

迭代频域反卷积滤波器的多参数优化

刘明亮,高 剑,王 伶

(北京工业大学电子信息与控制工程学院,北京 100022)

摘 要: 本文首先介绍了几种成功应用于现代时域测量和计量学中的迭代频域反卷积滤波器,包括 Guillaume-Nahman (G-N) 反卷积滤波器、最佳补偿反卷积滤波器和综合反卷积滤波器;着重介绍了迭代频域反卷积滤波器的多参数优化原理并进行了必要的公式推导,给出了更为合理的反卷积滤波器传输函数表达式.然后,对这些反卷积滤波器进行了计算机仿真,并给出了每种反卷积滤波器的滤波效果与设定值相比较的滤形图.最后,对这些反卷积滤波器的性能进行了评述和比较,结果表明无论是波形还是标准偏差,多参数反卷积滤波器的效果最好.

关键词: 反卷积滤波器;多参数优化;性能评述

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2001) 12-1661-04

Multiparameter Optimization of Iterative Frequency-Domain Deconvolution Filters

LIU Ming-liang, GAO jian, WANG ling

(Collage of Electronic & Control Engineering of Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

Abstract: Some iterative frequency-domain deconvolution filters applied to modern time-domain measurement and metrology successfully are presented at first, such as Guillaume-Nahman deconvolution filter, optimal compensation deconvolution filter and synthetic deconvolution filter; Multiparameter optimization reason of iterative frequency domain deconvolution filter is presented specifically and formula is deduced necessarily. The more reasonable expression of transmission function of deconvolution filter is given. And then, computer simulations for these deconvolution filters are performed and the waveform figures are given to compare the filtering effect of each deconvolution filter with the initialization. Finally, performance of these filters is evaluated and compared and the result illustrates that multiparameter deconvolution filter is the best one in waveform and variance.

Key words: deconvolution filter; multiparameter optimization; performance evaluation

1 引言

利用反卷积可以重构失真信号的波形,因此,引起了人们的极大关注.在现代时域测量和宽带系统以及 ps 脉冲校准中,反卷积有着重要的应用^[1~3].但是,由于反卷积对噪声或测量误差十分敏感,常常使反卷积的解不稳定,即产生病态反卷积问题.为解决有噪声或测量误差引起的病态反卷积问题,人们通过不懈的努力找到了许多比较成功的办法.在迭代频域反卷积方法中,人们主要使用各种滤波器来解决反卷积病态问题.最初,将反卷积应用于时域测量的是 NBS 的 N. S. Nahman,他与 M. E. Guillaume 一起提出了“Guillaume-Nahman”反卷积滤波器^[4].与此同时,S. M. Riad 和 R. B. Stafford 共同提出一种称作频域最佳反卷积滤波器^[5].B. Parruck 和 S. M. Riad 对上述两种滤波器进行了比较研究^[6],他们指出,“Guillaume-Nahman”反卷积滤波器具有较高的精度,适于对低通信号(系统)进行反卷积滤波;而频域最佳反卷积滤波器具有自适应性,能更有效地滤除尖峰信号,适于对带通信号(系统)进行反

卷积滤波. T. Dhaene, L. Martens 和 D. D. Zutter 构造了一个价格函数,并根据价格函数最小设计出一个新的反卷积滤波器,称为综合反卷积滤波器^[7].这种反卷积滤波器的性能综合了上述两种滤波器的特点. T. Dabózi 和 I. Kollá 为了使反卷积结果更精确,构造了一个新的价格函数,从而使滤波参数增加到三个^[8].为了叙述方便,将这种滤波器称做多参数反卷积滤波器.

为了确定反卷积滤波器的最佳滤波参数,人们提出了一些反卷积滤波准则.这主要有“Parruck-Riad”准则^[9]、“Benniar-Riad”准则^[10]和“扩展的 Benniar-Riad”准则^[11].

本文首先回顾了三种传统的迭代反卷积滤波器.在此基础上重点介绍了多参数反卷积滤波器,并推导出更为合理的传输函数表达式.在相同信噪比下,对各种反卷积滤波器的滤波效果进行了比较研究和计算机仿真,给出了各自的滤波效果与设定值相比较的波形图,并列表给出各种反卷积滤波器的标准偏差.

收稿日期:2001-12-03;修回日期:2001-06-28

基金项目:北京市教委资助项目

2 传统的迭代频域反卷积滤波器

设线性时不变系统的单位抽样响应为 $h(n)$, 其输入和输出分别为 $x(n)$ 和 $y(n)$, 相应的 DFT 分别 $H(k)$, $X(k)$ 和 $Y(k)$. 但是, 由于测量误差的影响, 实际测得的信号却是 $x_m(n)$ 和 $y_m(n)$, 其 DFT 为 $X_m(k)$ 和 $Y_m(k)$. 通过数字反卷积, 由 $x_m(n)$ 或 $X_m(k)$ 和 $y_m(n)$ 或 $Y_m(k)$ 直接得到的系统抽样响应是不稳定的, 甚至无法辨识. 因此, 必须设计一个反卷积滤波器, 以便得到一个最佳估值:

$$h_{est}(n) = [y_m(n) (1/ *) x_m(n)] * f(n) \quad (1)$$

其中, 符号“ $1/ *$ ”表示反卷积运算, $f(n)$ 为反卷积滤波器的单位抽样响应; 相应的频域表达式为

$$H_{est}(k) = [Y_m(k) / X_m(k)] \cdot F(k) = H_m(k) \cdot F(k) \quad (2)$$

其中, $F(k)$ 为反卷积滤波器的传输参数.

2.1 Guillaume Nahman (G N) 反卷积滤波器

这种滤波器的设计原理是基于误差功率最小和波形最平滑^[4,6], 其滤波器的传输函数为:

$$F(k) = \frac{|X_m(k)|^2}{|X_m(k)|^2 + \left(\frac{k}{N}\right)^4} \quad (3)$$

其中, 参数 $\frac{k}{N}$ 的取值决定波形平滑的程度.

2.2 最佳补偿反卷积滤波器

S. M. Riad 和 R. B. Stafford 依据误差能量和噪声约束能量最小的准则, 设计出最佳补偿反卷积滤波器^[5,6], 其传输函数为

$$F(k) = \frac{|X_m(k)|^2}{|X_m(k)|^2 + \frac{1}{2^p}} \quad (4)$$

其中, $\frac{1}{2^p}$ 的数值影响对噪声过滤的能力.

2.3 综合反卷积滤波器

T. Dhaene, L. Martens 和 D. D. Zutter 根据反卷积结果具有最平滑的波形, 反卷积误差最小和不希望的尖峰值最小的原则, 构造了一个价格函数^[7], 当使价格函数最小时, 可求得该滤波器的传输函数 $F(f)$ 的表达式:

$$F(f) = \frac{|X_m(f)|^2}{|X_m(f)|^2 + \frac{1}{2^p}} \quad (5)$$

其中, p 为正偶数, 通常选 $p=2$, 相应的离散形式为:

$$F(K) = \frac{|X_m(k)|^2}{|X_m(k)|^2 + \left(\frac{2k}{N}\right)^{2p}} \quad (6)$$

3 迭代频域反卷积滤波器的多参数优化

T. Dab ózi 和 I. Kóll á 提出了一种新的价格函数, 使滤波参数增加到三个, 可以获得更为精确的反卷积结果^[8]. 不过, 他们的研究是针对重构输入信号波形的, 不便于直接用于求取系统单位抽样响应的反卷积, 尤其是不能用误差能量来确定最佳滤波参数的数值. 借用他们的学术思想, 推导出多参数反卷积滤波的传输函数.

为了使反卷积结果更为精确(波形更平滑), 多引用一个滤波参数. 为此, 构造一个价格函数:

$$P = P_e + P_p + P_{s1} + P_{s2}$$

$$= y_m(n) - y_{est}(n) \quad ^2 + \quad h_{est}(n) \quad ^2 + \quad \nabla^2 h_{est} \quad ^2 + \quad \nabla^4 h_{est}(n) \quad ^2 \quad (7)$$

其中, P_e 表示误差功率, P_p 表示噪声约束功率, P_{s1} 和 P_{s2} 均表示平滑功率; 符号 \dots 表示 l_2 式的范数, ∇^2 表示后向二阶差分算子, ∇^4 表示后向四阶差分算子. $y_{est}(n)$ 可由估值 $h_{est}(n)$ 得到, 即:

$$y_{est}(n) = x_m(n) * h_{est}(n) = x_m(n) * h(n) * f(n) \quad (8)$$

考虑到 $F(k)$ 为实数, 并应用帕塞瓦定理, 则有:

$$P_e = \sum_{k=0}^{N-1} |Y_m(k) - Y_{est}(k)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |Y_m(k)|^2 [1 - 2F(k) + F^2(k)] \quad (9)$$

$$P_p = \sum_{k=0}^{N-1} |h_{est}(k)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |H_m(k)|^2 F^2(k) \quad (10)$$

$$P_{s1} = \sum_{k=0}^{N-1} |\nabla^2 h_{est}(k)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |H_m(k)|^2 |C_2(k)|^2 F^2(k) \quad (11)$$

其中, $C_2(k)$ 为二阶差分算子 ∇^2 的 DFT, 可以求得

$$C_2(k) = 1 - 2e^{-jk2/N} + e^{-jk4/N} \\ P_{s2} = \sum_{k=0}^{N-1} |\nabla^4 h_{est}(k)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |H_m(k)|^2 |C_4(k)|^2 F^2(k) \quad (12)$$

其中, $C_4(k)$ 为四阶差分算子 ∇^4 的 DFT, 可以证明 $C_4(k) = C_2^2(k)$, 将式(9)至式(12)代入式(7), 得

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |Y_m(k)|^2 \left\{ 1 - 2F(k) + F_2(k) + \frac{F^2(k)}{|X_m(k)|^2} + \frac{|C_2(k)|^2 F^2(k)}{|X_m(k)|^2} + \frac{|C_2^2(k)|^2 F^2(k)}{|X_m(k)|^2} \right\} \quad (13)$$

当价格函数最小时, 即由 $\frac{\partial P}{\partial F(k)} = 0$, 得出

$$F(k) = \frac{|X_m(k)|^2}{|X_m(k)|^2 + \frac{1}{2^p} + |C_2(k)|^2 + |C_2^2(k)|^2} \quad (14)$$

式(14)表示在价格函数最小条件下的最佳反卷积滤波器的传输函数.

滤波参数 k , $\frac{1}{2^p}$ 和 $\frac{2k}{N}$ 的数值可按文献[8]给出的方法进行确定. 但这时必须已知系统的单位抽样响应和所叠加的噪声, 显然这是不现实的. 我们认为, 更为科学的方法是文献[10]和[11]所介绍的方法.

4 计算机仿真

用伪随机序列模拟由测量误差引起的噪声, 噪声采用正态分布形式. 在相同信噪比条件下, 分别按式(3), (4), (6)和(14)进行反卷积滤波, 并对各种滤波器进行了分析比较. 具体滤波参数按文献[10]和[11]给出的方法进行确定, 这里只给出了最佳滤波参数数值的选取图, 如图1所示. 图1(a)和图1(b)表示一个参数的情况; 图1(c)表示两个参数的情况, 为了更加醒目, 我们将参数选取范围另图()画出; 图1(d)表示三个参数的情况. 与一个参数或两个参数的滤波器一样, 在确定多参数反卷积滤波器的最佳滤波参数时, 也是将系统函数

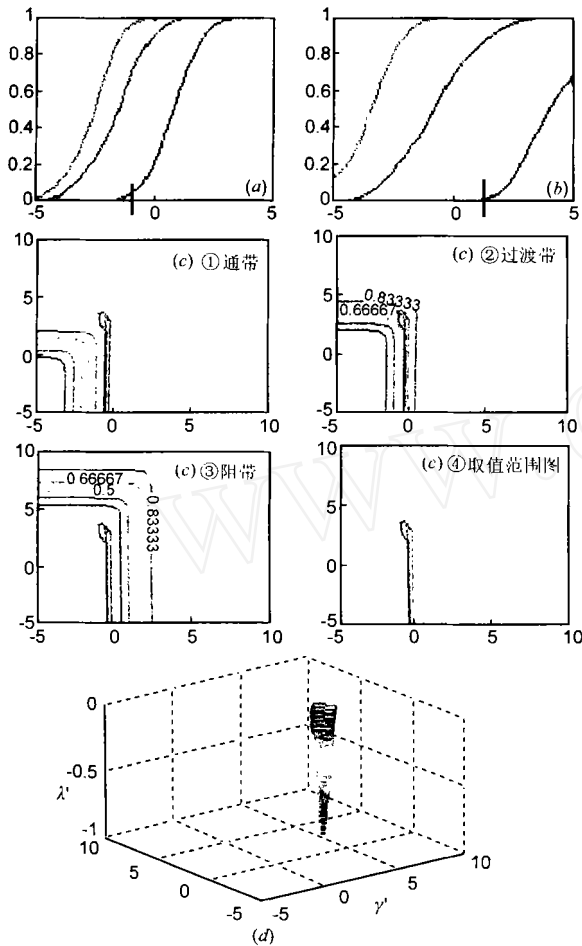


图 1 各反卷积滤波器的多参数选取图。(a)最佳补偿滤波器(横坐标为 \lg , 参数 取值在图中标注的附近);(b)为 G_N 滤波器(横坐标为 \lg , 参数 取值在图中标注的附近);(c)综合滤波器(横坐标为 $\lg(\gamma / \text{init})$, 纵坐标为 $\lg(\lambda / \text{init})$, 其中参数初始值按文献[7]的方法求得, $\text{init} = 6.965 \times 10^{-5}$, $\text{init} = 0.275$);(d)多参数滤波器参数取值范围图。(其中, $\gamma = \lg(\gamma / \text{init})$, $\lambda = \lg(\lambda / \text{init})$, $\beta = \lg(\beta / \text{init})$)

分成三个频段:通带、过渡带和阻带。但是,这时归一化标准偏差与 γ 、 λ 和 β 三个参数的关系必须用一个四维图形表示。为此,仿照两个参数的情况,将滤波参数的取值范围从三个频段分离出的方法(见图 1(c)),只给出一个参数选取范围图。它是一个三维图形(立体等高线图)。各参数的初值仿照文献[7]提供的公式进行计算。即:

$$\text{init} = \frac{0.2 |X_{\min}|^2}{(2 f_H)^2}, \quad \text{init} = \frac{0.2 |X_{\min}|^2}{(2 f_H)^4}, \quad \text{init} = 0.2 |X_{\min}|^2$$

式中, $|X_{\min}|$ 表示通带中 $|X_m(k)|$ 的最小值, f_H 表示通带宽度。

图 2 给出了输入端信号 $x_m(n)$ 的信噪比为 25dB, 输出端信号 $y_m(n)$ 的信噪比为 30dB 条件下, 上述各反卷积滤波器的结果; 为便于比较, 各图中用虚线表示设定的 $h(n)$, 图 2(a) 表示直接反卷积后得到的 $h(n)$; 图 2(b) 表示最佳补偿反卷积滤波器的结果 ($\gamma = 0.39$); 图 2(c) 表示 Guilleme-Nahman 反

卷积滤波器的结果 ($\gamma = 31.6$); 图 2(d) 表示综合反卷积滤波器的结果 ($\gamma = 2.21 \times 10^{-5}$, $\beta = 0.87$); 图 2(e) 表示多参数反卷积滤波器的结果 ($\gamma = 3.16$, $\beta = 10^{-5}$, $\lambda = 0.1$)。

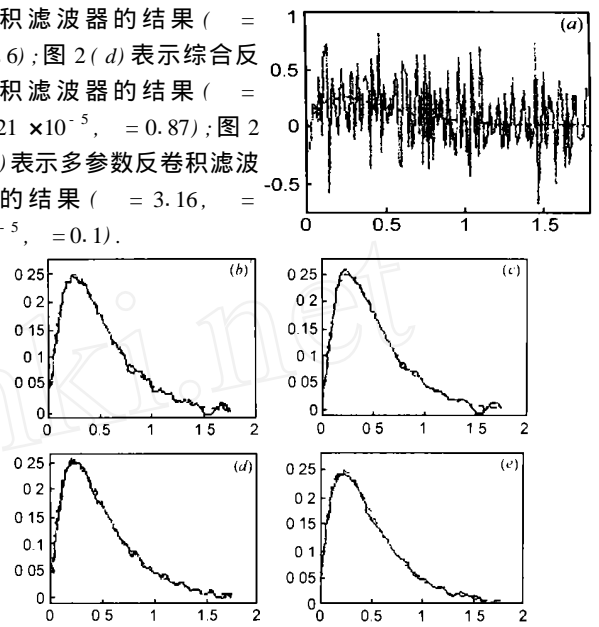


图 2 各种反卷积滤波器的滤波结果

表 1 给出了在上述信噪比条件下的各种反卷积滤波器的标准偏差。由图 2(b)~(e) 和表 1 可以看出, 一个参数的反卷积滤波结果在信号尾部的误差较大, 这是合乎尽量少损失信息的准则的; 而两个参数和三个参数的反卷积结果, 无论在信号首部还是尾部都差不多, 即总体滤波效果都较好。值得指出的是, 综合(两参数)反卷积滤波的偏差有可能反而比 G_N 反卷积滤波稍大一些, 这是由于它要兼顾总的滤波效果而使信号各段尽量平滑, 导致信号的信息有所损失而致。多参数反卷积滤波器较好地解决了反卷积精度和平滑性的问题。因此, 无论是波形还是标准偏差, 多参数反卷积滤波器的效果最好。

表 1

	最佳补偿滤波器	G_N 滤波器	综合滤波器	多参数滤波器
标准偏差	0.0081	0.0066	0.0070	0.0054

5 结束语

迭代频域反卷积滤波器的功能是滤除或尽可能地减少噪声或测量误差对反卷积结果的影响。通过不断的研究, 已经成功地设计出应用在现代时域测量和计量学中的各种迭代频域反卷积滤波器。如果想获得尽量好的反卷积结果, 就要增加滤波参数的个数。但是, 当用文献[10]和[11]的方法确定多个最佳滤波参数时, 计算量也随之增加。

参考文献:

[1] Gans W L. Dynamic characterization of waveform recorders and oscilloscopes using pulse standards [J]. IEEE Trans., 1990, IM-39(6): 952-957.
 [2] Verspecht J, Rush K. Individual characterization of broad-band sampling oscilloscope with a Nose-to-Nose calibration procedure [J]. IEEE Trans., 1994, IM-43(2): 347-354.
 [3] Deyst J P, Paulter G, Dab ózi T, Souders T M. A fast Pulse oscilloscope

- calibration system [J]. IEEE Trans. ,1998 ,IM-47(5) :1037 - 1041.
- [4] Nahman N S ,Guillaume M E. Deconvolution of time-domain waveform , in the present of noise [Z]. NBS Tech Note 1047 ,NBS ,Boulder ,CO , Oct. 1981 .
- [5] Riad S M ,Stafford R B. Impulse response evolution using frequency domain optimal compensation deconvolution [C]. in Proc. 23rd Midwest Symp. on Circuits and System ,Toledo ,OH ,1980 :521 - 525 .
- [6] Parruck B ,Riad S M. Study and performed evaluation of two iterative frequency-domain deconvolution techniques [J]. IEEE Trans. ,1984 ,IM-33(2) :281 - 287 .
- [7] Dhaence T ,Martens L ,Zutter D D. Generalized iterative frequency-domain deconvolution technique [C]. in IEEE Instrum. Meas. Technol. conf. Irvin ,Orange country ,CA ,May 18-20 ,1993 ,93CH3291-0 :85 - 87 .
- [8] Dab ázi T ,Köll á I. Multiparameter optimization of inverse filtering algorithms [J]. IEEE Trans. ,1996 ,IM-45(2) :417 - 421 .
- [9] Parruck B ,Riad S M. An optimization criterion for iterative deconvolution [J]. IEEE Trans. ,1983 ,IM-32(3) :137 - 140 .
- [10] Bennia A ,Riad S M. An optimization technique for iterative frequency-domain deconvolution [J]. IEEE Trans. 1990 ,IM-39(4) :358 - 362 .
- [11] Dhaene T ,Martens L ,Zutter D D. Extended Vennia-Riad criterion for iterative frequency-domain deconvolution [J]. IEEE Trans. ,1994 ,IM-43(2) :176 - 180 .

作者简介:



刘明亮 男. 1943 年生于哈尔滨市. 北京工业大学电子信息与控制工程学院教授. 1967 年毕业于大连理工大学无线电技术专业, 1994 ~ 1995 年为日本东京工业大学高级访问学者. 合作出书七本, 其中一本被评为全国优秀教材; 完成的科研项目多次受到部级奖励, 已发表论文三十多篇, 目前主要研究方向有: 数字信号处理的理论、方法, 以及数字反卷积及其应用.



高 剑 男. 1977 年生于北京市. 2001 年毕业于北京工业大学计算机学院, 被免试推荐为北京工业大学硕士研究生, 并获北京工业大学优秀毕业生. 现从事信号处理方面研究.

王 伶 女. 1974 年生于山东潍坊. 1995 年毕业于北京印刷学院电子工程系, 2000 年进入北京工业大学计算机学院攻读研究生. 现从事信号处理方面研究.