

利用脊的特征进行信号盲分离

张晓冬, 王 桥, 吴乐南

(东南大学无线电工程系, 江苏南京 210096)

摘 要: 本文研究了一种新的盲信号分离方法, 利用信号在时频变换域上的一些形态特征进行信号分量的分离和重构. 稳定位相法的理论表明, 渐近信号在连续小波变换域上的分布呈现明显的脊的形态, 脊上的数据表现出和原信号最相似的特性, 各个信号分量的主要参数均可以从各自对应的脊上的信息中提取出来, 并且完全重构信号. 本文利用这一特点对由多个非平稳信号混合而成的源信号进行盲分离, 并给出了仿真实验的结果.

关键词: 连续小波变换; 脊提取; 信号盲分离

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 07-1156-04

Blind Source Separation Based on Ridge Characterization Extraction

ZHANG Xiaodong, WANG Qiao, WU Le2nan

(Dept. of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu, 210096, China)

Abstract: A new blind source separation method based on ridge characterization extraction is presented. The stationary phase method proves that in the asymptotic limit, the behavior of the continuous wavelet coefficients shows strong ridge character. By extracting the ridge characterization of each signal component, some parameters of the signal component can be extracted and used in reconstruction of the original signal. This feature can be used in blind source separation of a set of instantaneous linear mixtures of nonstationary signals. Numerical simulations are provided.

Key words: continuous wavelet transform; ridge extraction; blind source separation

1 引言

信号盲分离的核心问题是从多个源信号的混合信号中将每个信号分量分别提出来, 针对的信号可以是多个平稳信号或非平稳信号的线性组合, 并且各个信号分量一般在时域和频域上都是部分或全部重合的. 该技术在语音信号处理、生物医学信号处理、阵列信号处理等众多领域有着广泛的应用前景. 一个典型的例子是多个混合在一起的语音信号的盲分离问题. 自从 Christian Jutten 和 Jeanny Herault 提出了开创性的 H2J 算法以来, 根据不同的信号特征, 已经提出许多分离方法, 如: 基于信息最大化的分离方法、基于高阶统计量的方法、阵列信号处理方法以及各种利用神经网络实现的分离方法等等. 针对信号的时频特性, 在时频平面上将时频特征不同的信号进行分离并重构出对应的时域信号也是一种有效的方法^[1, 2]. 稳定位相法的理论分析表明, 符合渐进性要求的信号, 在对应的连续小波变换平面上显示出明显的脊特征, 信号能量聚集性最好的区域构成连续的脊, 并且和原始信号有着最大程度上的相似, 可以用来提取信号的几个重要的参数, 并达到重构原信号的目的^[3, 4]. 脊上的信息有着明确的物理意义: 脊所在位置的信息对应着信号瞬时频率 IF 的变化过程,

脊上信号对应分布的包络对应着信号幅度调制的信息. 由于信号是由几个主要的分量叠加而成的, 则一般来说每个信号分量都对应着一条比较突出的脊. 本文利用这一特性, 在时频域上分别提取每条脊, 并估计对应信号的参数以此重构出对应的时域信号, 从而达到将信号分量分离的目的. 理论分析和仿真实验的结果都证实了该方法的有效性.

2 脊重建信号的原理

特定类型的信号在时频平面上存在着对应的能量比较集中、分布比较突出的位置, 类似于地形图上山脊的特点, 可以按某种规则定义为脊. 脊上的数据和原始信号有着紧密的联系, 可以用来对信号几个重要的参数进行估计. 本文讨论渐进信号在连续小波变换平面上所呈现的脊, 分析脊上数据所包含的信号本身的信息, 并用来对信号的各个分量进行分离. 设待分析的渐进信号具有如下的形式:

$$f(x) = A_r(x) \cos[U(x)]$$

信号渐进性质的含义为: 信号的振幅变化率相对于信号频率的变化来说是缓慢变化的, 信号从整体上可以看作是一个调频信号. 信号 $f(x)$ 对应的解析信号可以表示为

$$Z_r(x) = f(x) + i f^H(x)$$

其中信号 $f(x)$ 对应的 Hilbert 变换为

$$f^H(x) = \frac{1}{P} \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \frac{1}{x-y} dy,$$

则对信号的渐进性要求, 意味着信号需要同时满足如下条件:

$$A_r(x) = |Z_f(x)|$$

$$U_r(x) = \arg Z_f(x) = \arctan[f^H(x)/f(x)]$$

选择渐进的小波函数 $g(x) = A_g(x) \exp[iU_g(x)]$, 并且要求小波函数满足当频率 $F < 0$ 时, 对应的傅里叶变换 $\hat{g}(F) = 0$ 这一条件. 则信号 $f(x)$ 的连续小波变换可表示为

$$T_r(b, a) = 3f, g_{(b,a)}^4 = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) g\left(\frac{x-b}{a}\right) dx$$

其中 $g(b, a) = g\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 表示对小波函数进行尺度和水平位置调整. 此外, 有下式:

$$T_r(b, a) = 3f, g_{(b,a)}^4 = \frac{1}{2} Z_f, g_{(b,a)}^4$$

成立. 因此有:

$$T_r(b, a) = \frac{1}{2} Z_f, g_{(b,a)}^4 = \frac{1}{2a} \int_{-\infty}^{\infty} Z_f(x) g\left(\frac{x-b}{a}\right) dx$$

式中被积函数的相位记作:

$$S_{(b,a)}(x) = U_f(x) - U_g\left(\frac{x-b}{a}\right).$$

应用稳定定位相法的近似公式, 在相位符合条件

$$5c_{(b,a)}(x) = U_f(x) - \frac{1}{a} U_g\left(\frac{x-b}{a}\right) = 0$$

$$5d_{(b,a)}(x) = U_f(x) - \frac{1}{a^2} U_g\left(\frac{x-b}{a}\right) X^0$$

的情况下, 可以得到信号连续小波变换的另一种表示形式^[3]

$$T_r(b, a) = \frac{Z_f(t_s) g\left(\frac{t_s-b}{a}\right)}{\text{Corr}(b, a)} + O(E)$$

其中

$$\text{Corr}(b, a) = \sqrt{\frac{2}{P}} \sqrt{a^2 |5d_{(b,a)}(t_s)|} \# \exp\left[-i \frac{P}{4} \text{sgn}(5d_{(b,a)}(t_s))\right]$$

定义符合上述要求, 并且有 $t_s(b, a) = b$ 的点为脊所在的位置: $a_r(b) = U_g(0) / U_f(b)$ 则可以得到限制在脊上的连续小波变换为:

$$T_r(x, a_r(x)) U \frac{Z_f(x) \overline{g(0)}}{\text{Corr}(x, a_r(x))}$$

进一步的分析表明, 限制在脊上的小波变换反映了所分析的解析信号的性质, 而脊以外位置上的数值只是与小波本身有关的量, 与信号无关. 脊上的小波变换数值可以用来完全重建信号. 重建公式:

$$T_r(x) U \frac{T_r(x, a_r(x)) \# \text{Corr}(x, a_r(x))}{g(0)}$$

3 用脊的概念进行信号分离

上述稳定定位相法的近似公式为通过脊上信息分析、处理信号的方法提供了理论依据. 近似公式的近似程度是很高的. 以一个恒定幅度的线性调频信号为例, 信号为 $f(t) = \exp[i$

$(X_1 t^2 + X_2 t)]$, 选择的小波函数为 Morlet 小波 $g(t) = \exp(-B t^2) \# \exp(i X_0 t)$. 则根据脊的定义, 可以得到在连续小波变换平面上脊的位置为 $a_r(b) = X_0 / (2X_1 b + X_2)$. 在脊上精确的数值为

$$T_r(x, a_r(x)) = \frac{\sqrt{P}}{2} \frac{1}{\sqrt{B^2 + X_1^2 a^4}} \# \exp[i(X_1 b^2 + X_2 b)] \# \exp\left[i \frac{1}{2} \arg\left(\frac{X_1 a^2}{B}\right)\right]$$

而根据上述近似公式得到

$$T_r(x, a_r(x)) U \frac{\sqrt{P}}{2} \frac{1}{\sqrt{a^2 X}} \# \exp[i(X_1 b^2 + X_2 b)] \# \exp\left[-i \frac{P}{4} \text{sgn}(5d_{(b,a)}(t_s))\right]$$

比较这两个结果在脊上的包络变化, 可以看出, 精确解中因为有因子 $1 / \sqrt{B^2 + X_1^2 a^4}$, 因此模最大值和定义的脊并不完全重合. 但带入实际的数值可以看出, 其中 B^2 要远远大于 $X_1^2 a^4$, 大体上 $B^2 / X_1^2 a^4$ 在 200~500 左右, 因此这一项可以看作一个常数. 而在近似解中, 则多了一个 $1/a$ 的校正项. 但因为对于符合渐进假设的信号, 脊的分布一般是沿平移参数 b 的方向延伸的, 变动的范围很小, 即 a 的变动范围很小, 因此可以看出, 近似解是精确解很好的近似.

近似公式说明了信号在变换域上脊所在位置上的信息, 可以用来完全重构信号. 脊的起伏变化对应着信号幅度的变化; 脊所在位置对应着信号瞬时频率的变化. 而对于非平稳信号的分析来说, 信号幅度变化和信号瞬时频率的变化中包含了信号大部分的信息, 在知道了这两个信号的基本参数后, 可以直接将信号构造出来, 构造出的信号与原信号之间只相差一个初始相位.

在时频域上对信号进行分离的方法与其他典型的信号分离方法, 如主分量分析方法相比, 有两个好处: 第一, 这种方法和信号的统计特性无关. 即使有两个或多个信号分量的概率密度函数是高斯分布的, 只要对应的脊能够区分开来, 即可分别提取并重构信号. 第二, 对于含噪声的信号, 因为噪声是宽带的信号, 能量分布在整个时频平面上, 而信号能量是集中在脊所在位置上的, 因此信号能量更为突出, 有利于脊的提取.

信号分离的过程包括两个主要的部分, 首先是脊的提取, 其次是重构各个脊所对应的信号分量.

脊的提取总体上说有两种方法, 一是利用脊上信号相位的特征, 二是利用脊上信号能量最集中, 幅值最大的特点, 提取时频平面上极值点的位置作为脊所在的位置. 利用相位信息提取脊的方法在信号的背景噪声较小时, 可以很精确地提取脊, 但当信号的背景噪声较大时, 往往对相位的影响较大, 导致不能正确提取脊. 并且该方法只适合于有单条脊存在的情况, 对于多条脊并存的信号则不适用^[3].

利用脊上信号能量最集中, 在时频空间的幅值最大的特点, 也可以有效地提取脊所在的位置. 从前面的公式比较中可以看出, 时频平面上模的极值所在位置和严格定义下的脊的位置只有很小的差别, 可以忽略不计. 因此一般是直接找模的局部极值点作为脊所在的位置. 如果考虑到对脊的定义包含

了脊是连续的并且是比较光滑的这两个特点, 并且作为对脊的约束条件来一并考虑, 则可以更好地提取脊. 对于信号有多个分量, 有多条脊同时存在的情况, 同样可以通过寻找局部极值的方法来同时提取多条脊^[6]. 这是利用相位信息的方法所不能做到的.

本文采取文献[6]中的方法, 得到对脊较好的提取.

针对待分析的信号为渐进信号的特点, 可以对脊的形态和分布做如下的假设: 脊都是沿平移参数的方向延伸的, 并且脊本身是平滑的. 设待分析的信号为两个高斯包络的线性调频信号叠加的形式. 信号为

$$f(t) = \{ \sin\omega_0 2P(20t^2 + 10t)8 + \sin\omega_0 2P(30t^2 + 20t)8 \} \# \exp[-1218(t - 0.5)^2], \quad t \in [0, 1.024]$$

两个分量在时域上是重合的, 在频域上也是大部分重合的. 仿真实验中仍选择小波函数为 Morlet 小波, 其中参数 B 和 X₀ 的选择是根据所处理的信号主要频率的变化范围, 使得信号分量对应的脊大体分布在时频平面的中央. 图 1 所示为信号的时域波形. 图 2 为对脊提取后的效果, 实线为进行平滑处

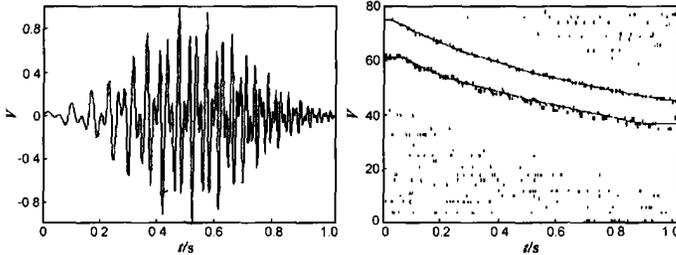


图 1 原始信号时域波形 图 2 连续小波变换域上提取的脊

理后提取到的脊, 其中纵坐标为尺度参数, 取为按指数变化规律 $2l \cdot 2^{n/15}$, $n = 0, 1, 2, \dots, 80$. 可以看出, 在时域、频域都有很大程度上重合的两个信号分量对应的脊有很明显的区分度, 可以用来分别估计各分量的相关参数.

信号不同的分量所对应的脊提取以后, 利用脊上的信息可以将各个分量分别重建, 从而达到信号分离的目的. 信号各分量重构的方法有多种, 典型的算法可以将重构问题归纳为求解一个最优化问题, 从已经提取的某一条脊上选择若干个观察点, 作为重构该条脊对应的信号时要用到的全部信息. 另外, 如果在优化问题中考虑到脊的光滑性, 则可以更准确地恢复信号.

另外还可以用更直接的方法来重构信号. 考虑到各信号

分量分别为非平稳的调幅2调频信号的线性叠加. 根据信号重构公式可以看出, 信号脊上数据起伏的情况与信号幅值的变化是一致的, 包含了信号幅值的全部信息, 因此, 将脊上的包络起伏作为信号分量本身的包络. 而对于连续小波变换来说, 脊所在的位置直接对应着信号瞬时频率的变化 $a_r = X_0/U$. 由瞬时频率来决定信号波形振荡的快慢. 根据这两方面的信息, 将各个信号分量直接重构出来.

这种方法不足的地方在于没有考虑到信号相位的信息, 重构的信号与原信号相比, 初始相位信息被丢掉了. 但在一些特定的场合下, 信号的相位信息并不是特别重要, 本文的重构方法可以减少计算量, 同时使得重构的信号达到可以接受的程度. 例如, 对于语音信号来说, 因为人耳对信号的频率信息、幅值信息比较敏感, 而对相位的信息不敏感, 因此重构后的信号各分量初始相位的少许变化对于人的主观感受没有多少影响, 从主观感受上说, 能够接受. 利用实际的语音信号所做实验进一步验证了这一性质. 当然, 对于语音信号来说, 只有浊音部分的信号因为符合或接近符合近似公式对信号渐进性的要求, 所以在连续小波平面上有比较明显的脊的特征, 而对于清音来说, 脊的特征不明显, 不适合这种方法.

4 仿真结果

仿真实验仍然采用上述信号形式. 在连续小波变换平面上可以看出, 信号对应着两条可以区分的脊, 每一条对应着一个信号分量. 将两条脊分别提取, 并且利用脊上的信息分别重构, 则达到了将两个分量分离的目的. 图

3 所示为两个信号分量的瞬时频率随时间的变化规律. 从图中可以看出, 两个信号分量在频域上有很大一部分是重合的. 图 4 为根据提取到的两条脊, 分别重构的两个信号分量在时域的波形, (a) 为频率较低的分量, (b) 为频率较高的分量. 可以看到两个高斯包络的线性调频信号被很好地恢复出来. 图 5 为原信号与重构信号的 FFT 频谱比较, 其中虚线为原信号频谱, 实线为重构信号频谱. 图 6 为重构后的两个信号分量分别与原信号的 FFT 频谱比较, (a) 为频率较低的分量, (b) 为频率较高的分量, 图中虚线为原信号频谱. 从实验结果可以看出, 利用脊上数据进行的信号分离有效地将这个由两个在时域、频域上均有很大程度重合的非平稳信号叠加而成的信号分离开来, 两个信号分量各自的幅度调制、频率调制信息都能得到较好的恢复.

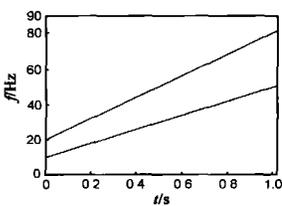


图 3 信号分量频率变化曲线

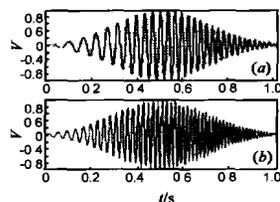


图 4 提取后的信号量时域波形

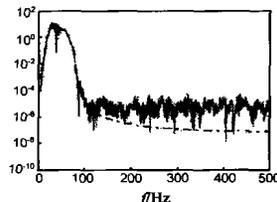


图 5 原信号与重物信号频谱比较

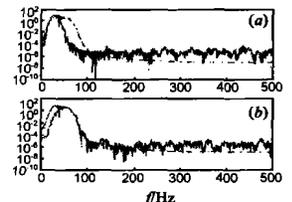


图 6 提取后的信号与重物信号频谱比较

5 总结

本文对基于信号在变换域上脊特征提取的信号分离方法进行了研究. 渐进信号在连续小波变换平面上显示出明显的脊的特征, 并且脊上的信息与原信号相比有最大的相似性, 从中可以对信号的包络变化、瞬时频率变化这两个重要的参数进行估计. 通过提取这两个参数并且分别重构每条脊对应的信号, 可以达到对多个非平稳信号叠加而成的信号中各个信号分量分离的目的. 仿真实验的结果验证了信号分离的效果.

参考文献:

- [1] A Bebudhrani, M Amin. Blind source separation using 2f distributions: algorithm and asymptotic performance [A]. Proc ICASSP [C]. Germany: IEEE, April 1997. 3469- 3472.
- [2] C Gordan, R Reiz. Using wavelet transform for the ridge extraction of a parabolic frequency modulated signal [A]. Digital Signal Processing 2002 [C]. Greece: IEEE, 2002. 337- 340.
- [3] N Delprat, et al. Asymptotic wavelet and gabor analysis: extraction of instantaneous frequencies [J]. IEEE Trans Inform Theory, 1992, 38 (2): 644- 665.
- [4] N Delprat. Global frequency modulation laws extraction from the Gabor transform of a signal [J]. IEEE Trans Speech and Audio Processing, 1997, 5(1): 64- 71.

- [5] R Carmona, W L Hwang, B Torric esani. Characterization of signals by the ridges of their wavelet transforms[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1997, 45(10): 2586- 2590.
- [6] R Camona, W L Hwang, B Torric esani. Multiridge detection and time2 frequency reconstruction [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1999, 47 (2): 480- 492.

作者简介:



张晓冬 男, 1974 年出生于吉林省长春, 东南大学无线电系, 博士研究生, 主要研究方向为信号分析与表示方法.

王 桥 男, 1966 年出生于安徽, 理学博士, 教授, 现从事信号分析与表示及量子信息论等相关研究, 目前主持一项国家自然科学基金项目.

吴乐南 男, 1952 年出生于福建, 教授, 博士生导师, 从事多媒体信号处理等研究与开发工作, 目前主持一项国家自然科学基金项目.