

文章编号:1671-6833(2008)04-0129-04

一种基于 Mallat 算法的盲符号速率估计算法

任志勇, 隋 丹, 葛临东

(解放军信息工程大学, 河南 郑州 450002)

摘 要: 探讨了一种基于小波多分辨率分析的新算法, 它可以不需要已知载波频率, 不需要系统同步, 可以直接针对中频信号实现. 仿真试验结果证实了算法的有效性以及相对于其他算法的优势.

关键词: 符号速率估计; 盲算法; Mallat 算法

中图分类号: TN 911.7 **文献标识码:** A

0 引言

现有符号速率估计算法大多与特定的调制方式相关联. Reed 提出“时延-相乘”法估计符号速率^[1], 要求延时单元不能小于码元周期的一半, 这就需要首先对符号速率进行一个粗略估计, 而这个粗估计值会直接影响算法的性能. 利用信号的循环平稳特性也可以估计包括 PSK、QAM 在内的线性调制信号的符号速率^[2], 但当滚降系数较小时性能明显恶化. Koh 等^[3]提出利用信号包络平方谱来提取符号速率, 估计结果不受载波频率的影响, 并且容忍噪声的鲁棒性能也较好, 适用于带通 PSK 和 QAM 信号. Chan 等利用 Haar 小波来提取 PSK、FSK 信号的符号速率^[4], 适用于非零载波频率的数字带通信号, 但对信噪比要求较高, 且小波尺度的选取具有一定随机性, 并且要求发射信号采用矩形脉冲成型. 文献[5]采用二次连续小波变换, 能够在未知信号调制类型的情况下获得较好的符号速率估计结果, 但由于对不同调制方式所采用的小波变换的尺度不同, 因此从某种意义上讲该估计算法性能还是受调制方式影响的. 而笔者提出的新算法恰恰能较好地解决这一问题, 其有效性也得到了大量仿真试验的验证.

1 算法原理

Mallat 建立了多分辨率信号分解的小波模型, 并且将多分辨率分析用于信号奇异性检测、数据压缩等^[6]. 本节将多分辨率信号分解用于符号速率估计.

设 $x(k)$ 表示加性高斯白噪声中的离散观测

数据, 即

$$x(k) = s(k) + n(k) \quad (1)$$

式中: $s(k)$ 表示有用信号, 其符号速率为 f_s , 调制方式可以为 PSK 或 FSK; $n(k)$ 表示零均值、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声. 本研究的任务是从 $x(k)$ 中得到符号速率的估计值 \hat{f}_s .

首先对信号进行多分辨率分解. 根据多分辨率分析性质, 经适当推导可以得到计算离散逼近信号的迭代公式^[7]:

$$S_{2j}^d f_s = \sum_k h(2n-k) S_{2j-1}^d f_s \quad (2)$$

即信号 $f(x)$ 的分辨率 j 的离散逼近 $S_{2j}^d f$ 可以由较精一级分辨率 $j-1$ 的离散逼近 $S_{2j-1}^d f$ 通过低通滤波器 \tilde{H} 后对输出进行隔二抽样而得到. 同样, 离散细节信号 $D_{2j} f$ 也可以表示为

$$D_{2j} f_s = \sum_k \tilde{g}(2n-k) S_{2j-1}^d f_s \quad (3)$$

这说明, 信号 $f(x)$ 在分辨率 j 的离散细节信号 $D_{2j} f$ 可以由较精一级分辨率 $j-1$ 的离散逼近信号 $S_{2j-1}^d f$ 通过高通滤波器 \tilde{G} 后的输出进行隔二抽样得到. 再由多分辨率分析定义可知:

$$f(x) = S_{2j} f(x) + \sum_{j=1}^J D_{2j} f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{j,n} \phi_{j,n}(x) + \sum_{j=1}^J \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{j,n}(x) \Psi_{j,n}(x) \quad (4)$$

其中, 尺度系数 $\{C_{j,n}\}_{-\infty < n < \infty} = S_{2j}^d f$, 小波系数 $\{d_{j,n}\}_{1 \leq j \leq J, -\infty < n < \infty} = \{D_{2j} f\}_{1 \leq j \leq J}$. 上式说明 $f(x)$ 完全由 $(S_{2j}^d f, (D_{2j} f)_{1 \leq j \leq J})$ 描述. 离散信号集 $(S_{2j}^d f, (D_{2j} f)_{1 \leq j \leq J})$ 称为信号的正交小波表示. 多分辨率信号分解包括由粗分辨率(给定尺度 J)的

收稿日期: 2008-09-01; 修订日期: 2008-10-14

作者简介: 任志勇(1979-), 男, 解放军信息工程大学硕士研究生, 主要研究方向: 符号速率估计.

信号逼近和分辨率从 2^1 到 2^J 的全部细节信号。式(2)和式(3)即为多分辨率信号分解的快速算法,即著名的 Mallat 算法。

根据多分辨率分析思想可知,输入信号 $x(t)$ 可以表示成如式(4)的形式,即当分解级数 $J \rightarrow \infty$ 时,各级细节信号 $D_{2^1}x, D_{2^2}x, \dots, D_{2^J}x$ 张成的空间是 $x(t)$ 的完备空间。所以其中任意一个细节信号均可以在一定程度上代表 $x(t)$ 信息,那么符号速率所表示的信号的变化信息也可以用某级分解后的细节信号来表征。基于上述考虑,笔者提出利用 Haar 小波对观测数据 $x(t)$ 进行 J 级多分辨率分解得到细节信号,并对分解后的细节信号做 FFT,从其幅度谱中估计符号速率。

从多分辨率分析的定义和式(3)可知,每一级的细节信号都是前一级隔二抽样的结果,即随着分解级数的增加采样率逐渐减小,细节信号的样点个数逐渐减少。为了能够把各级分解得到的细节信号放在一起考虑,同时为了满足符号速率估计精度的要求,在利用 Fourier 变换计算幅度谱时希望观测数据的长度尽可能长一些,所以需要对各级细节信号进行内插^[8],使其采样率与原观测数据的采样率相同。

随着分解级数的增加,需要内插的点数也急剧增加,相应的误差也随之增加,同时也使得内插前后的波形发生严重畸变。因此,在实际应用时分解级数不能过大,对大量观测数据的仿真结果表明级数 $j \leq 4$ 时内插前后细节信号的误差是可以容忍的。考虑到二进小波变换是冗余的,并且具有时移不变性。因此各级细节系数之间具有一定相关性,并且信号和噪声的细节系数在各级之间的相关性是不同的。信号的各级细节系数具有较大的相关性,尤其是对应于信号中某些有意义的特征参数(如符号速率)的细节系数在各级之间均有较大的幅度。定义序列 $Z_i(n)$ 表示各级细节系数之间的相关性,即

$$Z_i(n) = \prod_{j=0}^{i-1} Z(j+i, n) \quad (n = 1, \dots, N) \quad (5)$$

式中: $Z(j, n)$ 是内插后第 j 级分解的细节系数 $D_{2^j}^w x$ 的幅度谱。而随着分解级数的增加,噪声所对应的细节系数的幅度迅速减小,甚至消失,即噪声的各级细节系数的相关性较弱。因此利用不同分解级数时细节系数的相关性,即可有效去除噪声的影响,将信号中对应于边缘以及其他有意义特征的系数检测出来。

以一段 QPSK 信号为例进行说明。信号规格如下:符号速率 2 400 dB,采用滚降系数为 0.5 的升余弦滤波器作为脉冲成型滤波器,载波频率为 1 800 Hz,采样率为 44 100 Hz,共 100 000 个样点,信噪比为 10 dB。对该信号进行 $J=4$ 的多分辨率分解,分别对各级细节系数进行内插并计算其幅度谱,同时计算各级细节系数的相关性,设 $Z_3(n) = Z(2, n) * Z(3, n) * Z(4, n)$,如图 1 所示。经过简单计算可知图 1 中 $Z_3(n)$ 的离散谱线对应于 2 400.4 Hz,这说明对各级细节系数的相关运算在保留信号特征参数(符号速率)的同时较好地去除了噪声等干扰的影响。因此可以从 $Z_3(n)$ 中通过峰值搜索来估计符号速率。

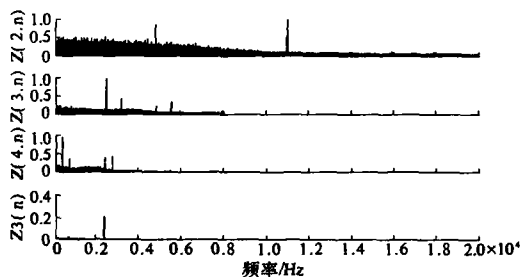


图 1 各级细节系数之间的相关性

Figure 1 Correlation of the detailed coefficients at all levels

3 算法步骤

根据以上讨论,本算法可以按以下步骤进行:

- 1) 初始化:确定多分辨率分解级数 J ,粗略估计观测数据 $x(t)$ 的带宽 B ;
- 2) 对 $x(t)$ 进行 J 级多分辨率分解,得到细节系数 $D_{2^1}x, D_{2^2}x, \dots, D_{2^J}x$;
- 3) 对细节系数进行内插,得到内插后新的细节系数 $D_{2^1}^w x, D_{2^2}^w x, \dots, D_{2^J}^w x$;
- 4) 按照式(5)计算各级细节系数的相关性 $Z_i(n)$;
- 5) 搜索 $Z_i(n)$ 的峰值,并按照下式估计符号速率

$$\hat{f}_b = \arg \max_{1 \leq n \leq B \cdot f_s / N} (Z_i(n)) \quad (6)$$

3 仿真结果及分析

仿真条件:对采用 PSK 和 FSK 调制方式的观测数据进行仿真,以验证算法的性能。参考美军标 MIL-STD-188-110B^[9]产生 PSK 信号,即符号速率为 2 400 Bd,载波频率为 1 800 Hz,采用升余弦脉冲成型

滤波器作成型滤波。对 FSK 信号,设符号速率为 81 Hz,载波频率为 1 560 Hz,通过改变频率间隔和调制阶数来改变调制指数。利用随机数发生器产生正态分布的随机数作为对加性高斯白噪声的仿真。

通过不同条件下仿真实验比较本算法、文献[3]和[4]算法的估计性能。如果某次实验估计值的相对误差在 0.4% 以内,认为该次实验估计成功。文献[3]指出绝对值谱的估计性能优于平方谱,因此这里采用绝对值谱。同样对文献[4]算法也是取原文的最优情况,即对 PSK 信号统计多个尺度下的 CWT 结果,对 FSK 信号选择较大的尺度进行两次 CWT。对于本算法,不论是 PSK 信号还是 FSK 信号均进行 4 级多分辨率分解,并且利用第 2、3、4 级细节系数的傅氏变换幅度谱构造相关性度量。3 种算法最后均归结为对相应曲线傅氏变换结果的极值搜索问题。

3.1 不同信噪比下 PSK 信号的估计性能仿真

考虑 2/4/8PSK 信号,设升余弦脉冲成型滤波器的滚降系数为 0.54,采样率为 44 100 Hz,每次对 80 000 个样点进行处理,相应地频率分辨率为 0.55 Hz。设信噪比变化范围为 0 ~ 20 dB,步进为 2 dB。在每个信噪比下对每种调制阶数的信号均进行 500 次独立实验。图 2 给出了 3 种算法对不同调制阶数 PSK 信号的估计成功率。其中文献[4]算法中选择尺度为 2、4、8。可以看出在整个信噪比变化范围内,文献[3]算法具有最优的估计性能,并且受信噪比影响不大。而在低信噪比时本文算法优于文献[4]算法,但在高信噪比时,本文算法估计性能有所恶化。这是因为本文算法是根据第 2、3、4 级细节系数估计符号速率的。之所以没有选择第 1 级细节系数,是考虑到低信噪比时该级含有较大的噪声成分,如果加入会对估计结

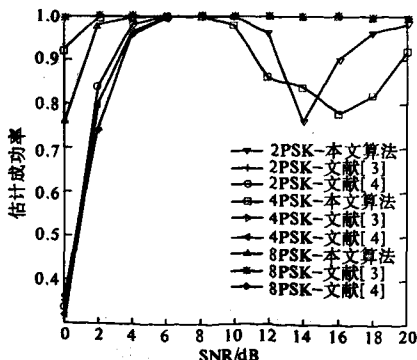


图2 三种算法对 PSK 信号的估计成功率
Figure 2 The success rate of estimation with three algorithm for PSK

果产生一定影响,但另一方面当噪声较小,即信噪比较高时,这种处理也会损失到信号信息,所以本算法在高信噪比时性能有所下降。

3.2 不同滚降系数时对 PSK 信号的估计性能

实际应用中,发射端常常要对 PSK 信号进行滚降成型滤波。因此接下来以 8PSK 信号为例比较 3 种算法在不同滚降系数时的估计性能。与仿真一类似,采样率为 44 100 Hz,每次对 80 000 个样点进行处理,相应的频率分辨率为 0.55 Hz,信噪比为 5 dB。设滚降系数从 0.1 变到 0.9,步进为 0.1,对滚降系数的每个可能取值均进行 500 次独立实验。相应的估计成功率如图 3 所示,从中可以看出本文算法和文献[3]算法在各个滚降系数下均可获得较好估计效果。而文献[4]算法对滚降系数的变化比较敏感,当滚降系数较小时性能明显恶化。这是因为文献[4]算法是针对采用矩形脉冲成型的 PSK 信号进行推导的,而没有考虑含有滚降成型的情况。

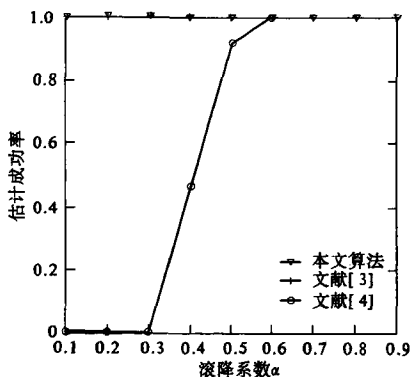


图3 三种算法在不同滚降系数时的估计成功率
Fig.3 The success rate of estimation with three algorithm in different roll-off factors

3.3 不同信噪比下对 FSK 信号的估计性能仿真

文献[3]的算法只适用于诸如 PSK 信号这样的线性调制信号,而不适用于类似 FSK 信号这类非线性调制信号。而文献[4]指出可以对 FSK 信号进行两次连续小波变换来估计符号速率。因此接下来对 2/4/8FSK 信号,比较本算法与文献[4]算法的估计性能,设相邻频率间隔为 500 Hz,采样率为 6 000 Hz,信噪比变化范围是 4 dB ~ 20 dB,步进为 2 dB。在每个信噪比下对每种信号进行 500 次独立实验。按照文献[4]所述,利用 Haar 小波对 FSK 信号进行两次连续小波变换,两次的尺度分别取 14 和 8。两种算法每次均是对 40 000 个观测数据样点进行处理,即频率分辨率为

0.15 Hz. 相应的估计成功率如图4所示,从中可以看出当信噪比高于10 dB时,两种算法均可以获得较好的估计结果。

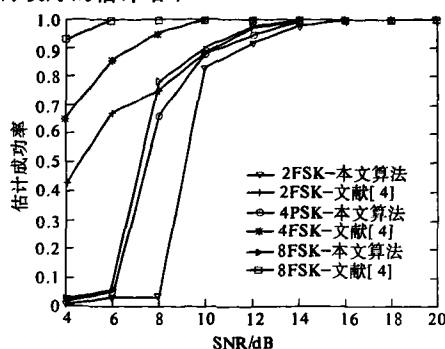


图4 两种算法对FSK信号的估计成功率

Figure 4 The success rate of estimation with two algorithm for FSK

综合上述3个仿真实验的结果,可以得到如下结论:本算法适用于滚降系数较小的PSK信号和FSK信号。虽然对于PSK信号,本算法的估计性能不及文献[3]算法,对于FSK信号,本算法在低信噪比时不及文献[4]算法。但是对于PSK信号和FSK信号,本算法能够利用相同的参数获得较好的估计结果,即本文算法受调制方式影响不大。而文献[3]算法只适用于线性调制信号,对FSK信号则完全失效;文献[4]算法虽然适用于PSK信号和FSK信号,不过只对采用矩形脉冲成型的PSK信号具有较好的结果,并且要求对PSK信号进行一次CWT,对FSK信号进行两次CWT,同时选择的尺度也不同。因此,从这种意义上讲,文献[4]算法的估计结果也是受调制方式影响的。

4 结论

笔者针对调制方式未知时的符号速率估计问

题,提出一种基于小波多分辨率分析的新算法。通过对观测数据进行多级多分辨率分解,利用各级细节系数的相关性来估计符号速率。算法实现时不需要已知载波频率,也不需要系统同步,可以直接对中频信号进行处理。对观测数据的大量仿真试验验证了上述算法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] REED R E, WICKERT M A. Minimization of detection of symbol-rate spectral lines by delay and multiplex receivers [J]. IEEE Transactions on Communications, 1988, 36(1):118-120.
- [2] SPOONER C M, GARDNER W A. Robust feature detection for signal interception [J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(5):2165-2173.
- [3] KOH B S, LEE H S. Detection of symbol rate of unknown digital communication signals [J]. IEE Electronics Letters, 1993, 29(3):278-279.
- [4] CHAN Y T, PLEWS J W, HO K C. Symbol rate estimation by the wavelet transform [A]. In: Proc. of IEEE ISCAS'97 [C]. Hongkong, June 1997:177-180.
- [5] 纪勇, 徐佩霞. 基于小波变换的数字信号符号率估计 [J]. 电路与系统学报, 2003, 8(1):12-15.
- [6] Mallat S 著, 杨力华译. 信号处理的小波导引 [M]. 第二版. 北京:机械工业出版社, 2002:193-196.
- [7] 余英林, 谢胜利, 蔡汉添, 等. 信号处理新方法导论 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004:113-121.
- [8] ORFANIDIS S J. Introduction to Signal Processing [M]. 影印版. 北京:清华大学出版社, 1998:650-659.
- [9] MIL-STD-188-110B. Interoperability and performance standards for data modems [S]. USA: Department of Defense Interface Standard, 2000.

A New Blind Symbol Rate Estimator Based on the Mallat Algorithm

REN Zhi-yong, SUI Dan, GE Lin-dong

(PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This article discusses a new algorithm based on the wavelet multi-resolution analysis, which can be directly achieved for IF signals and require neither the carrier frequency nor the synchronization of the system. The simulation results verify the effectiveness of the algorithm and its comparative advantages.

Key words: symbol rate estimation; blind algorithm; Mallat algorithm