

基于 Radon-Gabor 变换的多分量 LFM 信号检测与参数估计¹

刘爱芳 朱晓华 刘 中

(南京理工大学电子工程系 南京 210094)

摘 要: 该文针对多分量线性调频 (LFM) 信号, 首先提出一种新的变换——Radon-Gabor 变换; 然后阐述了用 Radon-Gabor 变换对 LFM 信号进行检测和参数估计的基本原理, 并结合逐次消去 (Clean) 技术提出了基于 Radon-Gabor 变换的多分量 LFM 信号检测和参数估计实用算法, 计算机仿真结果表明了该算法的有效性。

关键词: Radon-Gabor 变换, 线性调频信号, 参数估计

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)02-0220-05

Multicomponent LFM Signal Detection and Parameter Estimation Based on Radon-Gabor Transform

Liu Ai-fang Zhu Xiao-hua Liu Zhong

(Dept. of Electron. Eng., Nanjing Univ. of Sci. and Tech., Nanjing 210094, China)

Abstract In this paper, a new transform called Radon-Gabor transform(RGT) is proposed firstly, then the basic theory is introduced for Linear Frequency-Modulated (LFM) signal detection and parameter estimation using Radon-Gabor transform. Moreover, a new method combining Radon-Gabor transform with “clean” technique for multicomponent LFM signal detection and parameter estimation is presented. The computer simulation results show its effectiveness.

Key words Radon-Gabor transform, LFM signal, Parameter estimation

1 引言

线性调频 (LFM) 信号是一类非常重要的非平稳信号。LFM 信号的检测和参数估计是信号处理领域一个被广泛关注的问题^[1-5]。尽管国内外学者已经提出了多种有效的处理方法, 包括 Wigner-Ville 分布^[1], Radon-Wigner 变换^[2], 离散 Chirp-Fourier 变换^[3], Radon-Ambiguity 变换^[4] 和 Chirplet 变换^[5] 等, 但多分量 LFM 信号的检测和参数估计问题仍然是一个需要进一步研究的问题。基于与 Radon-Wigner 变换类似的思想, 本文针对多分量 LFM 信号提出了 Radon-Gabor 变换, 并阐述了用 Radon-Gabor 变换进行 LFM 信号检测和参数估计的基本原理。为了解决多分量 LFM 信号在分量强度相差较大时存在的弱分量检测困难的问题, 本文结合逐次消去 (Clean)^[6] 技术, 提出了基于 Radon-Gabor 变换的多分量 LFM 信号检测和参数估计实用算法。仿真实验结果表明了该方法的有效性。

2 基于 Radon-Gabor 变换的 LFM 信号检测和参数估计原理

2.1 Gabor 变换

Gabor 变换^[7] 由 Gabor 于 1946 年首先提出, 它通过信号的时间平移和频率调制形式建立

¹ 2002-10-22 收到, 2003-04-08 改回
863 计划资助课题 (2002AA731142)

非平稳信号的联合时间-频率函数, 然后对时间-频率平面进行采样划分, 将时频平面转换为另外两个离散采样网格函数 m 和 n 的平面, 在二维平面 (m, n) 上表征非平稳信号。信号 $s(t)$ 的 Gabor 展开定义为

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{mn} g_{mn}(t) \quad (1)$$

其中 a_{mn} 为 Gabor 展开系数, $g_{mn}(t)$ 为 Gabor 基函数。Gabor 展开系数的积分表达式称为 Gabor 变换

$$a_{mn} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \gamma_{mn}^*(t) dt \quad (2)$$

其中 $\gamma_{mn}^*(t)$ 是 Gabor 基函数 $g_{mn}(t)$ 的对偶函数。本文用 $G_s(m, n) = a_{mn}$ 来表示信号 $s(t)$ 的 Gabor 变换。

2.2 Radon 变换

Radon 变换是 J. Radon 于 1917 年提出的^[7]。实际上, Radon 变换与从图形特征检测角度提出的 Hough 变换等价。假设 $f(t, w)$ 为平面 (t, w) 上的二维函数, 将原直角坐标系旋转角度 a 得到新的坐标系 (u, v) , 以不同的 u 值平行于 v 轴积分, 所得结果即为 Radon 变换, 其表达式为

$$\Re[f(t, w)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t, w) \delta(t \sin a + w \cos a - u) dt dw \quad (3)$$

Radon 变换实际上就是将平面 (t, w) 上的任意一条直线映射到 (u, a) 平面上的一点, 而平面 (u, a) 上的每一个点 (u_0, a_0) 都唯一地确定平面 (t, w) 上的一条直线 $t \sin a_0 + w \cos a_0 = u_0$, 两者是一一对应关系。Radon 变换的离散形式将在下面给出。

2.3 Radon-Gabor 变换

设信号 $s(t)$ 的 Gabor 变换表示为 $G_s(m, n)$ ($n, m = -M+1, -M+2, \dots, 0, 1, \dots, M-1$)。基于与 Radon-Wigner 变换类似的思想, 本文给出了信号 $s(t)$ 的 Radon-Gabor 变换定义为

$$\text{RG}_s(u, a) = \Re[G_s(m, n)] = \begin{cases} \sum_{i=b1}^{c1} |G_s(i, [u + i \cdot \tan(a)])|, & 0 \leq a < \pi/4, \\ \sum_{i=b2}^{c2} |G_s([(i-u) \cdot \tan(a)], i)|, & \pi/4 \leq a < \pi/2, \\ \sum_{i=b3}^{c3} |G_s([(i-u) \cdot \tan(a)], i)|, & \pi/2 \leq a < 3\pi/4, \\ \sum_{i=b4}^{c4} |G_s(i, [u + i \cdot \tan(a)])|, & 3\pi/4 \leq a < \pi, \end{cases}$$

$$b1 = \text{Fix}\{\max[-M+1, (-M+1-u)\tan(a)]\}$$

$$c1 = \text{Fix}\{\min[M-1, (M-1-u)\tan(a)]\}$$

$$b2 = \text{Fix}\{\max[-M+1, (-M+1)\tan(a) + u]\}$$

$$c2 = \text{Fix}\{\min[M-1, (M-1)\tan(a) + u]\} \quad (4)$$

$$b3 = \text{Fix}\{\max[-M+1, (M-1)\tan(a) + u]\}$$

$$c3 = \text{Fix}\{\min[M-1, (-M+1)\tan(a) + u]\}$$

$$b4 = \text{Fix}\{\max[-M+1, (M-1-u)\tan(a)]\}$$

$$c4 = \text{Fix}\{\min[M-1, (-M+1-u)\tan(a)]\}$$

其中 $[\cdot]$ 表示四舍五入处理, $\text{Fix}(\cdot)$ 表示向原点方向取整。由于 LFM 信号在时频域表现为斜直线且 Gabor 变换是对信号时频域进行二维采样, 因而 LFM 信号在 Gabor 变换域 (m, n) 也呈现斜直线。Radon-Gabor 变换将 Radon 变换和 Gabor 变换结合起来, 对信号 $s(t)$ 的 Gabor 变换谱在各个角度上进行直线投影积分, 故 LFM 信号的 Radon-Gabor 变换谱必能在某个角度 a 上得到最大聚集。因此, 可以利用 Radon-Gabor 变换对 LFM 信号进行检测和参数估计。其基本原理为: 首先计算信号 $s(t)$ 的 Radon-Gabor 变换谱 $\text{RG}_s(u, a)$, 然后对 $\text{RG}_s(u, a)$ 进行二维搜索获得最大峰值对应的角度 a_0 并根据 a_0 估计 $s(t)$ 的线性调频率 K_0 ; 最后根据 K_0 构造解线调参考信号 $s_{r1}(t) = \exp(-j\pi K_0 t^2)$ 并将之与信号 $s(t)$ 相乘得到 $S(t) = s(t)s_{r1}(t)$, 此时 $S(t)$ 已经被校正为一个正弦信号, 对 $S(t)$ 进行 Fourier 变换可以估计得到 LFM 信号的起始频率 f_0 和幅度 A_0 。注意, 在根据 a_0 估计 LFM 信号的线性调频率时, 由于 Gabor 变换谱 $G_s(m, n)$ 的变量为 m 和 n , 因此在估计 K_0 时要将 m 和 n 转换为时间 t 和频率 f , 因此根据 a_0 估计 K_0 的公式为: $K_0 = \tan(a_0)\Delta f/\Delta t$, 其中 Δf 和 Δt 分别为 Gabor 变换的频域采样间隔和时域采样间隔。

有关 Gabor 变换的数值计算方法在文献 [7, 8] 中已有详细的阐述。限于篇幅, 本文不再赘述。

3 基于 Radon-Gabor 变换的多分量 LFM 信号检测和参数估计算法

由上节讨论可知, 可以用 Radon-Gabor 变换来检测 LFM 信号并估计其参数。由上节讨论的原理直接对 LFM 信号进行检测和参数估计, 对单分量 LFM 信号和强度相近的多分量 LFM 信号可以得到较好的效果。但在检测强度相差较大的多分量 LFM 信号时, 则可能存在强分量的杂波掩盖弱分量的问题。为了解决这一问题, 本文结合逐次消去技术, 提出了基于 Radon-Gabor 变换的多分量 LFM 信号的检测和参数估计实用算法。具体的处理步骤为:

- (1) 设 $i = 1$ (i 为搜索 LFM 分量个数), $s(n)$ 为原始信号序列, 序列长度为 N_0 , 采样周期为 T_s ;
- (2) 计算 $s(n)$ 的 Radon-Gabor 变换谱 $\text{RG}_s(u, a)$;
- (3) 在 $\text{RG}_s(u, a)$ 中进行二维搜索, 求得最大值对应的旋转角 a_i , 并计算第 i 个 LFM 分量的线性调频率 $K_i = \tan(a_i)\Delta f/\Delta t$;
- (4) 构造解线调参考信号 $s_{r1}(n) = \exp(-j\pi K_i(nT_s)^2)$, 并将其与信号 $s(n)$ 相乘得到 $s_1(n) = s(n)s_{r1}(n)$; 这时第 i 个 LFM 分量被补偿为频率为 f_{di} 的单频分量, 而其它分量相当于在时频域旋转一个角度, 仍然为 LFM 信号;
- (5) 计算 $s_1(n)$ 的 Fourier 谱 $S(m)$, 并搜索最大峰的位置 n_i 和峰值 b_i , 则该 LFM 分量的参数为: 起始频率 $f_{di} = n_i\Delta f_1$; 幅度 $a_i = b_i/N_0$ (Δf_1 为 Fourier 变换频谱间隔);
- (6) 在频域构造一个中心频率为 f_{di} 的频带极窄的带阻滤波器并对 $s_1(n)$ 进行滤波; 经滤波处理后, $s_1(n)$ 中第 i 个分量被滤除而对其它分量的影响不大;
- (7) 将滤波后的信号乘以解线调参考信号 $s_{r2}(n) = \exp(j\pi K_i(nT_s)^2)$, 将其它分量校正为原来的形式, 从而得到第 i 个分量被滤除的回波信号;
- (8) 置 $i = i + 1$, 重复步骤 (2)-(7), 直到检测不出明显的 LFM 分量为止。

4 仿真实验结果

仿真实验中采用的 LFM 信号包含 3 个 LFM 分量, 按强弱分别将之称为分量 1, 2, 3, 它们的幅度分别为 1, 0.95, 0.3; 起始频率分别为 20.0Hz, 40.0Hz, 120.0Hz; 线性调频率分别为 8.97Hz/s, 40.70Hz/s, 68.84Hz/s; 采样频率 $f_s = 256\text{Hz}$, 信号采样点数 256。仿真中还加入了零均值的高斯白噪声, 它相对于 3 个 LFM 分量的信噪比分别为 10dB, 9.5dB, -0.5dB。仿真

中采用双正交法计算信号的 Gabor 变换^[8]。图 1 和图 2 分别为仿真信号的 Wigner-Ville 分布 (WVD) 和 Gabor 变换。由图 1 可见, 信号的 WVD 能得到理想的时频聚集性, 但由于 WVD 是一种双线性时频分布, 在多分量条件下存在严重的交叉项的影响, 因此, 仿真信号 WVD 中的交叉项和信号项混杂在一起导致信号检测和参数估计的严重困难, 仿真信号中较弱的分量 3 已非常模糊。对比图 1 和图 2 可知, 尽管 Gabor 变换的时频聚集性不如 WVD, 但由于 Gabor 变换为线性时频分布, 在多分量条件下不存在交叉项的影响, 因此, 在仿真信号的 Gabor 变换中能清晰地看出信号所包含的 3 个分量。分别对仿真信号的 WVD 和 Gabor 变换进行 Radon 变换, 其三维图分别如图 3 和图 4 所示。对比图 3 和图 4 可知, 仿真信号的 Radon-Wigner 变换 (RWT) 分辨率较高, 但 WVD 的交叉项导致信号的 RWT 存在很高的旁瓣, 这就会严重影响信号的检测, 且信号的分量越多影响越严重; 相比之下, 仿真信号的 Radon-Gabor 变换 (RGT) 尽管分辨率较低, 但不存在旁瓣的影响, 在多分量信号的检测与参数估计中具有明显的优越性。应用本文提出的方法, 首先计算原始信号 $s(t)$ 的 Radon-Gabor 变换谱 $RG_s(u, a)$, 并根据步骤 (3)–(7) 估计最强分量的参数。图 5 就是根据分量 1 的线性调频率估计值对信号进行解线调校正后的 Fourier 变换谱。由图 5 可见, 经过解线调校正处理, 分量 1 的能量得到最大的聚集。以起始频率 f_{d1} 为中心构造窄带滤波器对分量 1 进行滤除后, 接着从步骤 (2) 开始检测次强分量。图 6 和图 7 为滤除分量 1 后仿真信号的 Gabor 变换和根据分量 2 的线性调频率估计值解线调处理后仿真信号的 Fourier 变换。由图 6 和图 7 可知, 用本文提出的方法能有效地滤除多分量 LFM 信号中各个分量, 从而消除强分量对弱分量检测和参数估计的影响。图 8 和图 9 分别为滤除分量 1, 2 后仿真信号的 RGT 和根据分量 3 的线性调频率估计值解线调处理后仿真信号的 Fourier 变换。由图 8 和图 9 可见, RGT 可以得到比 Gabor 变换更高的信噪比, 且本文提出的基于 RGT 的多分量 LFM 信号检测和参数估计算法, 由于结合逐次消去技术来逐次消除强分量, 从而大大提高了对弱分量的检测能力。最后估计得到的信号参数为: 分量 1, 2, 3 的幅度分别为 0.9877, 0.9594, 0.2988; 起始频率分别为 20.0Hz, 40.0Hz, 120.0Hz; 线性调频率分别为 8.99Hz/s, 40.74Hz/s, 68.87Hz/s。由上述仿真结果可见, 本文提出的基于 RGT 的多分量 LFM 信号检测和参数估计算法具有优良的性能。

5 结论

本文首先提出了一种新的变换——Radon-Gabor 变换 (RGT), 然后讨论了用 RGT 对 LFM 信号进行检测和参数估计的基本原理并结合逐次消去技术提出了相应的实用算法。仿真实验表明该方法具有较好的性能。与检测 LFM 信号常用的 WVD 相比较, 尽管 Gabor 变换的时频聚集性不如 WVD, 但 Gabor 变换不仅是一种线性时频变换, 在多分量情况下不存在像 WVD 分布那样严重的交叉项影响; 而且 Gabor 变换的计算量也比 WVD 少。因此, 本文提出的基于 RGT 的多分量 LFM 信号检测和参数估计算法是一种具有良好应用前景的算法。

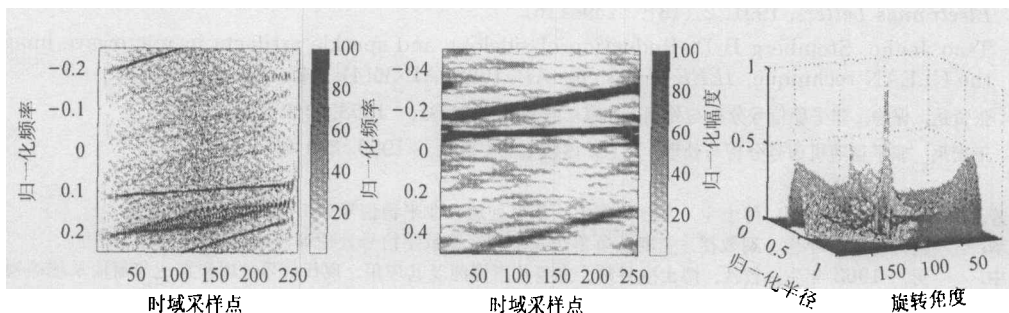


图 1 仿真信号的 WVD

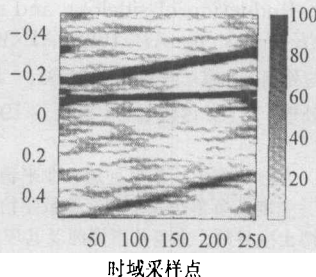


图 2 仿真信号的 Gabor 变换谱

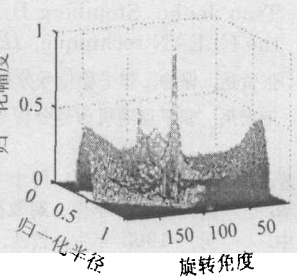


图 3 仿真信号的 Radon-Wigner 变换

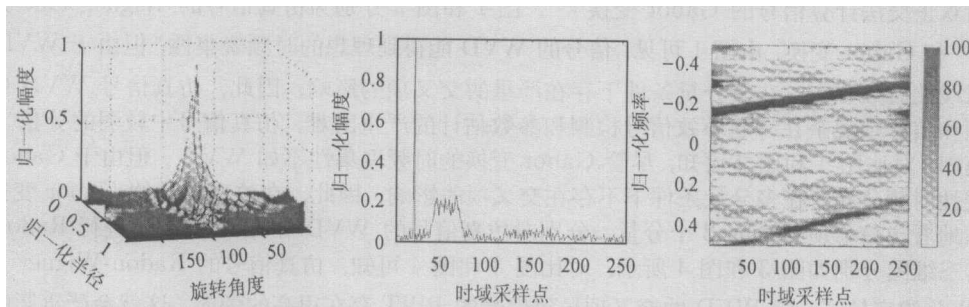


图 4 仿真信号的 Radon-Gabor 变换

图 5 根据分量 1 的线性调频率估计值

图 6 滤除分量 1 后信号的 Gabor 变换

对信号解线调后的 Fourier 变换

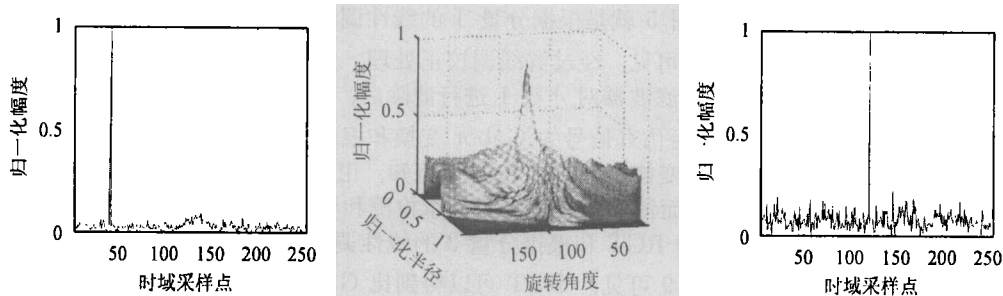


图 7 根据分量 2 的线性调频率估计值

图 8 滤除分量 1, 2 后信号的 Radon-Gabor 变换

图 9 根据分量 3 的线性调频率估计值对信号解线调后的 Fourier 变换

参 考 文 献

- [1] Boashash B, Black P. An efficient real-time implementation of the Wigner-Ville distribution. *IEEE Trans. on ASSP*, 1987, ASSP-35(11): 1611-1618.
- [2] Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform. *IEEE Trans. on SP*, 1995, SP-43(6): 1511-1515.
- [3] Xia Xiang Gen. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation. *IEEE Trans. on SP*, 2000, SP-48(11): 3122-3133.
- [4] Wang M, et al.. Linear frequency-modulated signal detection using Radon-ambiguity transform. *IEEE Trans. on SP*, 1998, SP-46(3): 571-587.
- [5] Mihovilovic D, Bracewell R N. Adaptive chirplet representation of signals on time-frequency plane. *Electronics Letters*, 1991, 27(13): 1159-1161.
- [6] Tsao Jenho, Steinberg B D. Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging: the CLEAN technique. *IEEE Trans. on AP*, 1988, AP-36(4): 543-556.
- [7] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1998, 第 1 版: 1-180.
- [8] 王宏禹. 非平稳随机信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1999, 第 1 版: 126-173.

刘爱芳, 男, 1974 年生, 博士生, 主要从事雷达信号处理和非平稳信号分析与处理方面的研究.

朱晓华, 男, 1966 年生, 副教授, 主要从事雷达系统和高速数字信号处理等领域的研究.

刘中, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事混沌及其应用、现代信号处理和雷达与通信系统等领域的研究.