

基于 Hough 变换的任意时频分布线条特征提取

张子瑜, 吴镇扬, 李 想, 任永川

(东南大学无线电工程系, 南京 210096)

摘 要: 时频分布将时(空)域信号变换到时频联合域,揭示出信号的非平稳性、瞬时频率以及频率随时(空)间的变化演进,这其中往往主要含有线条成分,现有的分析方法只能探测直线成分(即线性调频参数),并且只是分析 Wigner 分布.本文进行两方面的推广,一方面将 Hough 变换探测各种参数曲线,可以对任意时频模式的信号进行检测;另一方面推广到任意时频分布,试验结果表明本文方法对于低信噪比的信号,检测可靠性更高,尤其对于自适应时频分布,效果更为满意.

关键词: 时频分布; Hough 变换; 分数傅里叶变换; Rodon-Wigner 变换; FRFT

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 04-0433-03

Hough Transform Based Time-Frequency Representation Curve Character Extraction

ZHANG Zi-yu, WU Zhen-yang, LI Xiang, REN Yong-chuan

(Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The time-frequency analysis can transform the time domain signal into time-frequency domain, and reveal the law of frequency varying with time. In the time-frequency representation, there are many curves. Present methods can only detect line and only be applied on Wigner time-frequency distribution. In this paper we extend in two directions: firstly we extend to apply on arbitrary time-frequency distribution, secondly we extend to detect any kind of curves in time-frequency distribution. Numeric experimentation show that this method can detect curves more robustly for low SNR signals especially applied on adaptive time-frequency distribution.

Key words: time-frequency distribution; Hough transform; Rodon-Wigner transform; FRFT

1 引言

时频分布由于兼具时(空)域-频域的局部化信息,已经成为研究非平稳信号的强有力研究工具.时频分布将时域空域信号变换到时频联合域,揭示出信号的非平稳性、各个时刻瞬时频率以及频率随时间的变化演进,这其中往往主要含有线条成分,为此,人们提出了一些自动提取方法,L. B. Almeida^[5]则从信号分析的角度,利用时频空间再次重新定义了 V. Namias^[4]提出的分数傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)与 Wigner 分布的关系,表明可以用 FRFT 表示 Wigner 分布所有的广义直线边缘分布;S. Barbarossa 提出组合 Wigner-Hough 变换分析提取多个线性调频信号的参数,并将这两种方法的公式组合为一个,这些方法都是探测直线的,即可以对线性调频信号进行检测,无法对曲线进行探测分析,即不能对其它的时频模式的信号进行检测,而且这种方法只局限于 Wigner 分布,而实际信号往往比较复杂,时频分布的信息包括有各种曲线,且由于 Wigner 分布对多分量信号存在严重的交叉项,影响了在时频平面对信号的表示和处理,本文在此基础上进行两方面的推广,一方面用 Hough 变换探测各种参数曲

线,可以对任意时频模式的信号进行检测;另一方面推广到任意时频分布,这样就可以建立一种时频分布线条特征提取的框架:用 Hough 变换来提取任意时频分布中的各种线条特征,包括直线及各种参数曲线如椭圆弧、抛物线、正弦曲线等,并适用于任意的时频分布.

2 现有的方法

2.1 Hough 变换(HI)

Hough 变换是 Hough^[1]于 1962 年提出的形状匹配技术,它可将被检测图像中的参数曲线在参数空间中凝聚起来形成与相应曲线对应的参数峰点,从而得到图像中各个曲线的参数,通常的 Hough 变换需要知道曲线的参数形式.

对于离散的有限图像来说, Hough 变换的思想是将所有可能的线条参数组成的参数空间量化为有限的参数表.

(1) 将该表各个元素初始化为 0;

(2) 对图像中每个点,对所有通过该点的曲线参数的进行累加统计;

(3) 统计完后,参数空间的幅值点的参数对应的就是要检

收稿日期:1999-11-18;修回日期:2000-04-28

基金项目:国家自然科学基金(No. 69871009)

测的原图像中参数线条.

Hough 变换的突出特点是抗干扰性强,对被检测图像的噪声不敏感,即使待检线条有小的扰动或断裂,甚至虚线,进行 Hough 变换后,在参数空间仍能得到明显的峰点. Hough 变换还可以用来检测圆、椭圆、抛物线等任意参数化形状的线条.

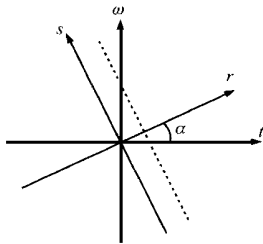


图 1 时频平面的 Radon 变换

2.2 Rodon-Wigner 变换(RWT)

将 Wigner 分布看成是一幅图像, Rodon-Wigner 变换就是沿所有直线作积分:

$$RWT(r, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} WD_x(r \cos \alpha - s \sin \alpha, r \sin \alpha + s \cos \alpha) ds \quad (1)$$

式中新坐标 r, s 分别是 t, ω 轴逆时针旋转 α 后形成的,如图 1 所示.

2.3 分数阶傅立叶变换(FRFT)

Namias 于 1980 年提出并应用于量子力学领域, Almeida^[2] 研究了 FRFT 同 Wigner 分布的关系,给出了 FRFT 在时频空间的物理意义:FRFT 可看作是时频平面 (t, ω) 上的一种旋转变换, n 阶的 FRFT 为 $x(t)$ 在时频平面 (t, ω) 逆时针旋转 α 得到, $\alpha = \pi/2$ 对应的旋转结果为通常的傅立叶变换 $X(\omega)$, FRFT 是傅里叶变换的全族. 该直线域与时间轴夹角为 α , 则 FRFT 定义为

$$X(u) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) K(t, u) dt \quad (2)$$

$$K(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-jctg\alpha}{2}} \exp\left[j\frac{u^2}{2}ctg\alpha - j\frac{tu}{\sin\alpha}\right], & n \\ (t-u), & = 2n \\ (t+u), & = (2n+1) \end{cases} \quad (3)$$

2.4 HT、RWT、FRFT 的关系

Rodon-Wigner 变换与 Wigner-Hough 变换是等价的. FRFT 与 Rodon-Wigner 变换有以下关系

$$RWT(\mu, \alpha) \Big|_{\substack{\mu = ctg\alpha \\ = \mu/\sin\alpha}} = |X(u)|^2 \quad (4)$$

FRFT、Rodon-Wigner 及 Wigner-Hough 变换都只是检测 Wigner 分布的直线成分也就是线性调频信号,为了检测时频分布中存在的广泛的时频变换模式,必须用所有可能的参数化的 Hough 变换进行探测,这是我们对以前的探测方法的一种推广,不过在这种情况下,不能将时频分布与 Hough 变换表达为一个数学表达式.

3 基于 Hough 变换的任意时频分布线条特征提取

由于 Wigner 分布对多分量信号存在严重的交叉项,影响了在时频平面对信号的表示和处理,所以必须将分析线条的方法推广到任意的时频分布,以期产生更为好的探测结果.

Cohen 类的其它成员都是利用交叉项的起伏特性(相对于信号的自分量),对 Wigner 分布进行平滑得到,所以这些分布都可以由平滑用的核函数唯一决定.

核函数可以是固定的,固定的核函数时频分布只对某一

特定类型的信号,时频分布的分辨率较高,性能较好,因为在模糊域,这种信号的自分量绝大部分在核函数的通过区,而交叉项绝大部分在核函数的抑制区. 如果用该固定的核函数时频分布分析其它信号,不可能这样凑巧,固定的核函数不是把信号的自分量削弱了,就是让交叉项得以保留,这样时频分布的结果往往混乱,分不清是信号的自分量还是它们的交叉项,效果往往很差. 因此,对于类型广泛的信号,特别是实际随机信号,用固定的核函数时频分布分析,几乎不可能取得满意的结果.

非固定核函数的时频分布的核函数形状依赖于所分析的信号,通过某种优化方法自适应调整得到,这种方法是根据信号的具体情况具体分析,比较好的适应各种类型的信号,对分析实际有噪声的信号尤其出色,本文更倾向于用非固定核函数,作为 Hough 变换的前端,对信号作时频分布. 用 R. G. Baraniuk 和 D. L. Jones 提出的径向高斯核函数时频分布(RGKD),作为对时频分布的推广,展示本分析方法的优势. 作者还做了另一种自适应核时频分布的推广,效果类似,但计算量太大,在此只采用 RGKD.

RGKD 采用带约束的最优化方法,设计出自适应的核函数. 在模糊域,信号的自分量与交叉分量能够较好的分开:模糊函数的自分量集中在原点,而交叉分量往往远离原点的特性. 他们首先利用了这一特点,巧妙地在模糊域定义了如下优化准则

$$\max \int \int |A_x(\omega, t)|^2 d\omega dt \quad (5)$$

约束:核函数 $A_x(\omega, t)$ 是径向下降或水平的

$$\int \int |A_x(\omega, t)|^2 d\omega dt = 0 \quad (6)$$

其中 $A_x(\omega, t)$ 为信号的模糊函数, $\int \int |A_x(\omega, t)|^2 d\omega dt$ 为核函数的能量体积.

在模糊域,为了极大化优化准则,信号模糊函数 $A_x(\omega, t)$ 大的地方, (ω, t) 也要大,不管它对应的是自分量或交叉分量;然而对核函数 $A_x(\omega, t)$ 的约束式(6),相当于核函数能量体积有限的,如果它保留交叉分量,而由于交叉分量往往远离原点,核函数必在此交叉分量方向有比较远的延伸,这将浪费宝贵的能量体积,核函数在能量体积有限的约束下,为使优化准则极大,核函数 $A_x(\omega, t)$ 将尽可能近的延伸,保留集中在原点的信号模糊函数的自分量,抑制远离原点的交叉分量,并在无信号分量的模糊域区域,模糊函数等于零.

本文以探测直线为例:参数为 (r, α) , r 是原点到该点的距离, α 是原点到该直线的垂线与 x 轴的夹角,采用极坐标方程而不用直角坐标方程的原因,是为了避免垂直线斜率无限大的问题. 将直角坐标系的原点设在图像的中心. 对图像的每一点,统计出通过该点的直线对应的参数 (r, α) , 图像中的直线通过的点多,这些直线的对应参数统计值就大. 最后,找出大的统计值对应的参数 (r, α) , 就是图像中的直线,这就是 Hough 变换.

用两个如下形式的线性调频信号的线性叠加作为测试信号

$$s = A \exp(2\pi j(f_0 + \pi)t) \quad (7)$$

具体参数:初始频率 f_0 分别为 2, 4; 其它参数都相同, 参数采样频率: 1Hz, 时域采样数据长度 $N = 256$, 线性调频率: $r = 10\text{Hz/s}$; 幅值: $A = 1$; 信噪比为 0dB.

为便于对比分析, 将信号的时频分布结果的等高线图与幅值谱及时域波形配套显示, 左面为幅值谱, 下面为时域波形, 中间为时频分布结果的等高线图, 右侧为等高线的高度图例, 表明不同的灰度代表的高度值.

对比可以明显看出 Wigner 分布, 由于存在大量的交叉

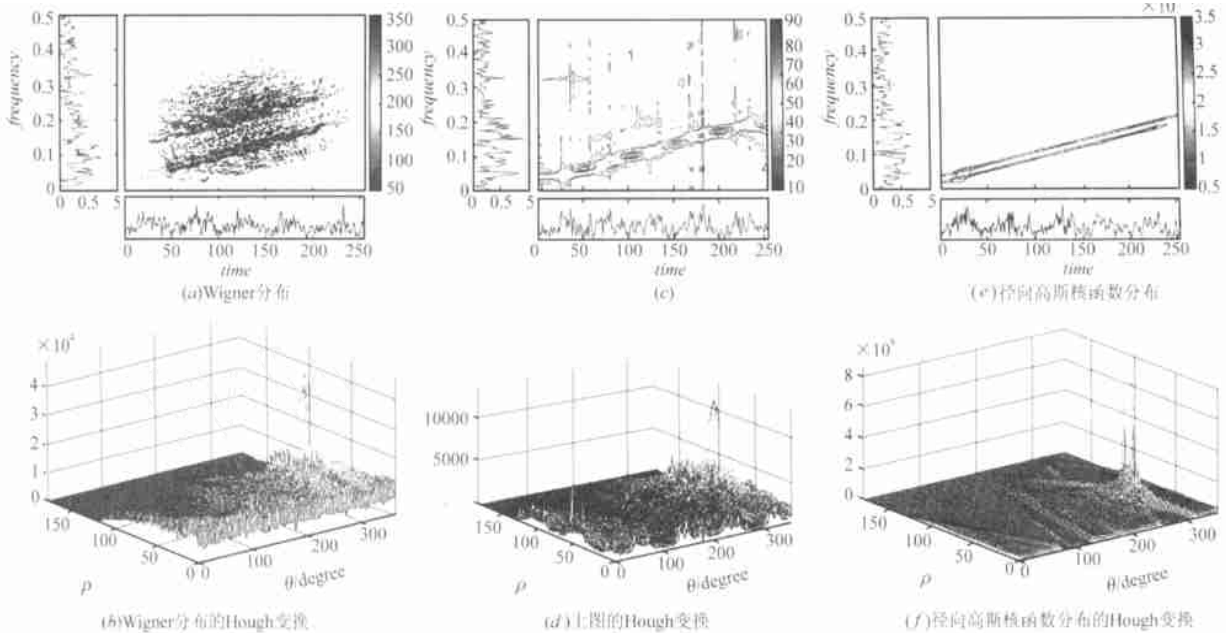


图 2 几种时频分布与 Hough 变换的比较

4 结论

时频分布的结果是一个二维矩阵, 将这个矩阵看作一幅图像, 其中的内容往往是各种线条, 表示信号的频率变化的各种模式, 本文提出的分析方法进行了两方面的推广, 一方面将 Hough 变换探测各种参数曲线, 可以对任意时频模式的信号进行检测; 另一方面推广到任意时频分布, 这样就可以建立一种时频分布线条特征提取的框架: 用 Hough 变换来提取任意时频分布中的各种线条特征, 包括直线及各种参数曲线如椭圆弧、抛物线、正弦曲线等, 并适用于任意的时频分布.

参考文献:

- [1] S. Babarossa. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner Hough transform [J]. IEEE Trans. Signal Processing, June 1995, 43: 1511 - 1515.
- [2] P. V. C. Hough. Method and Means for Recognizing Complex Patterns [P]. U. S. Patent 3069654, 1962.
- [3] 夏良正. 数字图像处理 [M]. 东南大学出版社, 南京, 1999.
- [4] V. Namias. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics [J]. J. Inst. Math. Applicat. 1980 (25): 241 - 265.
- [5] L. B. Almeida. The fractional Fourier transform and time-frequency representations [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1994 (11): 3084 -

项, Hough 变换出现了伪峰; 固定核函数 Choi-Williams 分布由于不能匹配信号的特殊模式, 反而降低了分辨率, 其 Hough 变换将这两个线性调频信号探测为一个, 且这个得到的参数也是错误的. RGKD 清楚干净的表示出两个线性调频信号, 并且 Hough 变换探测出了这两个信号的调频参数.

作者还做了其它信号的分析提取, 效果类似, 在此不赘述.

3091.

- [6] R. G. Baraniuk and D. L. Jones. Signal-dependent time-frequency analysis using a radially Gaussian kernel [J]. Signal Processing, 1993: 263 - 284.
- [7] R. G. Baraniuk and D. L. Jones. A signal-dependent time-frequency representation: Optimal kernel design [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1993 (4): 1589 - 1602.

作者简介:



张子瑜 1969 年生, 1999 年 3 月上海交通大学博士毕业, 现为东南大学无线电工程系博士后. 研究方向: 信号分析理论, 音频编码与语音处理, 声场景分析.

吴镇扬 东南大学无线电工程系教授, 信号与信息处理学科博士生导师. 目前的主要研究方向为听觉与视觉信号处理, 研究内容包括: 听觉感知模型、音频编码、语音信号处理、图像处理以及并行处理等.

李想 1975 年生, 现为东南大学无线电系硕士研究生, 主要研究方向为计算声场景分析算法的实现与研究.