

上行传输中的迭代串音抑制算法

李有明, 沈 微, 张敬燕, 徐铁峰

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江宁波 315211)

摘 要: 串音是影响 VDSL2 传输速率的主要因素. 针对上行传输中的串音干扰, 利用矩阵分裂技巧和迭代原理, 提出了一类低复杂度, 高效的迭代串音抑制算法. 同时根据串音信道传输矩阵的对角占优和列对角占优特性, 重点研究了对角分裂迭代算法和上三角分裂迭代算法. 根据上行传输的信道传输矩阵特点可以推断, 基于上三角分裂的迭代算法性能最优. 新算法通过逐次迭代使得性能逼近置零算法, 而优于一阶逼近算法, 且其一步迭代的运算量与一阶逼近算法相当. 基于实测数据的计算机仿真结果验证了新算法的有效性.

关键词: 第二代甚高速数字用户线; 串音抑制; 迭代算法; 矩阵分裂

中图分类号: TN914.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 08-1941-04

Iterative Crosstalk Cancellation Algorithm for Upstream Transmission

LI You-ming, SHEN Wei, ZHANG Jing-yan, XU Tie-feng

(Institute of Communication Technology, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: Crosstalk is the major limiting issue in VDSL2 system. A class of low complexity and effective iterative crosstalk cancellation algorithms based on matrix splitting and iterative theory are proposed for VDSL2 upstream transmission. Two special iterative algorithms based on diagonal matrix splitting and up triangular matrix splitting are discussed, as the two splitting inspired from using the channel matrix property of diagonal dominant and column wise diagonal dominant respectively. These results reveal that the iterative method based on up triangular matrix splitting is superior to other iterative algorithms, and its performance approaches zero forcing algorithm, but the complexity in each iteration step is almost the same as first order algorithm. Computer simulation results based on measured data verify the efficiency of the new proposed method.

Key words: VDSL2; crosstalk cancellation; iterative algorithm; matrix splitting

1 引言

光纤到户是宽带有线接入网的最终发展方向. 然而在广泛推广面临许多困难的情况下, 市场将逐步采用“光进铜退”的思想, 即光纤到大楼, 到小区, 到路边等, 然后通过铜双绞线接入用户. VDSL2 被认为是消除最后一公里瓶颈的理想 xDSL 技术, 它使用 30MHz 带宽, 能实现双向对称的 100Mbit/s 高速数据传送^[1], 因此是目前国内外研究的热点课题.

串音是影响 VDSL2 性能的最主要因素. 根据传输方向不同可分为远端串音 (FEXT) 和近端串音 (NEXT). 在 DSL 系统中通常上下行方向的传输采用不同频段来避免 NEXT 的影响. 但由于传输距离较短, FEXT 的影响变得十分严重, 通常比噪声强 10-15dB 左右, 是影响 VDSL2 数据传输速率, 距离和质量的最主要因素^[2,3].

目前串音抑制算法主要有置零 (Zero-forcing; ZF) 算

法^[4]和一阶逼近 (First order; FO) 算法^[5]等. 置零算法的主要运算量来自矩阵求逆. 对于 VDSL2 系统, 基于 DMT 的调制将 30MHz 的带宽分割成一个个子载频, 共计 4000 多个. 若一个铅包电缆中有 50-100 对铜线, 由此形成的巨大运算量使该算法实际应用有困难. 一阶逼近算法的主要思想是将信道传输矩阵分裂为对角阵和非对角元素形成的矩阵之和, 根据信道传输矩阵的对角占优性和指数展开式, 提出一阶逆矩阵的逼近方法. 利用此逼近结果提出运算简单的串音抑制算法, 但其性能损失较大.

本文首次提出了一种有效的迭代串音抑制算法. 其基本思想是: 将串音信道传输矩阵分裂成两部分, 由此形成一类迭代串音抑制算法. 由于上行传输方向对应的串音信道传输矩阵具有列对角占优性. 由此推断, 基于上三角分裂的迭代算法性能优于其它算法. 此算法通过逐次迭代使其在性能上逼近置零算法, 且其一步迭代的

运算量与一阶逼近算法相当. 基于实测数据的计算机仿真结果验证了新算法的有效性.

2 信道模型

假设在同一铅包电缆中有 M 对铜线, 采用 DMT 调制将信道分成 N 个子载频. 则在第 k 个子载频上的输出信号为^[1,3]

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k, k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中 $\mathbf{x}_k = [x_k^1, \dots, x_k^M]^T$ 表示在第 k 个子载频上的发送符号向量, $\mathbf{y}_k = [y_k^1, \dots, y_k^M]^T$ 表示在第 k 个载频上的接收符号向量. \mathbf{H}_k 为 $M \times M$ 的信道传递矩阵, $h_k^{n,m} \triangleq [\mathbf{H}_k]_{n,m}$ 表示第 m 条线对第 n 条线形成的串音, $h_k^{n,n} \triangleq [\mathbf{H}_k]_{n,n}$ 表示第 n 个衰落信道的脉冲响应. $\mathbf{n}_k = [n_k^1, \dots, n_k^M]^T$ 表示在第 k 个子载频上的加性高斯噪声向量, 且 $\epsilon\{\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^H\} = \sigma_k^2 \mathbf{I}_M$. 我们定义信号的发送功率为 $s_k^n = \epsilon\{|x_k^n|^2\}$, 子载频间隔为 Δ_f , 符号速率为 f_s .

在上行传输中, 接收调制解调器位于同一个局端, 所以信道矩阵 \mathbf{H}_k 中每一列元素中的对角线元素的模远大于该列中的非对角线元素的模, 即 $|h_k^{m,m}| \gg |h_k^{n,m}|$, $\forall m \neq n$. 因此称 DSL 上行信道矩阵具有列对角占优性.

用户 n 在第 k 个子载波上所能承载的实际比特数计算如下

$$b_k^n = \min \left(b_{\max}, \left\lfloor \log_2 \left(1 + \frac{|h_k^{n,n}|^2 s_k^n}{\Gamma \left(\sum_{m=1, m \neq n}^M |h_k^{n,m}|^2 s_k^m + \sigma_k^n \right)} \right) \right\rfloor \right) \quad (2)$$

其中 b_{\max} 为实际能加载的最大比特数, 一般为 15. Γ 为信噪比差额, 它是一个关于编码增益, 噪声容限和目标误码率的函数.

则每个用户的数据传输速率为

$$R_n = f_s \sum_{k=1}^N b_k^n, \quad n = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

3 典型的上行传输串音抑制算法

上行传输是指从用户端向局端或光网络单元的传输. 由于局端拥有不同线路的信道信息, 因此在接收端通过设计接收滤波器 \mathbf{W}_k 抑制来自不同线路的串音.

3.1 置零(ZF)算法^[4]

对于置零算法, 第 k 个子载波上的抑制串音的接收滤波器为 $\mathbf{W}_k^{ZF} = \mathbf{H}_k^{-1}$, $k = 1, 2, \dots, N$ (4)

通过滤波后的输出信号为

$$\tilde{\mathbf{x}}_k = \mathbf{x}_k + \mathbf{H}_k^{-1} \mathbf{n}_k, k = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

由于上行传输 DSL 传输信道矩阵具有很强的列对角占优性, 所以置零算法对噪声功率的放大不明显, 因此该算法性能接近理想情况. 但其主要缺点是运算量大, 复杂度高.

3.2 一阶(FO)逼近算法^[5]

对于一阶逼近算法, 第 k 个子载波上的抑制串音的接收滤波器为

$$\mathbf{W}_k^{FO} = (\mathbf{I} - \mathbf{D}_k^{-1} \mathbf{E}_k) \mathbf{D}_k^{-1}, k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

其中 \mathbf{D}_k 为对角元素矩阵, 即 $\mathbf{D}_k = \text{diag}(\mathbf{H}_k)$, 因此可得 \mathbf{E}_k 的值为

$$\mathbf{E}_k = \mathbf{H}_k - \mathbf{D}_k \quad (7)$$

通过滤波后的输出信号为

$$\tilde{\mathbf{x}}_k = \mathbf{x}_k - \mathbf{D}_k^{-1} \mathbf{E}_k \mathbf{D}_k^{-1} \mathbf{E}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{W}_k^{FO} \mathbf{n}_k \quad \forall k \quad (8)$$

由于对角矩阵求逆的运算量很小, 所以一阶逼近算法在复杂度上有很大的改善, 但其性能有明显的损失.

4 基于矩阵分裂的迭代串音抑制算法

本节具体分析了迭代串音抑制算法. 首先给出了迭代算法的一般形式, 然后根据串音信道传输矩阵的特点, 提出了两种不同的迭代串音抑制算法, 并对这两种算法的复杂度和性能进行了分析.

4.1 迭代算法的一般形式

串音是影响 VDSL2 性能的最主要因素. 如果作为多用户检测问题来分析, 常用算法是 ZF 算法, 其解对应于求解如下的线性方程组

$$\mathbf{H}_k \mathbf{x}_k = \mathbf{y}_k, \quad k = 1, \dots, N \quad (9)$$

如果有如下的矩阵分裂方式

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{A}_k + \mathbf{B}_k, \quad k = 1, \dots, N \quad (10)$$

则求解(9)可转化为如下的等价形式

$$\mathbf{x}_k = -\mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{B}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{y}_k \quad \forall k \quad (11)$$

有了(11)所定义的不动点方程, 可定义如下的迭代算法 $\mathbf{x}_k^{(i+1)} = -\mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{B}_k \mathbf{x}_k^{(i)} + \mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{y}_k \quad \forall k$ (12) 若令 $\mathbf{C}_k = -\mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{B}_k$, 上式迭代方法收敛的充要条件为谱半径 $\rho(\mathbf{C}_k) < 1$; 其中 $\rho(\mathbf{C}_k) = \max_{1 \leq i \leq M} |\lambda_i(\mathbf{C}_k)|$, λ_i 是矩阵 \mathbf{C}_k 的特征值, 并且谱半径 ρ 越小, 收敛速度越快.

将式(1)带入式(12)可以得到

$$\tilde{\mathbf{x}}_k = \mathbf{x}_k^{(i+1)} = \mathbf{x}_k - \mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{B}_k (\mathbf{x}_k^{(i)} - \mathbf{x}_k) + \mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{n}_k \quad \forall k \quad (13)$$

根据上式可以计算加载的比特数, 此时用户 n 在第 k 个子载波上所能承载的实际比特数为

$$b_k^n = \min \left(b_{\max}, \left\lfloor \log_2 \left(1 + \frac{s_k^n}{\Gamma \left(\sum_{m=1}^M |C_k(n, m)|^2 \sigma_{\sigma, k}^m + \sum_{m=1}^M |A_k^{-1}(n, m)|^2 \sigma_k^m \right)} \right) \right\rfloor \right) \quad (14)$$

其中 $C_k^{n,m}$ 为矩阵 \mathbf{C}_k 的第 n 行 m 列的元素, 同理 $A_k^{-1}(n, m)$ 表示矩阵 \mathbf{A}_k^{-1} 的第 n 行 m 列元素. 另外, $\sigma_{\sigma, k}^n \triangleq \epsilon\{|x_k^{(i), n} - x_k^n|^2\}$

根据式(12)可以得到迭代算法实现的原理图如图 1 所示.

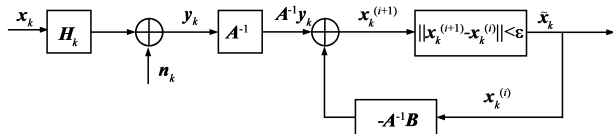


图1 上行传输迭代算法原理图

在实现该算法时可以不需要如式(12)那样求矩阵的逆,而是通过求线性方程组的解得到.特殊的分裂方法使求解线性方程组的运算量很小,这正是下文要研究的重点.

4.2 两种不同的迭代算法

根据信道传输矩阵的对角占优特性和列对角占有特性,本节分别提出了对角分裂迭代算法和上三角分裂迭代算法,并对这两种算法的性能进行了分析比较.

4.2.1 对角分裂迭代算法

对于对角分裂的迭代算法, H_k 分裂为对角元素矩阵和非对角元素矩阵.即

$$A_k = D_k = \text{diag}(H_k), B_k = E_k = H_k - D_k \quad (15)$$

由于 DSL 系统的信道传输矩阵具有对角元素远远大于非对角元素的特点,所以该算法的谱半径 $\rho < 1$,即此迭代方法满足收敛条件.另外,因为 A_k 为对角矩阵,所以求以 A_k 为系数的线性方程组或求 A_k 的逆运算量均为 $o(M)$,因此该算法的计算复杂度和一阶逼近算法的计算复杂度相当,但是通过增加迭代次数使得性能优于一阶逼近算法.

4.2.2 上三角分裂迭代算法

对于上三角迭代算法, H_k 分裂为如下两个矩阵之和:

$$A_k = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ 0 & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & h_{MM} \end{pmatrix}$$
$$B_k = H_k - A_k = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ h_{21} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \cdots & h_{MM-1} & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

将得到的 A_k 和 B_k 的值带入式(12),就形成了基于上三角分裂的迭代串音抑制算法,算法在具体实现时,并不要求 A_k 的逆.根据 A_k 的上三角阵的特殊结构,可以使用回代的方法计算.其具体过程如下

为求第 $(i + 1)$ 步 $x_k^{(i+1)}$ 的值,将式(12)做如下等价变换

$$A_k x_k^{(i+1)} = T_k, \quad k = 1, \cdots, N \quad (17)$$

其中

$$T_k = -B_k x_k^{(i)} + y_k, \quad k = 1, \cdots, N \quad (18)$$

因为在上式中的 $B_k, x_k^{(i)}$ 和 y_k 都是已知道的,所以

$T_k = [t_k(1), \cdots, t_k(M)]^T$ 是一个 $M \times 1$ 的常矩阵.把式(17)展开可以得到

$$\begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ 0 & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & h_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k^{(i+1)}(1) \\ x_k^{(i+1)}(2) \\ \vdots \\ x_k^{(i+1)}(M) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_k(1) \\ t_k(2) \\ \vdots \\ t_k(M) \end{pmatrix} \quad (19)$$

由此形成如下的回代解

$$\begin{cases} x_k^{(i+1)}(p) = t_k(p)/h_{pp}, p = M \\ x_k^{(i+1)}(p) = (t_k(p) - \sum_{q=p+1}^M h_{pq} x_k^{(i+1)}(q))/h_{pp}, \\ p = M - 1, M - 2, \cdots, 1 \end{cases} \quad (20)$$

根据 DSL 上行传输的信道特性,可以肯定该算法也严格满足迭代法收敛的充要条件.另外,该算法中的解线性方程组的运算量为 $o(M^2)$,因此大大降低了算法的计算复杂度.表 1 分别列出了各算法的计算复杂度,其中 p 为迭代次数.

由于上行传输的信道传输矩阵的列对角占优性,上三角分裂中的 A_k 包含了 H_k 中主要的串音,由此推断,基于上三角分裂的迭代算法具有更好的收敛速度和性能.第 4 节的仿真结果验证了上述分析的合理性.

表 1 四种算法的计算复杂度比较

算法	置零算法	一阶逼近算法	对角分裂迭代算法	上三角分裂迭代算法
复杂度	$o(M^3)$	$o(M^2)$	$o(pM^2)$	$o(pM^2)$

5 仿真结果比较和分析

本节仿真结果基于 France Telecomm (法国电信研发部)提供的实测数据.这组数据分别由长度为 590m, 300m, 150m, 75m 组成,每种长度的信道衰落和串音各有 28×28 组数据组成.频率由 0.01MHz 到 30MHz.在仿真中,编码增益 (Coding gain) = 3.8dB, 信噪比裕量 (SNR margin) = 6dB,这时信噪比差额 (SNR gap) $\Gamma = 12$ dB.子载频间隔和符号速率分别为 8.625KHz 和 8KHz,目标误码率为 10^{-7} ,高斯噪声的功率为 -140dBm, VDSL2 频谱模板为 -60dBm. VDSL2 上行信道的频带为 [3.75MHz 5.2MHz], [8.5MHz 12MHz], [18.1MHz 30MHz].

本小节给出了非等长线的仿真结果,网络拓扑结构如图 2 所示.图 3 比较了置零算法,一阶逼近算法,对角分裂迭代算法等算法在不同长度时的传输速率.而图 4 比较了置零算法,一阶逼近算法,上三角分裂迭代算法等算法在不同长度时的传输速率.从仿真结果可以发现:对于对角分裂迭代算法,当迭代次数大于等于 3 的时候,其性能优于一阶逼近算法,且算法的性能随着迭代次数的增加而不断逼近置零算法;上三角分裂迭代算法的性能要比对角分裂迭代算法好很多,当迭

代次数大于等于 2 的时候,此算法的性能和置零算法基本相同.

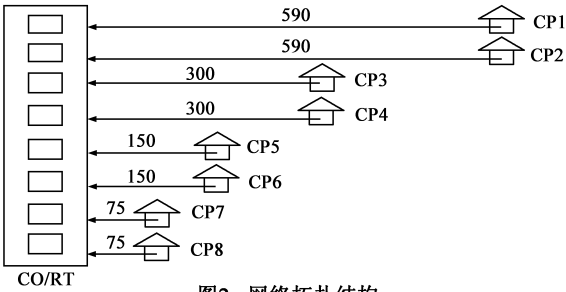


图2 网络拓扑结构

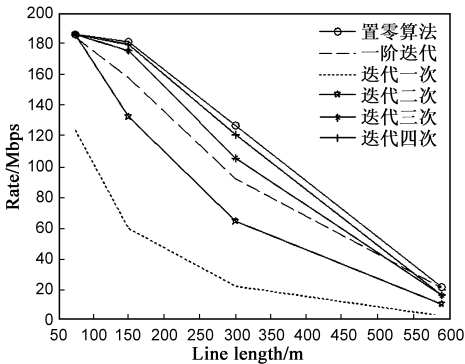


图3 对角分裂迭代算法的仿真结果

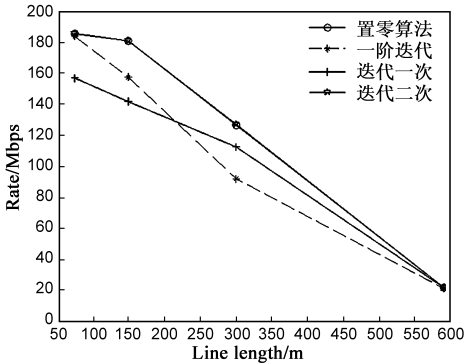


图4 上三角分裂迭代算法的仿真结果

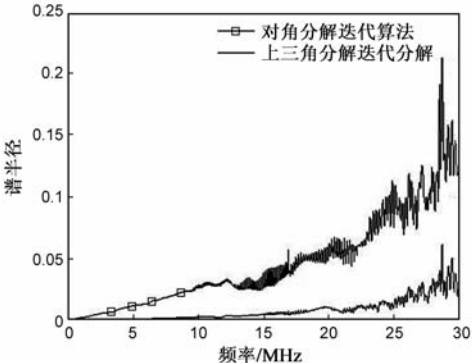


图5 两种算法的收敛速度对比图

图 5 给出了两种迭代算法随频率改变时的谱半径曲线.根据迭代算法的收敛条件,迭代矩阵的谱半径 $\rho(A_k^{-1}B_k)$ 越小,收敛速度越快.图 5 显示,基于上三角

分裂迭代矩阵的谱半径明显小于基于对角分裂算法的谱半径,特别是在高频部分.因此上三角分裂逼近算法收敛速度要远远快于对角分裂迭代算法.

6 结论

基于矩阵分裂技巧和迭代原理,本文重点研究了基于对角分裂和上三角分裂的迭代串音抑制算法.通过分析串音信道传输矩阵列对角占优特点及基于实测数据的仿真结果表明,上三角分裂通过两次迭代就能在性能上逼近置零算法,而优于一阶逼近算法,且其一步迭代的运算量与一阶逼近算法相当.

参考文献:

[1] E Karipidis, N Sidiropoulos, A Leshem et al. Crosstalk models for short VDSL2 lines from measured 30 MHz data[J]. Eurasip Journal on Applied Signal Processing. Special issues for digital subscriber lines. V. 2006. 1 – 9.

[2] E Karipidis, N Sidiropoulos, A Leshem et al. Experimental evaluation of capacity statistics for short VDSL loop[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(7): 1119 – 1122.

[3] J Cioffi, Lee, M Mohseni, Amir Leshem et al. GDSL (Gigabit DSL) [S]. T1E1.4/2003 – 487R1, standard committees contribution.

[4] Raphael Cendrillon et al. A near-optimal linear crosstalk canceller for VDSL[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(8): 3136 – 3146.

[5] Amir Leshem, Li Youming, A low complexity linear precoding technique for multichannel VDSL[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(11): 5527 – 5534.

作者简介:



李有明 男, 陕西扶风人, 宁波大学通信技术研究教授. 主要从事无线和有线宽带通信技术研究, 内容包括干扰抑制, 动态频谱分配, MI-MO-OFDM 技术, 超宽带技术等. E-mail: liyouming@nbu.edu.cn



沈微 女, 浙江嘉善人, 宁波大学硕士研究生, 主要从事 DSL 中的串音抑制, 动态频谱管理等的研究.

张敬燕 女, 浙江东阳人, 宁波大学硕士研究生, 主要从事多载波调制技术中同步算法研究及实现.