

在不同噪声背景下 Dopplerlet 变换 在信号恢复中的应用

邹红星,周小波,李衍达

(清华大学自动化系智能技术与系统国家重点实验室,北京 100084)

摘 要: 在不提供信号与噪声统计特性的前提下,用自适应匹配投影塔形分解算法实现的 Dopplerlet 变换,能有效地去除信号中的噪声和干扰.文中给出了信号恢复的原理以及不同特性噪声背景下的算例结果.

关键词: 信号恢复; Dopplerlet 变换; 自适应匹配投影塔形分解

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 09-0001-04

Application of Dopplerlet Transform to Signal Retoration under Different Contaminating Noises

ZOU Hong-xing, ZHOU Xiao-bo, LI Yan-da

(Dept. of Automation, Tsinghua University, State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Beijing 100084, China)

Abstract: Under the prerequisite that the statistics of both signal and noise are not known a priori, the Dopplerlet transform realized by using the adaptive pyramidal matching projection algorithm can perform effectively the denoising and interference cancellation. Moreover, the philosophy of signal restoration and the experimental results are provided.

Key words: signal restoration; Dopplerlet transform; adaptive pyramidal matching projection algorithm

1 引言

信号恢复是信号处理的一项常规工作,其目的是尽可能地复原被噪声或干扰*污染的信息源,因此信号恢复问题属于一类估计问题.噪声是一种不确定的随机现象,据其功率谱特性可分成白噪声和有色噪声,也可据其概率分布分成 Gauss 噪声、Rayleigh 噪声、Weibull 噪声等;根据噪声与信号的相互作用关系,还可将噪声分为加性噪声和乘性噪声两种.为消除测量信号中的噪声或干扰,业已提出众多的滤波方法,常用的主要有:(1)基于各种频谱加窗技术的滤波方法,如最平通带滤波、Cauer 滤波等,这类方法在本质上充分利用了信号与噪声或干扰在频谱上的差异,其不足之处是,若信号与噪声或干扰的频谱交叠,则很难将信号分离出来,并且理想滤波器是物理不可实现的;(2)最优滤波或最优估计,如最小二乘法、Wiener 滤波和 Kalman 滤波,它们均是根据真实信号和测量信号的统计特性,从测量信号中得出某种统计意义上具有最小误差的信号估计,由于 Wiener 滤波器的参数是固定的,显然不适合时变信号,尽管 Kalman 滤波器的参数是时变的,适合于非平稳信号的滤波,但只有获得信号与噪声的统计特性后,

才能实现最优滤波,然而在实际应用中或者无法先验获知这些统计特性,或者统计特性也是时变的,因之实现不了最优滤波;(3)自适应滤波,如自适应噪声抵消、自适应陷波等,能自适应地调节现时刻的滤波器参数,以适应信号和噪声或干扰的未知的、或随时间变化的统计特性,从而实现最优滤波,由于自适应滤波算法存在渐近收敛特性,当测量信号较短时,滤波结果的起始部分误差非常显著^[1].

文献[2]和[3]分别提出了基于 Gabor 基函数的自适应匹配投影分解法,并成功地将其应用于信号恢复.该方法的实质是在每次迭代过程中抽取与某一基函数最匹配的信号分量,从而毋须先验地获知有关信号和噪声的统计特性,但不足之处是缺乏对信号成分的适应性.当待分析的信号是一 chirp 信号时,这种匹配相当于零阶逼近,从而造成分解过程存在许多截断和分量之间的混合畸变.文献[4~7]提出的 chirplet 变换,因其基函数为一族经伸缩、时移、频移、时间倾斜和频率倾斜的 Gauss 函数,则能有效地克服文献[2]和[3]的缺点.然而接踵而至的问题是,当信号分量的时频关系为非线性时,chirplet 基函数亦失却对此类信号的适应性.

收稿日期:1999-06-11;修回日期:1999-12-28

基金项目:国家自然科学基金(No. 69775009);国防科技重点实验室基金(No. 97JS34. 7. 1. JW0105)

* 注:本文严格厘清“噪声”(noise)和“干扰”(interference)两概念的内涵,将周期的、有规律的误差信号(测量信号与真实信号之差)纳入干扰范畴,譬如电子线路中的市电干扰;而将理论上不能预测的、必须用概率统计刻画的误差信号定义为噪声,譬如晶体管中的散粒噪声.

基于对上述诸方法的检讨,作者提出采用 Dopplerlet 变换^[8,9]恢复受干扰污染的或淹没于噪声中的真实信号.该方法的明显优势在于它能自适应地匹配信号的非线性层次结构;亦如文献[3]中的长处,它毋需先验地获悉信号与噪声的统计特性.

2 Dopplerlet 变换概要

为克服时频关系为线性的基函数的不足,作者考虑在信号分解中采用时频关系为非线性的基函数. Doppler 信号是一大类自然信号,当观察者与波源之间有相对运动时,观察者就可感受到波源频率的非线性变化.设波源的频率为 f_0 ,波源的运动速度为 v ,声音在空气中的传播速度为 u ,静止的观察者 P 与波源的运动方向距离为 l ,则观察者所接收到的频率 f 为

$$f = \frac{u}{u - \frac{v^2(t-t_0)}{\sqrt{l^2 + v^2(t-t_0)^2}}} f_0 \quad (1)$$

其中 t_0 为与观察者的位置相对应的时间中心.当 $t < t_0$ 时, $f > f_0$,表示波源接近观察者;当 $t > t_0$ 时, $f < f_0$,表示波源远离观察者.由式(1)可知,静止的观察者接收到的 Doppler 信号(不考虑声强的变化)为

$$d_{t_0, f_0, l, v, u}(t) = \exp\{j2\pi f(t-t_0)\} \quad (2)$$

用这种 Doppler 信号对归一化高斯窗函数(当然窗函数的形状不一定非取高斯型不可)进行调制,就得到高斯 Dopplerlet

$$d_{t_0, f_0, \log(\cdot), l, v, u}(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_0}{t}\right)^2\right\} \exp\left\{j2\pi\left[u - \frac{v^2(t-t_0)}{\sqrt{l^2 + v^2(t-t_0)^2}}\right]^{-1} f_0(t-t_0)\right\} \quad (3)$$

显然,要描述一高斯 Dopplerlet 需要以下六个参数:时间中心 t_0 ,频率中心 f_0 ,对数时宽 $\log(\cdot)$,与波源运动方向的垂直距离 l ,波源运动速度 v ,以及媒质中的声速 u .

用 Dopplerlet 作基函数,即可定义任一平方可积信号 $s(t)$ $L^2(\mathbf{R})$ 的连续 Dopplerlet 变换为

$$\text{CDT}(t, f) = \langle s(t), d_{t_0, f, \log(\cdot), l, v, u}(t) \rangle \quad (4)$$

上式中“ $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ”表示内积.它是利用高斯 Dopplerlet (3)得到的变换,因之称作连续高斯 Dopplerlet 变换.

3 基于 Dopplerlet 变换的信号恢复原理

作者采用匹配投影分解算法(matching pursuit)^[3]实现 Dopplerlet 变换.仔细分析该算法的流程则不难发现,其结构与该文作者曾提出的小波变换的塔形算法结构如出一辙,因此作者将其命名为“自适应匹配投影塔形分解算法”(adaptive matching projection pyramidal algorithm).有关基于 Dopplerlet 基函数的自适应匹配投影塔形分解算法的收敛性分析,参见文[9]中的定理 1 和定理 2.

令含噪信号模型为

$$x(t) = s(t) + w(t) \quad (5)$$

其中 $w(t)$ 表示随机噪声.一般而言,信号的各成分之间具有很强的相干性,并且与 Dopplerlet 基函数系 $\{d\}$ (其中

表示指标集)中的某些元素强相关,信号的相干性愈强,则基函数与残差信号 R_s^n 的相关比愈大.定义相关比为

$$(R_s^n) = \sup \frac{|R_s^n, d_n|}{R_s^n} \quad (6)$$

自适应匹配投影塔形分解算法在每次迭代过程中选择一个与残差信号 R_s^n 最相关的基函数 d_n ,令

$$\tilde{(R_s^n)} = \frac{|R_s^n, d_n|}{R_s^n} \quad (7)$$

根据分解过程

$$R_s^n = R_s^n, d_n, d_n + R_s^{n+1} \quad (8)$$

及基函数的选择准则

$$|R_s^n, d_n| = \sup |R_s^n, d|, 0 < 1 \quad (9)$$

有

$$\tilde{(R_s^n)} = (R_s^n) \frac{1}{\tilde{(R_s^n)}} \quad (10)$$

另据文[3], $\forall n \geq 0$,

$$E[\tilde{(R_s^n)}] = E[\tilde{(R_w^n)}] \quad (11)$$

信号 $s(t)$ 有 m 个相干成分, $\forall 0 \leq n < m$,当且仅当

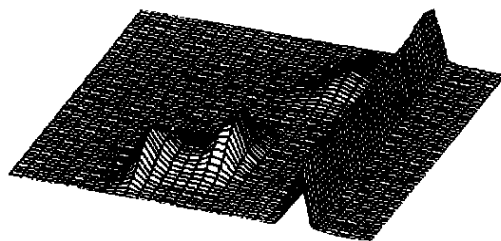
$$\tilde{(R_s^n)} > E[\tilde{(R_w^n)}], \tilde{(R_s^m)} = E[\tilde{(R_w^m)}] \quad (12)$$

成立.据此用 m 个 Dopplerlet 基函数的加权组合 $\sum_{n=0}^m R_s^n, d_n$,即可充分逼近真实信号 $s(t)$.这一滤除噪声的机理,正是缘于信号的组成成分具有很强的相干性,而随机噪声则没有.

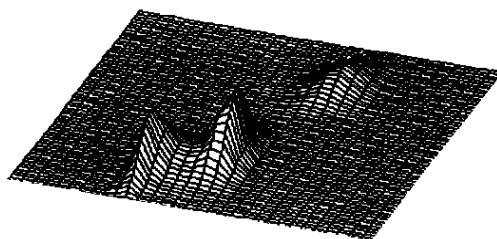
4 仿真实例

4.1 消除干扰

由前文可知,若某次或若干次迭代搜索出来的加权 Dopplerlet 基函数 R_s^i, d_i 代表干扰,就可将其投影系数 R_s^i, d_i 置为 0,由搜索出来的其它 Dopplerlet 基函数



(a) 含市电干扰的两个 Dopplerlet 信号的谱图



(b) 消除了市电干扰的两个 Dopplerlet 信号的谱图

图 1 干扰消除

的线性组合 R_c^n, d_n, d_n , 即可获得消除了干扰的信息源。这种消除干扰的方法用一个形象的比喻描述, 就是一个水果那里坏了, 就切除那里, 不影响其它部分; 它消除了干扰, 但不降低分辨率, 适于保幅处理。毋庸置疑, 与滤除随机噪声不同的是, 要消除信号的干扰, 必须首先知道干扰的性质及其特性。图 1 示出了用这一方法得到的消除了市电干扰 (谐波) 的两个 Dopplerlet 信号的谱图。

在码分多址 (CDMA) 系统中, 一个主要的问题是当多个用户同时激活时, 需要检测出期望用户的信号, 而此时其它用户信号则被当作干扰对待。对于干扰, 所能知道的是其标识波形 (扩频码)。根据干扰信号的这些特征, 可以利用 MMSE 准则自适应地将其抑制掉^[10]。本文提出一种与文 [10] 不同的干扰消除方法。令 $c(n)$ 表示扩频码, 对其进行 Dopplerlet 变换, 在每次迭代过程中求得的最佳投影系数与残差序列能量的相关比为

$$\gamma(R_c^n) = \frac{|R_c^n, d_n|}{R_c^n}$$

由于 $c(n)$ 是伪随机码, 它的相干程度很低, 而干扰是多个用户信号之和, 它已不再是伪随机序列, 其相干程度要大得多。若对接收信号字母 $r(n)$ 进行 Dopplerlet 变换, $\forall 0 \leq n < m$, 当

$$\gamma(R_c^n) > E[\gamma(R_c^n)], \gamma(R_r^n) \approx E[\gamma(R_c^n)]$$

满足时, 前 m 个相干结构就属于干扰, 而残差能量就对应于期望用户信号与白噪声的能量之和。只要找到满足上两式的 m 值, 即可消除接收信号中的干扰。

4.2 滤除噪声

为要检验 Dopplerlet 变换在不同分布特性噪声背景下恢

复真实信号的能力, 设计了三种不同类型的信号, 并选择了三种不同分布特性的加性噪声。图 2(a) 上半部分的底部显示了含 χ^2 分布噪声 / 其中信噪比 (SNR) 为 -3 dB / 的两谐波信号的时域波形, 右边显示了相应的功率谱密度估计, 中部显示了与信号相关的径向 Gauss 核函数时频分布 (SDTFD)^[11]; 下半部分的上部示出了真实信号的时域波形, 底部给出了用本文的方法迭代两次所得的重构信号, 其 SNR 较之原含噪信号提高了 19.2943 dB; 作出对比, 中部还示出了三阶 Cauchy 滤波器的滤波结果。图 2(b) 的上半部分显示了含 -1 dB Rayleigh 噪声的四个 Gauss 信号的时域波形及相应的平滑伪 Wigner-Ville 分布 (SPWVD)^[12]; 下半部分示出了用本文的方法经四次迭代所得的重构信号 (其中 SNR 提高了 15.8414 dB), 以及用作者曾提出的多谱线增强方法^[13]所得的结果。在第三代数字移动通信中, 要解决的一个关键问题是, 在信源快速移动引起 Doppler 频移和由多径造成的信道快衰减 (衰减信道的增益的模式服从 Rayleigh 分布) 的情况下, 如何有效地估计出信道以恢复码元信息 (须知此时典型地为加性噪声)。图 2(b) 的滤波结果为研究移动通信问题提供了一个重要启示。图 2(c) 的上半部分显示了含 3 dB Gauss 有色噪声的复合信号 (由两个 Doppler 信号、两个 Dirac 脉冲和一个谐波组成), 以及作者曾提出的伪时频分布^[18]; 下半部分示出了用本文方法经五次迭代所得的重构信号 (其中 SNR 提高了 12.5842 dB), 以及自适应滤波结果。作者计算了有别于 Wigner-Ville 分布的三种时频分布, 旨在抑制二次时频分布中的交叉项干扰和噪声的影响 (按: 用于计算时频分布的含噪信号均经 Hilbert 变换先行处理, 以消除负频率的干扰)。由图 2 可见, 本文的方法具有较强的去噪能力。

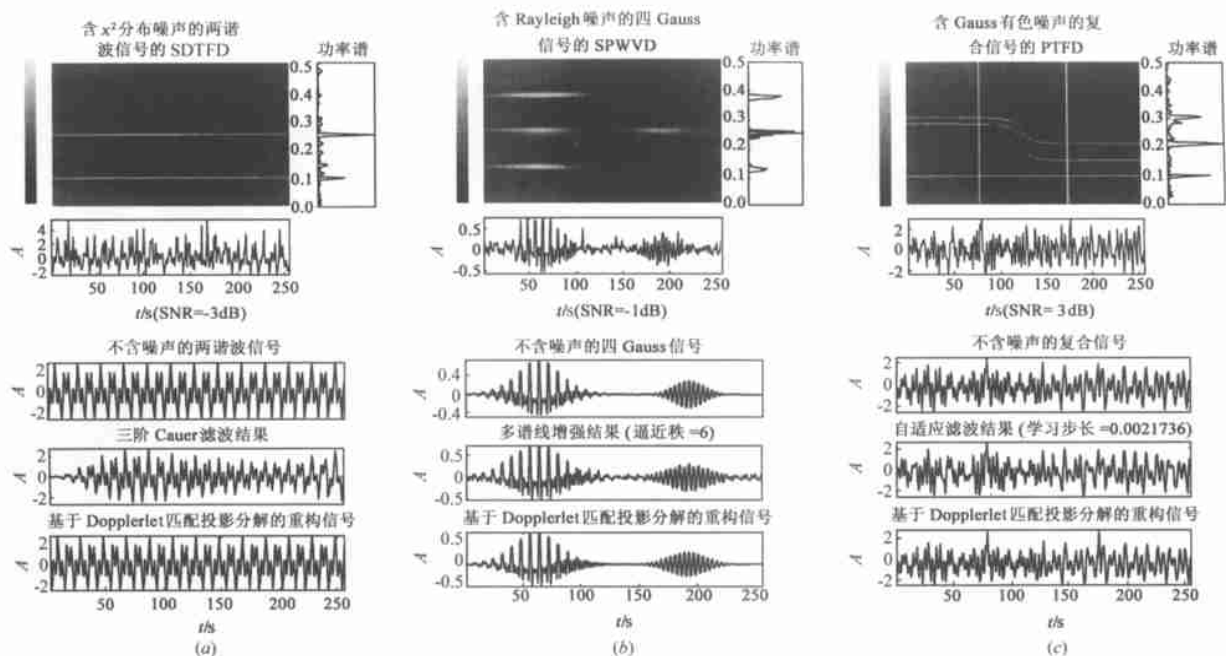


图 2 不同特性噪声背景下的信号恢复

5 结论

在无法确知信号与噪声的统计特性的前提下,既能消除平稳及非平稳信号中的干扰又能滤除其噪声的信号恢复方法,迄今未见报导.本文提出的基于 Dopplerlet 变换的信号恢复方法,正是针对该问题的尝试,更兼有自适应地匹配信号的非线性层次结构的能力.应当指出,在第三节中作者回避了如何求取 m 值,即怎样给出算法的停机准则这一难题.就作者所能判定的而言,该问题值得进行更多的理论和实验研究.

参考文献:

- [1] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,1995,5.
- [2] S. Qian, D. Chen. Signal representation using adaptive normalized Gaussian functions [J]. Signal Processing, 1994, 36(1): 1 - 11.
- [3] S. Mallat, Z. Zhang. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1993, 41(12): 3397 - 3415.
- [4] S. Mann, S. Haykin. Adaptive chirplet transform: An adaptive generalization of the wavelet transform [J]. Opt. Eng., 1992, 31(6): 1243 - 1256.
- [5] S. Mann, S. Haykin. The chirplet transform: Physical considerations [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1995, 43(11): 2745 - 2761.
- [6] D. Mihovilovic, R. N. Bracewell. Adaptive chirplet representation of signals on time-frequency plane [J]. Electron. Lett., 1991, 27(13): 1159 - 1161.
- [7] D. Mihovilovic, R. N. Bracewell. Whistler analysis in the time-frequency plane using chirplets [J]. J. Geophys. Res., 1992, 97(A11): 17199 - 17204.
- [8] 邹红星, 周小波, 李衍达. 采用 Dopplerlet 基函数的时频信号表示 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(3): 55 - 58.
- [9] 邹红星, 周小波, 张贤达, 李衍达. Dopplerlet 变换及其匹配收敛性分析 [J]. (电子科学学刊已录用).
- [10] U. Madhow, M. L. Honig. MMSE interference suppression for direct-sequence spread spectrum CDMA [J]. IEEE Trans. Communication, 1994, 42(12): 3179 - 3189.
- [11] R. G. Baraniuk, D. L. Jones. Signal-dependent time-frequency analysis using a radially Gaussian kernel [J]. Signal Processing, 1993, 32(6): 263 - 284.
- [12] P. Flandrin. Some features of time-frequency representations of multi-component signals [J]. IEEE Int. Conf. on ASSP, 1984, San Diego (CA), 41. B. 4. 1 - 41. B. 4. 4.
- [13] 邹红星, 周小波, 李衍达. 一种多谱线增强器 [J]. 电子科学学刊, 2000, 22(2): 226 - 232.

作者简介:



邹红星 1966 年出生, 1988 年、1996 年分别获第二炮兵工程学院学士、硕士学位, 1996 年入清华大学自动化系攻读博士学位. 主要从事信号处理与模式识别研究.

周小波 1967 年出生, 1988 年获兰州大学学士学位, 1995 年、1998 年分别获北京大学硕士、博士学位, 1998 年入清华大学自动化系作博士后研究. 主要从事通信、统计信号处理、小波分析与统计模式识别研究.



李衍达 1936 年出生, 1959 年毕业于清华大学自动控制系统, 中科院院士, 清华大学自动化系教授, 清华大学信息科学与技术学院院长, 清华大学生物信息学研究所所长, 校学术委员会主任. 主要从事信号处理理论、地震勘探数据处理与生物信息学研究.