

超声多普勒血流信号平均频移估计的仿真研究

张榆锋, 马华红, 余琦, 陈建华, 施心陵

(云南大学信息学院电子工程系, 昆明 650091)



摘要: 提出了基于 Matching Pursuit 分解的超声多普勒血流信号平均频移估计方法。通过对合成信号的分析比较, 确定了最佳估计性能的相关参数。基于优化的参数对不同噪声水平的 100 例仿真多普勒信号进行分析并计算估计的与理论的平均频移的均方误差, 得到基于 Matching Pursuit 方法的误差比使用传统声谱分析法小。表明该方法对信号瞬时结构的局部具有较好的自适应性, 有效克服了短时傅立叶变换存在的时频分辨率矛盾, 提高了超声多普勒血流信号平均频移估计的准确性。

关键词: 匹配追踪; 超声多普勒; 血流速度; 平均频移

中图分类号: R318.01

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2007) 04-0865-03

Estimation of Doppler Ultrasound Blood Flow Frequency Shift: A Simulation Study

ZHANG Yu-feng, MA Hua-hong, YU Qi, CHEN Jian-hua, SHI Xin-ling

(Electronic Engineering Department, Information School, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: A Doppler blood flow analysis method based on matching pursuit is proposed for extracting intensity-weighted mean frequency (IWMF) waveform. Firstly, the best matching pursuit algorithm and its parameters are selected on the basis of performance with synthetic signals. Then this optimum method is applied to analyze 100 realizations of simulated Doppler blood signal at three different signal-to-noise ratios. The root-mean-square error between the estimated and theoretical mean frequency using this method is smaller than that using the short time Fourier transform. It is shown that because of local adaptivity to transient structure of a signal and high time frequency resolution, this method overcomes the limitation between time and frequency resolution in the short time Fourier transform, and improves the accuracy of estimation for the Doppler blood flow frequency shift greatly.

Key words: matching pursuit; Doppler ultrasound; blood flow velocity; mean frequency shift

引言

超声多普勒技术在临床上用于检测和量化血管内的血流状况是一种重要的方法。血液中运动的红血球细胞等反射的超声波束形成了超声多普勒血流信号。通常通过短时傅立叶变换估计信号的时频分布并进一步提取血流信号的特征参数来评价血流的运动状况^[1]。由于多普勒信号的平均频移(IWMF)与平均血流速度成正比关系, 临床上用于对血流速度和血流量的测量。但短时傅立叶变换估计时频分布时存在着时间频率分辨率不能同时提高的矛盾^[2-3], 因此基于传统短时傅立叶变换估计声谱图来提取血流信号的多普勒平均频移误差较大, 从而导致血流速度估计的精度不是很高。

Matching Pursuit 方法对信号瞬时结构的局部具有较好的自适应性, 对分析非平稳信号具有较好的时频描述和较高的时频分辨率^[4-5], 可以有效克服传统声谱分析法中短时傅立叶变换存在的时频分辨率矛盾, 特别适合分析频带较宽, 频率变化较快的非平稳信号。根据这一特点, 我们使用 Matching Pursuit 算法估计超声多普勒信号的时频分布, 从中

提取出更准确的平均频移。

1 方法原理

1.1 传统短时傅立叶变换的声谱估计

被分析的信号 $x(t)$ 基于传统短时傅立叶变换(STFT)的声谱估计为

$$SPEC(n, k) = |DX_n(k)|^2 \quad (1)$$

其中 $DX_n(k)$ 表示加窗信号 $x(t)w(t-\tau)$ 的离散傅立叶变换^[6]。实验中选择 10ms 的高斯窗($\sigma=3$)分析超声多普勒血流信号以得到最好的时间频率分辨率的折衷效果^[1,3]。

1.2 基于 Matching Pursuit 的时频分解

基于自适应信号分解思想, S.Mallat 等提出了^[4] Matching Pursuit (MP) 算法的实现。其核心是将被分析的信号 $x(t)$ 按能量递减的顺序投影到一个正交的原子函数集 $D = \{g_\gamma\}_{\gamma \in \Gamma}$ 上:

$$f = \sum_{n=0}^m \langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n} + R^{m+1} f \quad (2)$$

则信号的时频分布为:

$$Ef(t, \omega) = \sum_{n=0}^m |\langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle|^2 W_{g_{\gamma_n}}(t, \omega) \quad (3)$$

其中 $W_{g_{\gamma_n}}(t, \omega)$ 对应所选原子 g_{γ_n} 的 Wigner 分布。由于原子集的正交性, 时频分布不含交叉项。S.Mallat 等提出的 MP 算法是基于 Gabor 原子函数集:

收稿日期: 2005-12-15

修回日期: 2006-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(60661002); 云南省自然科学基金(2006F0015M)。

作者简介: 张榆锋(1965-), 男, 云南大理人, 白族, 教授, 研究方向为信号处理、超声医学工程等; 马华红(1979-), 女, 硕士生, 研究方向为生物医学信号处理。

$$g_j = k(\gamma) e^{-\pi((t-u)/s)^2} \sin(2\pi \frac{\omega}{N}(t-u) + \phi) \quad (4)$$

在分解时, 用参数 $s = 2^j, 0 \leq j \leq L$ (信号的长度为 $N = 2^L$) 对 Gabor 函数中的时间、频率和尺度进行离散化生成原子函数集。基于这个原子函数集的 MP 分解在本文中称做 MPGD 方法, 用软件 Wavbox 来实现。

1.3 基于改进 Matching Pursuit 方法的时频估计

MPGD 方法估计的时频分布不是最优的, 原因在于 Gabor 函数中参数离散化的步长过大且固定不变。Durka 提出了一种随机字典的概念^[5]。每次进行 MP 分解前在一个连续范围内随机构建原子函数集。假定信号长度为 N , 用它等分时间、频率、宽度得到相应的间隔 $\Delta u, \Delta \omega$ 和 Δs 。参数 u, ω 和 s 的空间随即被划分为 $(\Pi / N^2) / (\Delta \omega \Delta u \Delta s)$ 多个小块, 并且每一小块尺寸为 $\Delta \omega \times \Delta u \times \Delta s, \omega \in (0, \pi)$ 。在每一个小块的连续范围内随机取函数集中的一个时频原子。所有小块中取得的时频原子构成一个随机字典。基于这个随机字典对信号 $f(t)$ 做 MP 分解, 用式(9)计算对应的时频分布。为了消除统计误差, 对同一信号通常计算 K 次基于不同随机字典的时频分布, 并做集合平均。这个改进的 MP 算法在本文中被成为基于 K 个随机字典的 MPSD 算法。实验中选取 1.5×10^4 的小尺寸字典, 这个字典结构在每一次分解前用 C++ 语言编程实现, 分解后产生原子函数集被导入 MATLAB 后用式(3)计算信号的时频分布。

1.4 平均频移提取

完成对信号的时频估计后, 可以提取基于该时频分布的平均频率

$$\bar{f}(t) = \frac{\int_f P(f, t) f df}{\int_f P(f, t) df} \quad (5)$$

其中 $P(f, t)$ 是信号的时频功率谱。对于超声多普勒信号而言, 该频率也被称为信号的平均频移。

2 仿真实验与结果

2.1 合成信号分析

为了有效地评价各 MP 算法时频分析的性能, 我们对以下合成信号进行分析:

(1) 6 余弦波信号

$$\begin{aligned} s_1(n) = & g_{31,91}(n) \{ \exp[(\frac{n-61}{30})^2] \cos[2(n-31)] \} + \\ & g_{51,111}(n) \{ \exp[(\frac{n-81}{30})^2] \cos[1(n-51)] \} + \\ & g_{81,141}(n) \{ \exp[(\frac{n-111}{30})^2] \cos[0.8(n-81)] \} + \\ & g_{95,175}(n) \{ \exp[(\frac{n-135}{40})^2] \cos[0.6(n-95)] \} + \\ & g_{135,215}(n) \{ \exp[(\frac{n-175}{40})^2] \cos[0.2(n-135)] \} + \\ & g_{175,255}(n) \{ \exp[(\frac{n-215}{40})^2] \cos[0.1(n-175)] \} \end{aligned}$$

$$\text{其中 } g_{l,m}(n) = \begin{cases} 1 & l \leq n \leq m \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

采样频率取 10kHz, 测试信号包含 6 个频率成分: 3183Hz, 1592Hz, 1273Hz, 955Hz, 318Hz, 159Hz。

(2) 调频信号

$$s_2(n) = \begin{cases} \sin(0.625\pi n \sin(0.004\pi n)) & n = 0 \cdots 149 \\ \sin(0.07(n-150)^2) & n = 150 \cdots 255 \end{cases} \quad (7)$$

采样频率取 10kHz, 信号和它对应的频率波形如图 1 所示:

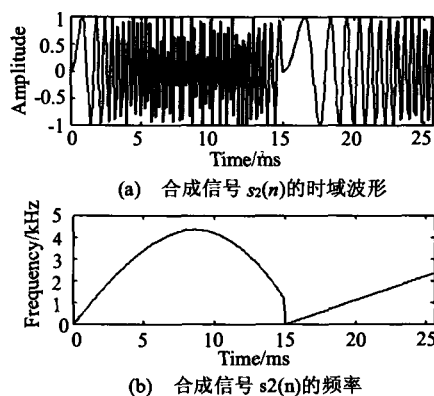


图1 合成信号 $s_2(n)$ 及其频率波形

分别用 STFT ($\sigma = 3$ 的高斯窗)、MPGD、一个随机字典的 MPSD 以及 20 个随机字典的 MPSD 对合成信号 $s_1(n)$ 和 $s_2(n)$ 进行时频估计。图 2 和图 3 分别显示了不同方法的处理结果。

从图 2(a) 可以看出, 基于 STFT 的谱可以较好分辨信号中间隔较大的频率成分, 但是对于两个比较接近的频率成分区分效果不好, 且 STFT 由于在整个时频平面上窗函数的类型和长度是固定的, 因此无论对于高频和低频的成分而言时频分辨率是一样的。从图 2(b) 和图 3(b) 可以看出, MPGD 时频分辨率很差, 在时频平面上很难明确判断具体的时频位置点。图 2(c)(d) 及图 3(c)(d) 是用 MPSD 估计的结果。图 2(c)(d) 中所示的白色小十字表示原子的时频中心点。能量大小与灰度的等级成比例。从图中可以看出基于 MPSD 方法得到最

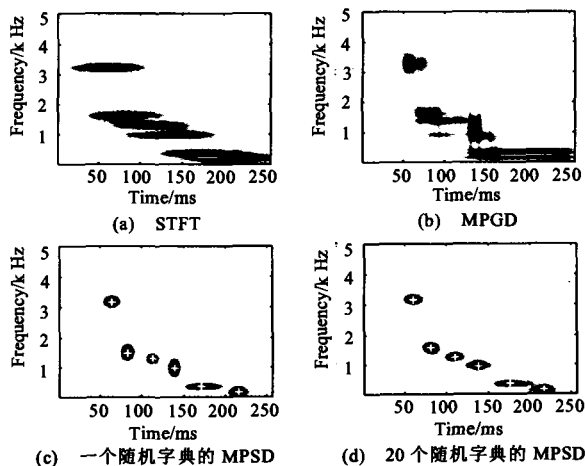
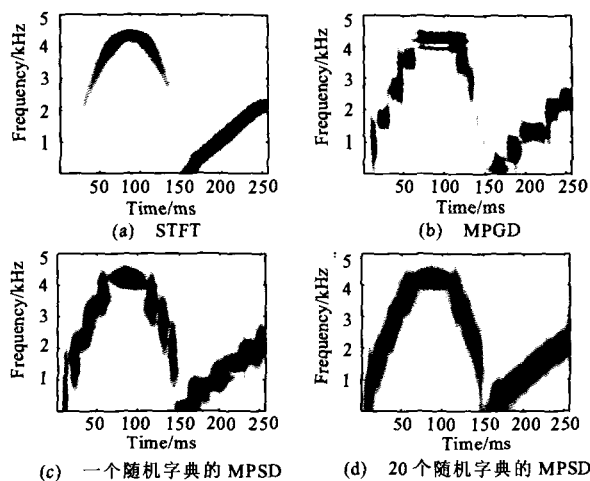


图2 基于不同方法得到的 $s_1(n)$ 的时频分布。

图 3 基于不同方法得到的 $s_2(n)$ 的时频分布

好的时频分辨率。并且更重要的是: 由于 MPSD 算法在每次分解前的字典是随机的, 基于 20 次不同随机字典的 MPSD 得到的平均时频分布的时频分辨率是最高的, 且估计几乎是无偏的。与基于 1 个随机字典的 MPSD 相比, 它能更精确地跟踪频移的快速变化。图 2 和 3 表明, 使用基于多次不同随机字典的 MPSD 对提高时频分布的分辨率比较有效。

2.2 模拟颈动脉多普勒血流信号分析

为了有效的评价 MP 算法在分析超声多普勒血流信号平均频移的性能, 试验中使用 Wang 和 Fish^[7]提出的超声多普勒血流信号模型来模拟颈动脉的单向多普勒信号。模型所使用的多普勒频移和带宽的变化如图 4 所示:

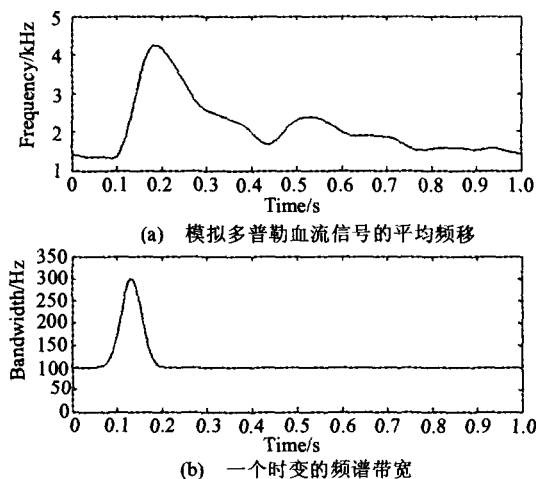
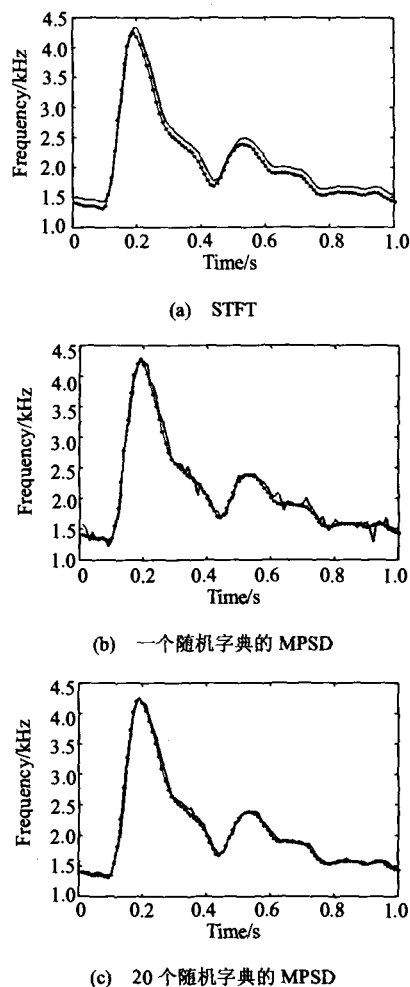


图 4 模拟多普勒血流信号的平均频移和频谱带宽

信号的采样频率取 20kHz, 心动周期为 1000ms。由于临床多普勒信号包含一些潜在的噪声, 我们考虑了在三种信噪比(SNR)下的 IWMF 的估计。通过对多普勒信号加上高斯白噪声来实现 SNR(SNR= ∞ , SNR=20dB, SNR=10dB)。实验中对 100 个独立随机模拟的多普勒信号分别用 STFT、基于一个随机字典的 MPSD 以及 20 个随机字典的 MPSD 提取 IWMF 并计算估计估计值相对于理论的平均频移 $f_m(t)$ 的均方

根误差 NRMSE。图 5 显示了用不同算法估计一个超声多普勒信号的 IWMF 并和图 4(a)所示的理论上平均频移波形做比较。可以看出无论是基于 1 个随机字典的 MPSD 还是基于 20 个不同随机字典的 MPSD 估计的 IWMF 都比用 STFT 估计的结果更接近理论平均频移。从图 5(b)和(c)相比可以看出, 基于 20 个不同随机字典的 MPSD 估计的 IWMF 比基于一个随机字典的 MPSD 更精确, 频率幅度波动也更多, 波形更光滑。因此基于 20 个不同随机字典的 MPSD 估计的 IWMF 不仅更光滑, 而且更接近于理论的平均频移波形。



图中细圈线表示理论的平均频移, 粗实线表示估计的 IWMF
图 5 对一个模拟多普勒信号估计的 IWMF 与理论的平均频移比较。

图 6 显示了从 100 个 SNR 为 20dB 的模拟多普勒信号中用基于不同数量随机字典的 MPSD 估计的 IWMF 的 NRMSE 值。结果表明, 随着所取随机字典数的增多, 估计的 NRMSE 在不断减小。但是当字典数达到 20 个以后, NRMSE 减小变得不十分显著。考虑到 MPSD 算法的复杂性, 选用基于 20 个不同的随机字典的 MPSD 来分析多普勒信号并从中提取 IWMF 波形是比较合适的。

对三种不同信噪比情形下的 100 个模拟信号分别用 STFT 和基于 20 个不同随机字典的 MPSD 估计的 IWMF 计算 NRMSE, 结果如图 7 所示。噪声对用 STFT 和 20 个不同

- [3] Walker T R, Pick R J. Development in the geometric modeling of an ERW pipe skelp [J]. Journal of Materials Processing Technology (S0924-0136), 1991, 25(1): 35-54.
- [4] Liu C, Zhou Y, W Lu. Numerical simulation of roll forming by B-spline finite strip method [J]. Journal of Materials Processing Technology (S0924-0136), 1996, 60(1): 215-218.
- [5] Brunet M, Mguil S, Pol P. Modeling of a roll-forming process with a combined 2D and 3D FEM code [J]. Journal of Materials Processing Technology (S0924-0136), 1998, (1): 213-219.

- [6] 徐树成, 王先进, 刘才. 弹塑性大变形有限元分析槽钢成形过程的位移场和速度场 [J]. 塑性工程学报, 1999, 6(3): 69-73.
- [7] Engineering Technology Associates, Inc.. ETA/DYNAFORM User's Manual [M]. Troy: Engineering Technology Associates, Inc., 2003.
- [8] Damm K. Determination of longitudinal strains in roll forming of standard sections in a multi-stand machine [D]. Inst. For Production Technol., Univ. of Darmstadt, Germany, 1989.
- [9] Altair Engineering, Inc. Altair Hyperstudy Training Manual [M]. Troy: Altair Engineering, Inc., 2005.

(上接第 867 页)

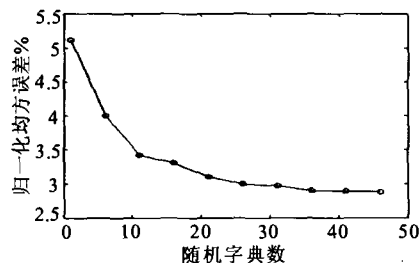


图6 对100个SNR为20 dB的模拟多普勒信号

用基于不同个数随机字典的MPSD估计的IWMF的NRMSE值。随机字典的MPSD算法估计的IWMF的影响几乎是相同的。当噪声增加的时候,两个误差值都随之增加。根据结果所示的平均频移的NRMSE值的大小,基于20个不同随机字典的MPSD算法估计频移具有更好的精度。

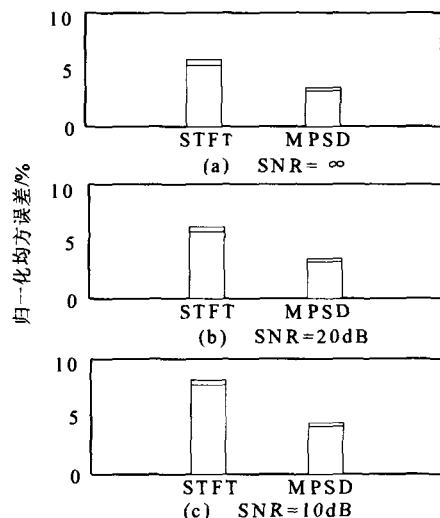


图7 对三种信噪比的100个模拟信号分别用STFT和基于20个不同随机字典的MPSD估计的IWMF的NRMSE

对各算法的运算量而言,用MP方法在每次分解中由于需要在字典内不断匹配最佳的原子函数,因此MP方法的运算量远远超过STFT算法。但就MP算法本身,每次分解其运算量大约需要 $O(N \text{size}(D))^{[4-5]}$,其中 N 为信号长度, D 为字典大小。在实验中,MPGD字典包含 7.5×10^5 个原子函数,

而MPSD字典只有 1.5×10^4 个,因此,即便是基于20个不同随机字典的MPSD方法,其运算量也大约只是MPGD方法的一半。但很显然,随着随机字典数和字典中原子函数的增加,运算量也会随之增加。

3 结论

MP算法由于使用了时频原子构成的字典来分解信号,对信号瞬时结构的局部具有较好的自适应性,基于该算法的时频分布具有较高的时频分辨率,适合分析非平稳信号。基于20个不同随机字典的MPSD能较好地产生无偏的时频描述,能更精确地跟踪频率的变化。这个方法用来估计模拟多普勒血流信号的IWMF,结果表明这种方法比传统的声谱图法能够产生更精确的多普勒频移,但运算量也会显著增加。由于平均频移波形反映了血管内的血流速度,这意味着在血流测量方面,这个方法能提供更精确的医学诊断信息。

参考文献:

- [1] Evans D H, Medicken W N. Doppler Ultrasound: Physics, Instrumentation and Signal Processing [M]. Second Edition, JOHN WILEY & SONS, LTD., 2000.
- [2] 祁锦毅, 高上凯, 杨福生. 关于宽带和窄带超声血流速度测量方法的评价 [J]. 声学学报, 1997, 22(3): 255-267.
- [3] Wang Y, Fish P J. Comparison of Doppler Signal Analysis Techniques for Velocity Waveform, Turbulence and Vortex Measurement: a Simulation Study [J]. Ultrasound Med. Biol. (S0301-5629), 1996, 22(5): 635-649.
- [4] Mallat S G, Zhang Z. Matching Pursuits with Time-Frequency Dictionaries [J]. IEEE Trans. Signal Processing (S1053-587X), 1993, 41(12): 3397-3415.
- [5] Durka P J, Ircha D, Blinowska K J. Stochastic Time-Frequency Dictionaries For Matching Pursuit [J]. IEEE Trans. Signal Processing (S1053-587X), 2001, 49(3): 507-510.
- [6] Zhang Y, Guo Z, Wang W, HE S, LEE T, LOEW M. A Comparison of the Wavelet and Short-Time Fourier Transforms for Doppler Spectral Analysis [J]. Med. Eng. Phys. (S1350-4533), 2003, 25(10): 547-557.
- [7] Wang Y, Fish P J. Arterial Doppler Signal Simulation by Time Domain Processing [J]. Eur. J. Ultrasound. (S0929-8266), 1996, 3(1): 71-81.