

自适应线谱干扰抵消器的性能及其 非维纳滤波现象

江 峰 许 枫

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

1999 年 9 月 29 日收到

摘要 自适应滤波器的性能通常采用维纳滤波器理论来分析, 本文指出自适应线谱干扰抵消器不符合经典解的现象。在对权系数的动态分析中, 揭示了非维纳滤波效应产生的机理。

关键词 维纳滤波理论, 自适应线谱干扰抵消器

Performance of the adaptive line canceller and its “non-Wiener” phenomenon

Jiang Feng Xu Feng

(Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract It is well known that the performance of adaptive noise canceller is typically analyzed in terms of the Wiener filter theory. In this paper, study on the adaptive line canceller shows a solution that falls outside the scope of the classical theory. Investigation on dynamic behavior of the weights brings forth insight into “non-Wiener” phenomenon.

Key words Wiener filter theory, Adaptive line canceller

1 引言

自适应线谱干扰抵消器 (ALC—Adaptive Line Canceller) 的研究工作普遍集中于双正交权 V 型自适应 Notch 滤波器, 如抵消 50Hz 交流电源干扰。文献 [1] 中采用了验算法, 文献 [2] 利用状态空间模型给出稳态分析结果。但上述模型仅仅适合于抵消已知频率线谱的双正交权线谱抵消器。

低频被动声纳的本地线谱的合适模型是未知频率的多频线谱群, 干扰抵消器的工程实用

结构是抽头延时线 (TDL — Tapped Delay Line) 结构。许多自适应噪声抵消器 (ANC—Adaptive Noise Canceller) 的文献中理论分析结果指出: TDL 结构的自适应滤波器的稳态解非常接近定常维纳滤波器的性能。所以不少作者采用 Wiener-Hoff 方程导出声纳平台自噪声自适应抵消器的稳态解。

对于连续谱的自适应抵消, 维纳解是合适的分析方法。但是在低频段内 (比如拖线阵和舷侧阵声纳的使用频段), 声纳平台自噪声中连续谱分量较弱, 线谱占主要地位。本文实验

研究中发现: 线谱干扰的自适应抵消, 存在许多不符合经典解的现象。称之为非维纳滤波效应。

下文将给出上述现象的理论阐述。内容如下: (1) 理论分析, 给出 ALC 时变滤波效应和传递函数以及陷波带宽的表达式; (2) 提出问题, 指出经典解的局限性; (3) 分析问题, 在对权系数的动态分析中, 揭示非维纳滤波效应产生的机理。

2 ALC 的传递函数法分析^[3]

2.1 ALC 的数学表示

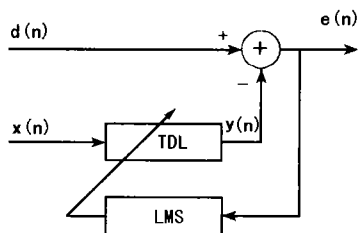


图 1 自适应线谱干扰抵消器的模型

图 1 中给出单通道线谱干扰抵消器的原理图, 对于 TDL 结构的滤波器, 滤波输出: $y(n) = \underline{W}^T(n)\underline{X}(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n)x_i(n)$; 误差输出: $e(n) = d(n) - y(n)$; LMS 学习算法: $\underline{W}(n+1) = \underline{W}(n) + 2\mu e(n)\underline{X}(n)$ 。其中: i 为延时节序号, N 为通道延时节数目; n 为迭代序号, μ 为学习步长; $\underline{W}(n)$ 代表权矢量, $\underline{X}(n)$ 代表参考通道输入矢量, $d(n)$ 代表主通道输入。

若参考通道输入单频余弦信号, 第 n 次迭代, 第 i 延时节上输入信号表示为

$$\begin{aligned} x_i(n) &= A \cos(2\pi f_r(n-i)/f_s + \psi_0) \\ &= A \cos(n\theta + \psi_i) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\theta = 2\pi f_r/f_s$, $\psi_i = \psi_0 - i\theta$, A 、 f_r 、 ψ_0 、 f_s 分别表示参考信号的幅值、频率、初相以及采样频率。

应用声学

2.2 时变滤波效应

采用 $Y(z)$, $E(z)$, $D(z)$ 以及 $W_i(z)$ 分别代表序列 $y(n)$, $e(n)$, $d(n)$, $w_i(n)$ 的 Z 变换。由上述 ALC 的数学表示, 给出滤波输出序列 $y(n)$ 的 Z 变换^[3]:

$$\begin{aligned} Y(z) &= \frac{N\mu A^2}{2} E(z) \\ &\quad \cdot [U(ze^{-j\theta}) + U(ze^{j\theta})] \\ &\quad + \frac{\mu N A^2}{2} \beta(\theta, N) V(z) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $V(z) = U(ze^{-j\theta})E(ze^{-j2\theta})e^{j(2\psi_0-(N-1)\theta)} + U(ze^{j\theta})E(ze^{j2\theta})e^{-j(2\psi_0-(N-1)\theta)}$

$$U(z) = 1/(z-1)$$

$$\begin{aligned} \beta(\theta, N) &= \frac{\sin N\theta}{N \sin \theta} \\ &= \frac{\sin(N2\pi f_r/f_s)}{N \sin(2\pi f_r/f_s)} \end{aligned}$$

上式表明:

(1) 滤波输出 $Y(z)$ 包含了时变部分 $Y_{TV}(z) = \frac{\mu N A^2}{2} \beta(\theta, N) V(z)$ 和时不变部分 $Y_{TI}(z) = \frac{N\mu A^2}{2} E(z)[U(ze^{-j\theta}) + U(ze^{j\theta})]$ 。

(2) 时变部分 $Y_{TV}(z)$ 表达式表示在 $Y(z)$ 中存在对 $E(z)$ 的频移变换。

(3) $\beta(\theta, N)$ 代表 $Y_{TI}(z)$ 和 $Y_{TV}(z)$ 两部分的相对强度, 选择较大的 N 值, 或者 f_r/f_s 在 0.2-0.4 之间时, $\beta(\theta, N)$ 较小, 可以忽略时变滤波器的影响。

2.3 传递函数和陷波带宽

上述时不变条件下, 误差输出 $e(n)$ 相对于主输入 $d(n)$ 的传递函数:

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{E(z)}{D(z)} \\ &= \frac{(z^2 - 2z \cos \theta + 1)}{z^2 - 2z \cos \theta (1 - \frac{N\mu A^2}{2}) + 1 - N\mu A^2} \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式给出的 N 个权数目 TDL 结构的 ALC 的传递函数的表达式表明: (1) ALC 等效为 IIR 结构滤波器。 (2) 零、极点分布情况与双权 V 型 Notch 滤波器一致, 其零、极点的数目和权

数目无关。(3) 传递函数在频率 f_r 处形成陷波效应, 由极、零点的几何关系可以得出陷波带宽^[3]: $BW_{-3dB} = \frac{N\mu A^2 f_s}{2\pi}$ 。(4) ALC 滤波器带宽与权数目成正比。

3 “非维纳”滤波特性的阐述和分析

3.1 经典维纳解的局限性

众多文献中指出: 自适应滤波器是经典维纳滤波器的一种实现, 其两个重要应用分别是 ALC 和自适应线谱增强 (ALE—Adaptive Line Enhancer)^[3-5]。理论分析和硬件仿真表明: TDL 结构的 ALE 在稳态时等效为 FIR 结构滤波器, 滤波带宽与权数目成反比^[3]。本文注意到: 同样采用 TDL 结构的 ALE 和 ALC 滤波器带宽与权数目的关系却相反。

另外, Wiener-Hoff 解关于 ALC 的最佳权矢量是 $\underline{W}_{opt} = \underline{R}_{XX}^{-1} \underline{P}_{dx}$, 其中: $\underline{R}_{XX}$ 是参考通道信号的自相关矩阵, $\underline{P}_{dx}$ 是 $d(n)$ 与 $X(n)$ 的互相关向量。本文注意如下两种情况: (1) 主通道输入为白噪声, 参考通道输入为正弦信号; (2) 主通道输入和参考通道输入均为正弦信号, 但是两者的频率存在差值。在上述两种情况下, 互相关系数为 0, 最佳权矢量 $w_{i,opt} = 0$; $i = 0, 1, \dots, N-1$; ALC 如何出现陷波效应? 本文以第二种情况为例, 对 ALC 的权序列作如下分析, 进一步讨论 ALC 的输入和输出对应的关系, 以揭示 ALC 的机理。

3.2 权序列的分析

图 2 以及图 3 给出 TDL 结构 ALC 的瞬时冲激响应图形, (a)、(b)、(c) 代表不同的迭代时间对应的冲激响应, 迭代序号在图中示出, 每 10 次迭代给出一组冲激响应图形。图 1 和图 2 中实验参数如下: 自适应滤波器的学习步长 $\mu=0.0005$, 抽头延时节数目 $N = 64$; 参考通道输入信号幅度 $A=1$, 参考通道信号频率 $f_r=50\text{Hz}$ 。图 2 中主通道输入信号频率 $f_d=50\text{Hz}$, 图 3 中 $f_d=51\text{Hz}$ 。

当 $f_r = f_d$ 时, 每个权的时间序列在稳态

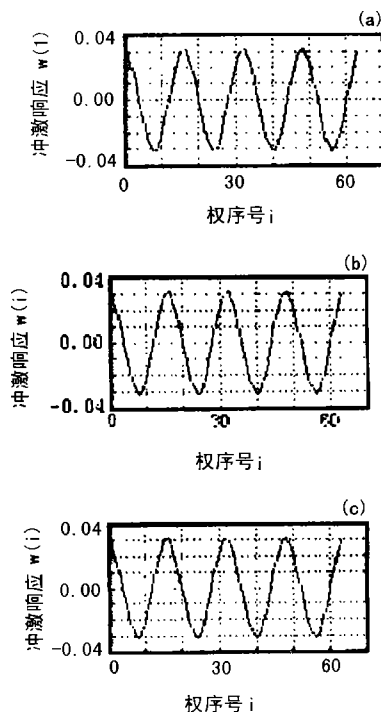


图 2 64 权 TDL 的瞬时冲激响应图形 ($f_r = f_d$)

(a) 迭代序号 $n = n_0$ (b) 迭代序号 $n = n_0 + 10$

(c) 迭代序号 $n = n_0 + 20$

为恒定值。抽头延时节相邻权之间的相位差为 $\theta = 2\pi f_r / f_s$ 。更为复杂的是 f_d 和 f_r 不等的情况。为讨论问题的方便起见, 令 $\psi_i = 0$, 由上述 ALC 的数学表示, 给出权序列 $w_i(n)$ 的 Z 变换表示^[3]:

$$\begin{aligned} W_i(z) &= A\mu U(z)[e^{-ji\theta} \\ &\quad + e^{ji\theta} E(z e^{-j\theta})] \\ &= A\mu U(z)F(z) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $F(z) = e^{-ji\theta} E(z e^{j\theta}) + e^{ji\theta} E(z e^{-j\theta})$, $U(z) = 1/(z-1)$ 代表低通滤波。

选择较大的 N 值, 或者 f_r/f_s 在 0.2-0.4 之间时, $\beta(\theta, N)$ 较小。当 $\beta(\theta, N)$ 较小时, 对 $F(z)$ 的零、极点分析表明: 每个权的时间序列都包含了 f_r 和 f_d 的和频及差频分量。当 f_d 和 f_s 靠近时, 经过 $U(z)$ 滤波, 差频分量的强度将显著强于和频分量。即每个权的时间序列主要表现为差频分量的正弦序列。图 3 给出

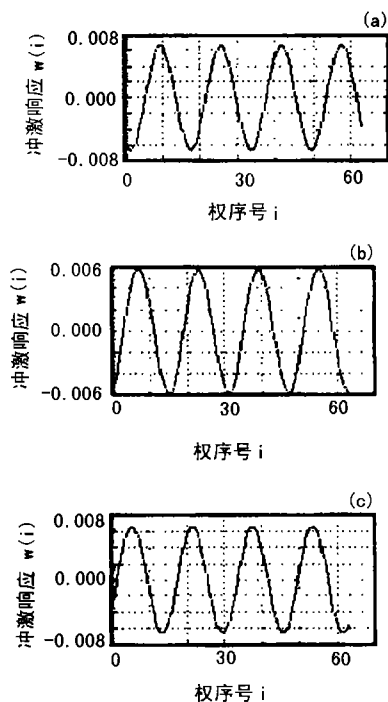


图3 64 权 TDL 的瞬时冲激响应图形 ($f_r < f_d$)

(a) 迭代序号 $n = n_0$ (b) 迭代序号 $n = n_0 + 10$
(c) 迭代序号 $n = n_0 + 20$

$f_d > f_r$ 情况下的瞬时冲激响应图形。某一迭代时刻, 冲激响应曲线为正弦波形, 抽头延时相邻权之间的相位差仍为 $\theta = 2\pi f_r / f_s$ 。迭代时, 冲激响应图形的正弦波波峰移动, 当 $f_d < f_r$ 时右移, 当 $f_d > f_r$ 时, 左移。

换言之, f_r 和 f_d 相近时, 权值收敛到一组动态解, 组成非平稳的最小均方解。权值以

差频“翻滚”, 此时自适应滤波器相当于一个调制器, 将参考信号频率转换到主输入通道的频率。这种异常于经典维纳解的滤波行为, 可称之为“非维纳”滤波特性。

4 结语

(1) 利用传递函数法建立了 ALC 的理论框架。指出时变滤波效应是 ALC 的重要现象。

(2) 对自适应噪声抵消中关于连续谱和线谱干扰抵消的经典统一框架提出质疑, 同时对 ALC 和 ALE 经典统一框架提出质疑。

(3) 对滤波器权序列的分析, 进一步分析了 ALC 的输入和输出对应的关系, 揭示了非维纳滤波特性现象产生的机理。

(4) 指出经典维纳解在处理 ALC 问题上的局限性, 文 [3] 中曾讨论了经典维纳滤波理论在处理线谱增强问题上的局限性。

参 考 文 献

- 1 惠俊英, 蔡平, 马晓民. 声学学报, 1991, 16(1): 19-23.
- 2 Conolly S. Proceedings of IEEE. 1986, 74(1): 219-222.
- 3 江峰. 舷侧阵声纳信号处理技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学博士学位论文. 1999.
- 4 Windrow B. Proc. IEEE. 63(3): 1692-1716.
- 5 Treichler J R. The spectral line enhance—the concept, an implementation and an Application. Ph.D. Dissertation, Stanford University. 1987, MAY.

第五届全国光声热会议在上海召开

由中国声学学会检测声学分会、上海市声学学会、同济大学声学研究所联合举办的第五届全国光声光热会议, 于 9 月 12 日至 9 月 14 日在上海同济大学召开。南京大学、中国科技大学、青岛海洋大学、武汉大学、苏州大学、同济大学和中科院上海硅酸盐所等国内著名学府和研究所共 28 名学者专家出席了会议。同济大学陈成澍校长和上海市声学学会副理事长陈思忠教授出席了开幕式并讲了话。中科院院士张淑应用声学

仪教授和工程院院士李同保教授分别在会上作了“光声光热研究进展近况”和“单泡声致发光现象及实验装置”的特邀报告, 并有 23 篇学术论文作了大会报告。会议代表对会议中呈现的学术气氛非常满意, 并一致同意 2002 年在中国科技大学举办第六届全国光声光热学术会议。

(同济大学声学研究所 钱梦驷)