

抽取时频分布图像脊-Hough 变换算法 及其性能分析

于凤芹^{1),2)} 曹家麟¹⁾

¹⁾(上海大学机械电子与自动化学院自动化系,上海 200072) ²⁾(江南大学控制科学与工程研究中心,无锡 214036)

摘要 在分析了双线性时频分布-Hough 变换算法对多分量 Chirp 信号检测与参数估计原理的存在问题后,提出了将多分量 Chirp 信号的双线性时频分布作为图像,抽取图像脊后,再进行 Hough 变换的改进方法。仿真试验结果表明,改进的方法不仅解决了 WVD 的交叉项引起 Hough 变换的伪尖峰对检测所造成的误判,而且缩短了双线性时频分布因平滑交叉项导致时频聚集性下降而引起的 Hough 变换增加的时间,从而提高了 Chirp 信号检测与参数估计的准确性,也进一步改善了该算法的抗噪声性能。

关键词 抽取图像脊 Hough 变换 双线性时频分布 多分量 Chirp 信号 检测与参数估计

中图分类号: TN911.7 TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2005)01-0103-04

Ridges Extraction of Time-frequency Distribution Image-hough Transform and Its Performance Analysis

YU Feng-qin^{1),2)}, CAO Jia-lin¹⁾

¹⁾(Department of Automation, School of Machine Electronic and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072)

²⁾(Research Center of Control Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214036)

Abstract After analyzing the principle and the shortcoming of detection and parameters estimation for the multi-component Chirps signal based on the bilinear time-frequency distribution-Hough transform, an improved method has been proposed in this paper, which the bilinear time-frequency distribution of the multi-component Chirps signal is regarded as an image, and ridges extraction operation is applied to the image and then the principle of detecting the line of Hough transform is used. The simulation results have shown that the proposed method not only can eliminate false detection resulted from pretense peak value of the cross-term and shorten the time of executing Hough transform, but can also increase the accuracy of detection and parameters estimation and reduce noisy interference.

Keywords ridges extraction, Hough transform (HT), bilinear time-frequency distributions (BTDF), multi-component Chirps signal, detection and parameters estimation

1 引言

噪声中多分量 Chirp 信号的检测和参数估计有实际意义^[1,2],因为双线性时频分布对多分量 Chirp 信号的时频表示存在交叉项干扰,且在低信噪比下,直接在时频平面难于判断 Chirp 信号的存在。由于多分量 Chirp 信号在时频平面呈现为不同斜率和不

同截距的多条直线,因此可把多分量 Chirp 信号的时频分布作为图像,利用 Hough 变换检测图像中直线的原理来将噪声中多分量 Chirp 信号的检测与参数估计问题转换为在参数空间寻找局部极大值及其相应坐标的问题,以使检测和参数估计一举完成。在仿真试验时发现,当两个 Chirp 分量在时频平面平行,且相距较近时,其魏格纳-威利分布 (Wigner-Villı distribution, WVD) 的交叉项在两个分量中间,呈振荡

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2002068)

收稿日期:2004-02-25;改回日期:2004-06-25

第一作者简介:于凤芹(1962~),女,1985年、1990年在西北工业大学电子工程系获学士和硕士学位,现为江南大学副教授,上海大学博士研究生。现主要研究方向是非平稳信号的时频分析、图像处理等。E-mail:yufengqin@china.com

形式,并且强度较大,由于其在时频平面呈断断续续直线的交叉项,因此经 Hough 变换后,在参数空间形成伪尖峰,这种伪尖峰会使得低阈值下的检测出现误判断;为了抑制伪尖峰,虽可使用双线性时频分布来对交叉项进行平滑,但由于平滑同时也减低了信号本身的时频聚集性,从而使多分量 Chirp 信号在时频平面的直线变粗,这样在进行 Hough 变换时,就降低了每个分量峰值的幅度和参数估计的精度,也增加了 Hough 变换的运行时间。为了既能平滑交叉项,又能缩短 Hough 变换的时间,以进一步提高检测和参数估计的准确性,本文提出了先抽取平滑后的时频分布图像脊,再进行 Hough 变换的改进方法,即把平滑后的时频分布作为图像,同时引入图像处理技术中的细化、骨架化和抽取图像脊等概念和方法,以达到使时频分布图中变粗的直线细化的目的。

本文采用时频重排算法^[3]计算时频分布的重心来得到图像的脊,而将时频分布作为图像,其中图像的脊标记了信号能量在时频平面最为集中的区域,也反映了非平稳信号的频率随时间变化的过程,其包含了信号的特征信息^[4]。由于抽取多分量 Chirp 信号的时频分布图像脊并没有丢失其初始频率和调频斜率等参数信息,所以,对抽取的图像脊进行 Hough 变换,仍然能够进行多分量 Chirp 信号的检测和参数估计。仿真试验结果表明,改进的方法不仅解决了多分量 Chirp 信号由 WVD 交叉项引起的 Hough 变换伪尖峰对检测所造成的误判,同时缩短了因平滑交叉项导致的时频聚集性下降而增加的 Hough 变换运行时间,而且提高了对 Chirp 信号的检测和参数估计的准确性,还进一步改善了算法的抗噪声性能。

2 基于 BTFD-HT 的多分量 Chirp 信号检测与参数估计原理及其存在的问题

Hough 变换的基本思想是点-线对偶性^[5],其图像变换前在图像空间,变换后在参数空间。由于在图像空间里所有过点 (x, y) 的直线,都满足方程 $y = px + q$,其中 p 为斜率, q 为截距,因此该直线方程也可写为 $q = -px + y$,它代表参数空间里过点 (p, q) 的一条直线。在图像空间的同一条直线上的两点 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 都满足直线方程 $y = px + q$,在参数空间里,可分别写成 $q = -px_i + y_i$ 和 $q = -px_j + y_j$,

即它们在参数空间是两条不同的直线,但由于这两条直线在图像空间有相同的斜率和截距,所以,它们在参数空间相交于点 (\hat{p}, \hat{q}) ,同理,图像空间中过点 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 的直线上的每个点都对应于参数空间的一条直线,且这些直线都相交于参数空间的 (\hat{p}, \hat{q}) 点,由此可见,在图像空间中共线的点对应于参数空间里,相交的线,反之,在参数空间里相交于同一点的所有直线,在图像空间都有共线的点与之对应,这就是点-线对偶性。根据点-线对偶性,当给定图像空间的一些点,就可通过 Hough 变换确定连接这些点的直线, Hough 变换就是把在图像空间中的直线检测问题转换到参数空间里对相交点的检测问题,即通过在参数空间里对相交点进行累加统计,并搜索局部极大值来完成直线的检测任务。

由于多分量 Chirp 信号在时频平面是多条直线,且每条直线的截距和斜率分别是 Chirp 信号的初始频率 f_0 和调频斜率 α ,所以 Hough 变换不仅能检测 Chirp 信号,而且还能直接给出信号的初始频率和调频斜率两个参数,但是,当调频斜率接近 90° ,直线接近垂直方向时,由于 p 和 q 的值接近无穷大而使计算量增大,因此宜采用以下直线的极坐标方程:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta = \sqrt{x^2 + y^2} \sin \left(\theta + \arctan \frac{x}{y} \right) \quad (1)$$

其中, ρ 代表直线距原点的法线距离, θ 为该法线与轴正向的夹角,根据这个方程,原图像空间的点对应新的参数空间中的一条正弦曲线,即由笛卡儿坐标空间转换到极坐标空间后, Hough 变换就由原来的点-直线对偶变成了点-正弦曲线对偶,这样检测图像空间中的直线就需要在新的参数空间里检测正弦曲线的交点。Chirp 信号的初始频率 f_0 和调频斜率 α 与 ρ 和 θ 的关系为

$$f_0 = \rho / \sin \theta, \alpha = -\cot \theta \quad (2)$$

在仿真试验时发现,当两个 Chirp 分量平行且距离较近时,其 WVD 的交叉项在时频空间就位于这两个条直线的几何中点线处,且呈振荡形式(如图 1(a)所示),这样该振荡形式的交叉项在时频平面形成断断续续的直线,图 1(b)中除了 3 条直线以外,其余的 Chirp 分量均为交叉项,当从图像空间映射到参数空间时,由于两个平行 Chirp 分量之间的交叉项位于两条直线几何中点的同一条直线上,因此在参数空间必然是共点的正弦线,即形成伪尖峰,(如图 1(c)所示),原本含有 3 个 Chirp 分量的信号,经过 Hough 变换后出现 4 个尖峰,其中较小的尖

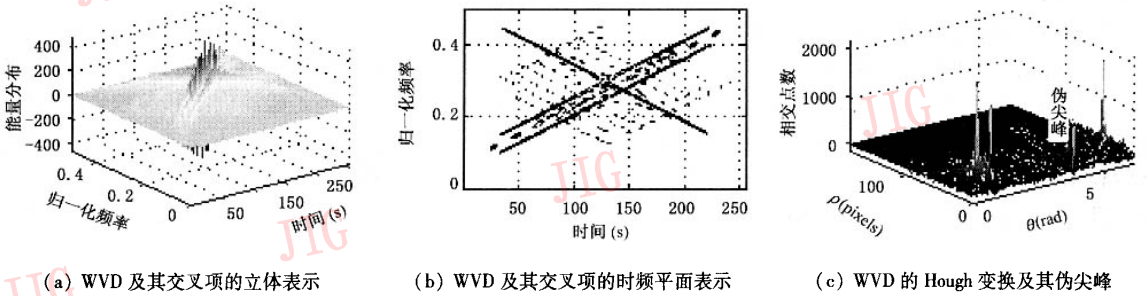


图 1 含有 3 个 Chirp 分量信号的 WVD 及其 Hough 变换

Fig. 1 WVD of three Chirps and its Hough transform

峰是由两个平行 Chirp 分量之间的交叉项引起的伪尖峰,这种伪尖峰的存在,使下一步搜索局部极大值时,在低阈值下检测会造成误判断。

为了消除伪尖峰,必须抑制交叉项,可使用平滑的伪魏格纳-威利分布 (smoothed pseudo WVD SPWVD)对 WVD 进行平滑,其在信噪比为 5dB 时作出的两个 Chirp 信号的 SPWVD 如图 2(a)所示,由图 2(a)可见,SPWVD 虽平滑掉了 WVD 中的交叉项,但

由于同时也减低了信号本身的时频聚集性,从而使信号在时频平面的直线变粗(如图 2(b)所示)。由于平滑交叉项造成线条变粗,致使 Hough 变换时,从图像空间到参数空间需要映射的点增多,这样就增加了 Hough 变换的运行时间,并且能量被分布到参数空间的尖峰附近,也减低了尖峰幅度和参数估计的精度(如图 2(c)所示),因此为了加速 Hough 变换的执行,只对亮度超过某一个值的点才进行变换。

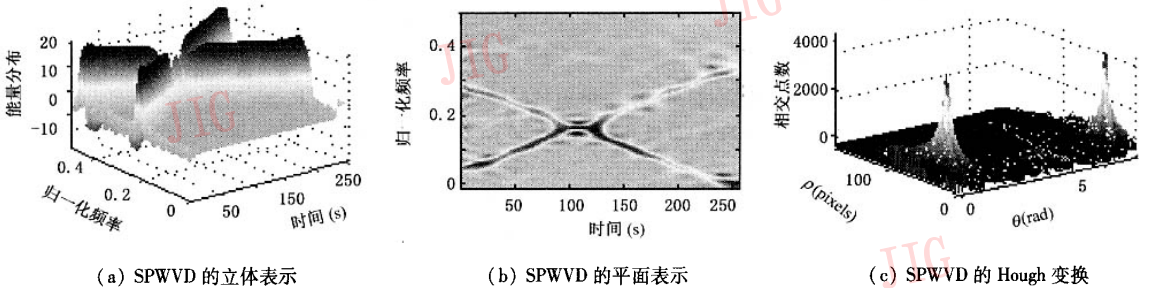


图 2 含有两个 Chirp 分量信号的 SPWVD 及其 Hough 变换

Fig. 2 SPWVD of two Chirps and its Hough transform

3 抽取双线性时频分布图像脊-Hough 变换算法及仿真实验

通过将多分量 Chirp 信号的时频分布图像变换到参数空间来检测图像中的直线及获得相应的参数,并不要求可逆变换,为了提高 Hough 变换对直线定位的准确性和减少 Hough 变换运行时间,由于希望直线在保留所代表的原信号信息不变的条件下,越细越好,为此引入图像处理中的细线化、骨架化和抽取图像脊等概念和方法。因为对图像先进行细化有助于突出对象的形状特点和减少冗余信息,且图像细化后的骨架是图像的中心线,并保持了原图像的连通性。所谓细线化和骨架化就是从线条中

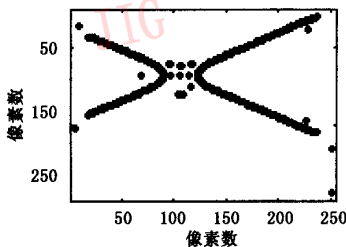
找出位于中央部位、宽度大致为一个像素的中心线,即在不破坏图形连结性的情况下,通过逐渐消去位于边缘上的点来实现细线化,这种细化方法一般需要按照从上至下,从左至右,从下至上,从右至左的顺序对图像反复处理多次,还需要多种细化模板,操作较为麻烦^[6]。若将多分量 Chirp 信号的时频分布作为图像,则图像的脊就标记了信号能量在时频平面最为集中的区域,还包含了信号的特征信息。由于抽取图像脊并没有丢失多分量 Chirp 信号的初始频率和调频斜率等参数信息,因此对抽取的图像脊进行 Hough 变换,仍可正确地检测多分量 Chirp 信号,并可估计其参数。文献[4]采用 Crazy-Climber 算法虽可同时抽取多条脊,但对噪声的稳健性需要改进。本文利用文献[3]提出的时频重排算法,对多分量 Chirp 信号的

双线性时频分布图重新计算其时频分布的重心来提高时频聚集性,同时得到图像中的多条脊,并达到了对图像中的直线进行细化的目的。

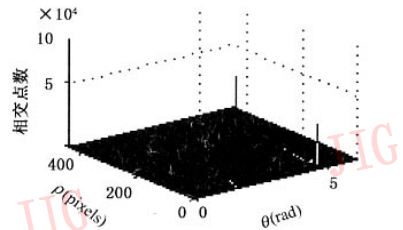
抽取双线性时频分布图像脊-Hough 变换算法的步骤是:首先作出多分量 Chirp 信号的 SPWVD,然后利用时频重排算法抽取该图像的脊,其次对图像脊进行 Hough 变换,并在适当的阈值下,对 Hough 变换的结果进行局部极大值搜索,极大值的个数就是含有 Chirp 分量的个数,最后将每个极大值所对应的坐标 (ρ, θ) 按照公式(2)换算,就可以得到每个 Chirp 分量的初始频率 f_0 和调频斜率 α 。

由两个 Chirp 分量组成的信号,其信噪比为 10dB,对它的 SPWVD 施加基于时频重排的抽取图

像脊算法,所得到的图像脊如图 3(a)所示,其 Hough 变换如图 3(b)所示,与图 2(c)相比,抽取图像脊-Hough 变换方法不仅明显地提高了参数空间的尖峰幅度,而且提高了检测门限和参数估计精度,同时由于直线变细,致使 Hough 变换运行时间大大减少。对于噪声中的多分量 Chirp 信号,其时频分布是多条直线或交叉或平行,而交叉项和噪声则随机分布其中,由于在抽取图像脊后,噪声和交叉项干扰明显减少,在对图像脊进行 Hough 变换时,随机噪声分布共线的概率又远远小于真正共线的点(一个 Chirp 分量),且由共线点的噪声形成的峰值远远低于直线形成的峰值,所以抽取图像脊-Hough 变换方法对噪声有进一步抑制作用。



(a) 抽取的图像脊



(b) 图像脊的 Hough 变换

图 3 两个 Chirp 分量在信噪比为 10dB 时的时频分布的图像脊及其 Hough 变换

Fig. 3 Image ridges of SPWVD of two Chirps and its Hough transform (SNR = 10dB)

4 结 论

将图像处理的理论和方法引入到非平稳信号的时频分析来对信号的时频分布图像进行后处理,以获取信号的特征和参数是一种值得深入研究和探讨的方法。由于 Chirp 信号在时频平面上呈直线,本文提出了先将多分量 Chirp 信号的双线性时频分布作为图像,然后利用时频重排原理抽取图像脊后,再进行 Hough 变换的方法,以进一步改善多分量 Chirp 信号的检测和参数估计性能。该抽取图像脊算法既保留了原信号的时频特征信息,又提高了时频聚集性,同时也平滑了噪声。仿真试验结果表明,该方法不仅消除了因直接对 WVD 进行 Hough 变换交叉项而形成的伪尖峰,而且缩短了 Hough 变换的运行时间,还改进了多分量 Chirp 信号的检测和参数估计的精度和提高了算法的抗噪声性能。

参考文献 (Reference)

1 Boashash B, Mesbah M. Time-frequency methodology for newborn

EEG seizure detection [A]. In: Antonia Papandreou-suppappala Editor. Applications in Time-Frequency Signal Processing[M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2003, 339 ~ 370.

2 Wood J C, Barry D T. Tomographic time-frequency analysis and its application toward time-varying filter and adaptive kernel design for multicomponent linear-FM signals [J]. IEEE Transactions Signal Processing, 1994, 42(8): 2094 ~ 2103.

3 Auger F, Flandrin P. Improving the readability of time-frequency and time-scale representation by the reassignment method [J]. IEEE Transactions Signal Processing, 1995, 43(5): 1068 ~ 1082.

4 Carmona R A, Hwang W L, Torresani B. Multiridge detection and time - frequency reconstruction [J]. IEEE Transactions Signal Processing, 1999, 47(2): 480-492.

5 Zhang Y J. Image Segmentation [M]. Beijing: Publishing House of Science, 2001: 24 ~ 26. [章毓晋. 图像分割 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 24 ~ 26.]

6 Ruan Q Q. Digital image processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 425 ~ 426. [阮秋琦. 数字图像处理学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 425 ~ 426.]