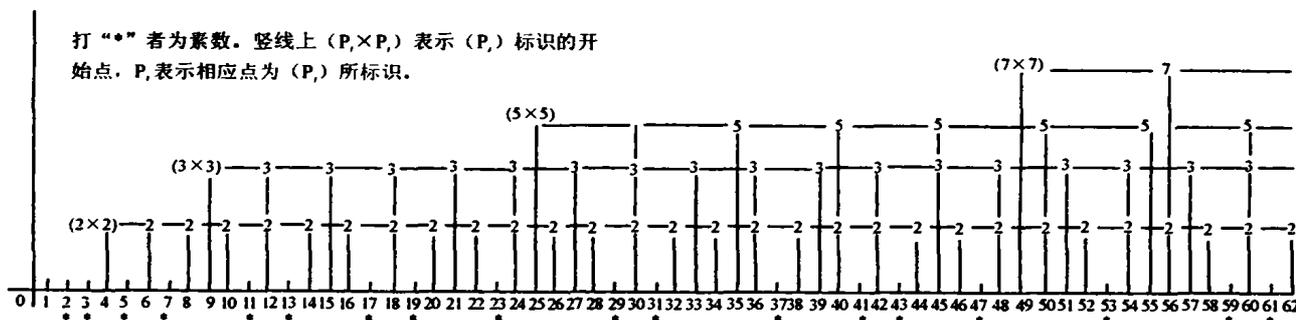


图2

至此,在求素数、合数的问题上,除了众所周知的用定义来识别的原始方法、操作型的 Eratosthenes 筛法外,还有“合数标识法”。很可能还有其余的方法,但估计是未曾公开或鲜为人知的。

结论 可以设想在计算机配合下,完全可以用合数标识



附图1 合数标识平面图

(上接第100页)

3) 当 $n < L$ 时,根据式(4)更新权矢量;

4) 当 $n = L$ 时,根据 $\hat{R}_c(n)$ 及 ϵ 通过阈值得 $\hat{R}_c(n)$ 的稀疏结构;

5) 当 $n \geq L$ 时,用共轭梯度法解线性方程组(10),由(12)式求得下降方向 $\hat{g}(n)$ 并根据式(7)更新权矢量。

整个算法开始用 LMS 算法,从时刻起才采用 Newton-LMS 算法。尽管如此,也难以保证 $\hat{R}_c(n)$ 的正定性,为此,在实际中对 $\hat{R}_c(n)$ 还要作对角加载处理,以保证算法的稳定性。

4 计算机仿真

我们在仿真中采用的非最小相位线性信道模型为 $x(n) = 0.3482s(n) + 0.8704s(n-1) + 0.3482s(n-2)$, $s(n)$ 为随机发送的 ± 1 信号,信噪比为 20dB。均衡器长度 N 为 20, ϵ 取 0.005, $L = 60$ 。独立运行 30 次后得到图 2 所示的文[4]和本文两种算法的学习曲线,从中可以看出,本文算法的收敛性能要好一些。

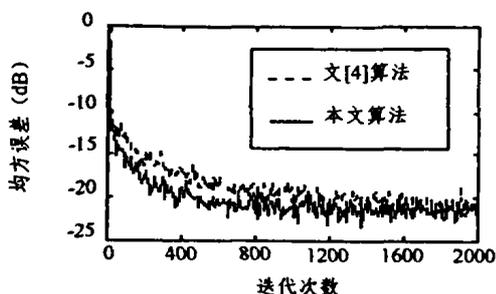


图2 两种均衡算法的学习曲线图

法编制一张迄今还没有的 $[0, N]$ 内自然数分析表。它标记了 $[0, N]$ 内的合数、素数,以便于随时调用。正因为合数标识法用简单、机械、重复的“打记号”方式代替了繁琐的计算,计算机就可用最简单的程序进行大素数的寻找,使寻找大素数的速度极大地提高。总之,寻找大素数的合数标识法具有简易、快速、准确的特点。因而,它为数字签名中寻找所需的素数提供了一种较好的手段。

参考文献

- 1 王长策. 合数标识论. 贵州人民出版社, 1999
- 2 [美] Bruce Schneier, 著. 吴世忠, 祝世雄, 张文政, 等译. 应用密码学. 机械工业出版社, 2001
- 3 徐快, 段云所, 陈钟. 数字签名与数字证书. 网络安全技术与应用, 2001
- 4 张方国, 王育民. 欧洲 21 世纪密码候选标准. 网络安全技术与应用, 2001

结论 本文主要讨论的是如何利用区间小波变换的特点来提高自适应线性均衡器的收敛速度, 以及如何更好地得到稀疏矩阵和减少计算量问题, 仿真表明该算法是有效的。同时也可将这一算法运用到判决反馈均衡和盲均衡中去, 此时需考虑结合这两种均衡算法本身的特点。另外, 对阈值的选取还需作进一步的研究, 比如可以把小波分解的次数等因素考虑进去, 形成更好的阈值方法, 使得相关阵的估计更快更准确一些。

参考文献

- 1 Lee J C. Performance of transform-domain LMS adaptive digital filters. IEEE Trans on ASSP, 1986, 34(3): 499~510
- 2 Erdol N, Basbug F. Wavelet transform based adaptive filters: analysis and new results. IEEE Trans on SP, 1996, 44(9): 2163~2171
- 3 Tewfik A H, Kim M. Fast positive definite linear system solvers. IEEE Trans on SP, 1994, 42(3): 572~585
- 4 Hosur S, Tewfik A H. Wavelet transform domain adaptive filtering. IEEE Trans on SP, 1997, 45(3): 617~630
- 5 Daubechies I. Two recent results on wavelets: Wavelet bases for the interval, and biorthogonal wavelets diagonalizing the derivative operator. Recent Advances in Wavelet Analysis. Academic Press, Inc, 1994, 237~258
- 6 Cohen A, Daubechies I, Vial P. Wavelets on the interval and fast transforms. Appl Comput Harmonic Anal, 1993, 1(1): 54~81
- 7 张贤达. 信号处理中的线性代数. 北京: 科学出版社, 1997
- 8 胡家驷. 线性代数方程组的迭代解法. 北京: 科学出版社, 1997