

多分量线性调频信号的 Wigner-Ville 分布交叉项去除

李秀坤, 吴玉双

(1. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 针对多分量线性调频信号 WVD (Wigner-Ville Distribution) 检测中的交叉项问题, 提出一种交叉项去除方法. 利用自项和交叉项的频率特性, 将 WVD 时频矩阵进行坐标旋转, 在变换域上滤波去除交叉项. 理论推导了矩阵旋转变换公式以及旋转后自项和交叉项的表达式, 并且针对缓慢震荡的交叉项受滤波器性能限制不能完全去除的情况, 提出能量加权的方法进行改进. 仿真和实验结果验证, 该方法不仅能够去除交叉项, 且不会降低分辨率.

关键词: Wigner-Ville 分布; 交叉项; 时频分辨率; 能量加权

中图分类号: TN929.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)02-0315-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.008

Cross-Term Removal of Wigner-Ville Distribution for Multi-component LFM Signals

LI Xiu-kun, WU Yu-shuang

(1. Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: A method of cross-term removal for Wigner-Ville distribution is proposed to the detection of multi-component LFM signals. For the frequency characteristics of auto terms and cross terms, it removes cross terms by filtering WVD time-frequency matrix in the transform domain. The matrix transformation formula and the expression of all terms after transformation are given. And in view of the performance of filter, an energy weighted method is put forward to improve the slow oscillating cross term. Simulation and experimental results demonstrate that, it can eliminate the cross term with no reduction of time-frequency resolution.

Key words: Wigner-Ville distribution; cross term; time-frequency resolution; energy weighted method

1 引言

作为一种常用非平稳信号, 线性调频信号 (LFM, Linear Frequency Modulation) 在雷达、声呐等领域被广泛应用. 对于非平稳信号, 时频分析是一类有效的处理方法, 它能够同时给出信号的时间和频率信息. 尽管大部分的时频表示能够提供很好的时间或频率分辨率, 但是不能兼顾两者, 因此需要一种能够具有更好性能的表达方法, Wigner-Ville 分布 (WVD) 就是其中之一. 相比于其他时频表示, WVD 不含窗函数, 避免了线性时频表示中时间分辨率和频率分辨率的互相牵制, 具有良好的时频聚集性, 时频边缘特性, 没有一种时频分布

的时频分辨率能出其右, 是最重要的时频分析方法^[1].

由于 WVD 是双线性变换, 在处理多分量信号时, 严重的交叉项干扰限制了它对信号的有效分析以及参数提取. 在工程应用中, 所处理的信号大多是多分量信号, 因此, 如何去除多分量信号的 WVD 交叉项干扰并保持其优良特性成为一个重要研究方向. 为此, 国内外许多学者进行了该方面的研究, 并提出一系列交叉项抑制方法, 如核函数法、非线性滤波、信号分解、形态滤波、Hough 变换等. 核函数法^[2]是最早出现的 WVD 交叉项抑制方法, 其本质是加窗平滑, 但往往不能完全去除交叉项, 并且会降低时频分辨率. 核函数的种类有很多, 应根据它们的特点以及待处理信号来进行选择. 文献[3]

提出了一种自适应时频分析方法,利用自适应核对局部模糊函数进行滤波,有效去除了交叉项.非线性滤波^[4]是一种有效的交叉项处理方法,相比于传统的线性平滑和核函数方法,它具有更好的性能,但是也存在计算量大等问题.信号分解是将多分量信号分解成单分量信号,能够有效地抑制交叉项并保持 WVD 的高时频分辨特性.信号分解的方法有很多,如经验模态分解^[5]、小波包变换等,如何简单有效并且正确地实现不同的信号分解,还有待进一步研究.形态滤波^[6]将时频分布化为二值图像来处理,二值化的阈值确定困难,当自项能量不一致时,很难做到既保留全部信号分量又易于形态学处理. Hough 变换作为一种直线检测手段,是由 Paul Hough^[7]于 1962 年提出的,后由 Richard Duda 和 Peter Hart^[8]推广使用. Hough 变换去除交叉项就是对信号的 WVD 进行线积分,利用交叉项的震荡特性,来去除交叉项,实现信号检测.但是该方法最后得到的是在 (ρ, θ) 平面上的点,需要经过进一步变换才能得到时频平面上的信号分布.文献[9, 10]提出了一种块处理的方法,根据 Hough 变换的结果对信号进行分块重构,从而得到信号的时频分布,但是该方法在信号重构过程中是以忽略幅度小的干扰项或信号项为前提的,容易造成信息的损失.

上述这些问题,在多分量 LFM 信号的 WVD 分析中是不可避免的.如何在检测出各个分量的前提下,尽可能地去除交叉项,并保持 WVD 的优良性能,这是我们所关心的.文献[11]采用洁净(CLEAN)技术,将短时傅里叶变换与相位校正函数相结合,对多分量信号的每个分量进行带通滤波,在抑制交叉项的同时保持较高时频聚集性.不同的,本文将多分量 LFM 信号的 WVD 看作待处理对象,根据自项和交叉项的特征差异,对其进行变换域上的低通滤波处理,滤除交叉项,得到信号项,并能实现弱分量检测,且不会对分辨率造成明显影响.

2 多分量 LFM 信号 WVD 交叉项去除

2.1 多分量 LFM 信号的 WVD

线性调频信号是目前应用最广泛的一种非平稳信号,由于具有脉冲压缩的特性,在高精度目标定位等方面被广泛应用,对这类信号最常用的处理方法就是时频分布.作为最早问世的时频分布, Wigner-Ville 分布具有很好的时频聚集性,多用于非平稳信号的处理及分析,以便得到它们在时频平面上的局部特征^[12].其定义是对信号 $x(t)$ 的局部相关函数 $R_x(t, \tau)$ 作关于滞后 τ 的傅里叶变换,即:

$$\begin{aligned} W_x(t, \omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(t, \tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1) \end{aligned}$$

当信号 $x(t)$ 为幅度为 1 的单分量复线性调频信号,即 $x(t) = e^{j\omega_0 t}$ 时,其 WVD 表示为

$$W_x(t, \omega) = 2\pi\delta(\omega - \omega_0) \quad (2)$$

其中, $\omega_0 = 2\pi(f_0 + 1/2\gamma t)$, γ 为调频斜率.可知,信号的 WVD 只在 $\omega = \omega_0$ 处有值,能够清楚地描述信号的时频信息.通常,信号 $x(t)$ 是有限长的,其 WVD 分布沿每个调频斜率方向呈鱼的背鳍状分布,不是理想的带状冲击函数,但这并不影响对信号时频特征的分析.

大多数的待处理信号为多分量信号,用 WVD 进行分析时会受到交叉项的影响.针对不同的情况,交叉项的形状、结构等各不相同,文献[13]给出了详细说明.假设信号由两个 LFM 分量组成, $x(t) = e^{j\omega_1 t} + e^{j\omega_2 t}$, ω_1 和 ω_2 表示两个分量的频率, t_1 和 t_2 分别为 ω_1 和 ω_2 出现的时刻,那么它的 WVD 可表示为:

$$W_x(t, \omega) = W_{\text{auto}}(t, \omega) + W_{\text{cross}}(t, \omega) \quad (3)$$

式中,信号自项为

$$W_{\text{auto}}(t, \omega) = 2\pi[\delta(\omega - \omega_1) + \delta(\omega - \omega_2)] \quad (4)$$

而交叉项为

$$W_{\text{cross}}(t, \omega) = 4\pi\cos(\omega_1 t_1 - \omega_2 t_2)\delta(\omega - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)) \quad (5)$$

从式(4)、(5)可以看出,信号自项是沿着信号两个分量的调频斜率方向上的带状冲击函数,由这两个自项可以正确地检测出两个分量.除了自项以外,还存在一个幅度较大的交叉项,其包络为 $4\pi\cos(\omega_1 t_1 - \omega_2 t_2)$.交叉项的幅度是震荡的,震荡频率与两个分量的频率和时延差有关.因此,可以利用自项和交叉项之间差异来去除交叉项,保留自项.

2.2 交叉项去除方法及实现过程

对于多分量信号,采用 WVD 进行分析时,如何抑制交叉项,提取信号自项,并保持高时频分辨率,是其在工程应用中面临的一个关键问题.本文提出一种旋转变换域上的滤波处理方法,以信号 WVD 时频分布矩阵为待处理对象,利用自项和交叉项频域特征差异,对其进行低通滤波,以达到去除震荡出现的交叉项的目的.滤波操作不仅可以去除交叉项,且不会对分辨率造成影响.为便于实现滤波处理,需对时频分布矩阵进行旋转变换.具体实现流程如图 1 所示.

根据多分量线性调频信号的 WVD 表达式,在时频平面上,自项是常值,而交叉项是震荡的,利用他们在频域上的差异,对 WVD 数据进行旋转变换域上的滤波处

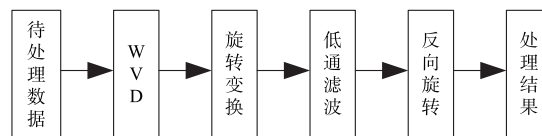


图1 处理实现流程图

理,即可将交叉项进行去除.因此,在处理过程中,对时频分布数据进行旋转变换是关键一步,它既关系到处理结果的准确性,也决定处理时间的长短.由于对数据做 WVD 得到的是信号在时频平面上的二维分布,若要进行一维低通滤波,就需对其进行变换,使得各个分量在变换后可以看作是一维分布.

假设得到的 WVD 时频矩阵大小为 $M \times N$,以 $(M, 1)$ 点为直角坐标系原点,那么该线性调频信号在时频平面中可以看做是一条直线,它是时间 t 和频率 f 的函数.采用数据映射旋转的方法对其进行变换,利用 t 和 f 之间的关系,可以将其变成只包含 t 或 f 的函数.

对于平面坐标系中的任意一条直线都可用 $y = a(x - b)$ 表示,以斜率大于 0,即 $a > 0$ 的情况为例.当 $b > 0$ 时,与 x 轴相交于 b 点,以 $(b, 0)$ 点为原点向 y 轴旋转,则旋转后直线沿垂直方向分布,坐标变换公式为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, x 与 y 分别是原矩阵中数据的横纵坐标, x' 与 y' 是经过矩阵旋转后在新矩阵中的坐标.也就是说,对于原坐标为 (x, y) 点在旋转变换域的坐标为 (b, y) ,只有 y 是变量,可以看作是一维分布的.同样的,当 $b < 0$ 时,与 y 轴相交于 $-ab$ 点,以 $(0, -ab)$ 点为原点向 x 轴旋转,则旋转后直线沿水平方向分布,即:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -a & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (7)$$

对于单分量 LFM 信号,前文已经给出其 WVD 表达式

$$W_x(t, f) = 2\pi\delta(f - f_0) \quad (8)$$

假设调频范围为 $f_L \sim f_H$, 信号持续时间为 $t_L \sim t_H$, $t_H = t_L + T$, T 为脉宽,则 $f = f_0 = f_L + (f_H - f_L)(t - t_L)/(2T)$, 即时频平面中满足该式的 (t, f) 点的值为 2π . 任意一个线性调频信号, $f = f_L + (f_H - f_L)(t - t_L)/(2T)$ 可改写为 $f = 0.5\gamma t + f_L - 0.5\gamma t_L$, γ 为调频斜率,它在时频平面上可看作是一条直线,该直线的斜率根据应用背景的不同,其获取手段也不同.当发射信号参数已知(如主动声呐目标探测)时, a 由先验知识确定;当发射信号参数未知时,就需要通过参数估计得到.关于 LFM 信号参数估计的方法有很多,本文不再赘述.这一直线与时间轴 t 或/和频率轴 f 的正半轴有一个交点, t_a 或/和 f_a , 以其中一个交点为原点进行旋转.这样旋转之后,信号的 WVD 表达式变为

$$W_x(t, f) = 2\pi, t = t_a, f \in [f_L, f_H] \quad (9)$$

或

$$W_x(t, f) = 2\pi, f = f_a, t \in [t_L, t_H] \quad (10)$$

如图 2 所示,该图为调频斜率大于 0 时的旋转变换示意图,对时频平面中所有与该线性调频信号斜率相

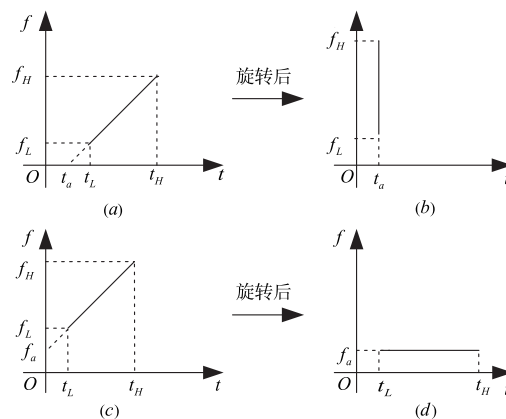


图2 LFM信号旋转变换示意图

同的点都进行以上操作就得到了旋转后的 WVD 分布.同样的,假设信号调频范围为 $f_L \sim f_H$, 脉宽为 T , 对其做 WVD 后选取的时频范围为 $0 \sim f_p, 0 \sim t_p$. 如图 3 所示,对 (a) 中红色部分数据进行旋转变换操作就得到图 3 (b) 所示结果,其中, $\theta = \arctan[(f_H - f_L)/T]$, $t_b = t_p - f_p/\tan\theta = t_p - f_p T/(f_H - f_L)$. 此操作并不是针对时频分布中的所有数据,这样主要是为了在获得所有有用信号的同时减少运算量.由于需要对变换得到的数据进行滤波操作,旋转得到的行或列越少,处理时间也就越少.为了保证有用信号都包含在红色区域内,可根据需要选择不同的 f_p 和 t_p . 当无法判断信号区域时,就要对时频平面中的所有点进行该操作,这时需在时频矩阵的前后或上下补相应长度的零向量即可.当调频斜率小于 0 时,旋转过程类似,也可对其时频矩阵进行上下翻转使斜率大于 0 后再进行旋转操作,在此不再重复.

假设有一个线性调频信号,归一化频率范围为 0.02 - 0.08, 其 WVD 及旋转变换结果如图 4 所示.

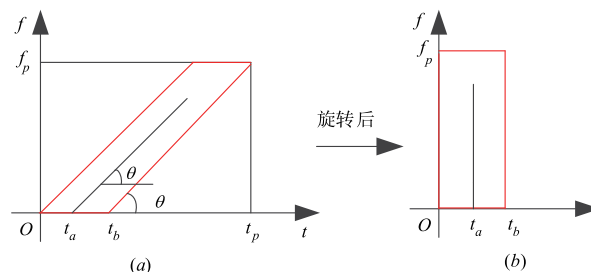


图3 WVD旋转变换示意图

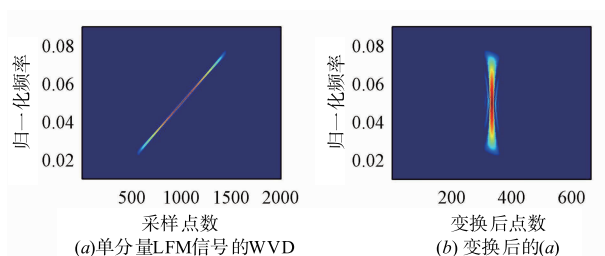


图4 单分量LFM信号WVD及其变换后的结果

对于多分量 LFM 信号,以两个分量为例, $x(t) = e^{j\omega_1 t_1} + e^{j\omega_2 t_2}$,其 WVD 表示由自项和交叉项两部分组成,表达式如式(4)、(5)所示.对于交叉项,其在时频平面中的位置为 $f = (f_1 + f_2)/2$,表达式如下:

$$W_{\text{cross}}(t, f) = 4\pi\cos(2\pi(f_1 t_1 - f_2 t_2))\delta(f - \frac{1}{2}(f_1 + f_2)) \quad (11)$$

假设两个分量调频斜率相同,则旋转变换后表达式为

$$W_{\text{cross}}(t, f) = 4\pi\cos[\frac{4\pi}{\gamma}(2f - f_L)(f_1 - f_2)], \quad (12)$$

$$f = (f_1 + f_2)/2, f_1 \in [f_{L1}, f_{H1}], f_2 \in [f_{L2}, f_{H2}]$$

或

$$W_{\text{cross}}(t, f) = 4\pi\cos[2\pi(f_L + \gamma t)(t_1 - t_2)],$$

$$f = (f_{a_1} + f_{a_2})/2, t = (t_1 + t_2)/2, t_1 \in [t_{L1}, t_{H1}], t_2 \in [t_{L2}, t_{H2}] \quad (13)$$

旋转之后交叉项仍是震荡的.对于由两个参数相同的,

归一化调频频率范围为 0.02 - 0.08 的线性调频分量组成的信号,其 WVD 及旋转仿真结果如图 5(a)和图 5(b)所示.

为了更清晰地对比自项和交叉项在频域上的不同,对旋转后的每一列做 FFT 得到图 5(c)所示结果,分别将图 5(b)和图 5(c)中自项、交叉项所在的列以及其他任意一列提取出来得到图 5(d)和图 5(e)所示结果.对于多分量线性调频信号,自项能量集中在零频附近,交叉项则是分散于不同频率处,在某一频率处存在最大值,该频率与形成此交叉项的自项的调频斜率及它们之间的时延差有关,而在频率零处能量很小,可忽略,如图 5(e)所示.因此,对旋转变换域上的数据进行低通滤波就可以将交叉项滤除,再将处理后的结果反向旋转,就得到了原时频分布去除交叉项后的结果,如图 6 所示.由于线性调频信号的 WVD 时频分辨率与核函数有关,该方法以 WVD 所得时频分布为处理对象,时频分辨率已固定,且处理过程中不存在加窗、平滑等会对分辨率造成影响的操作,因此不会对分辨率造成影响,对比图 5(a)和图 6(b)可以看出.

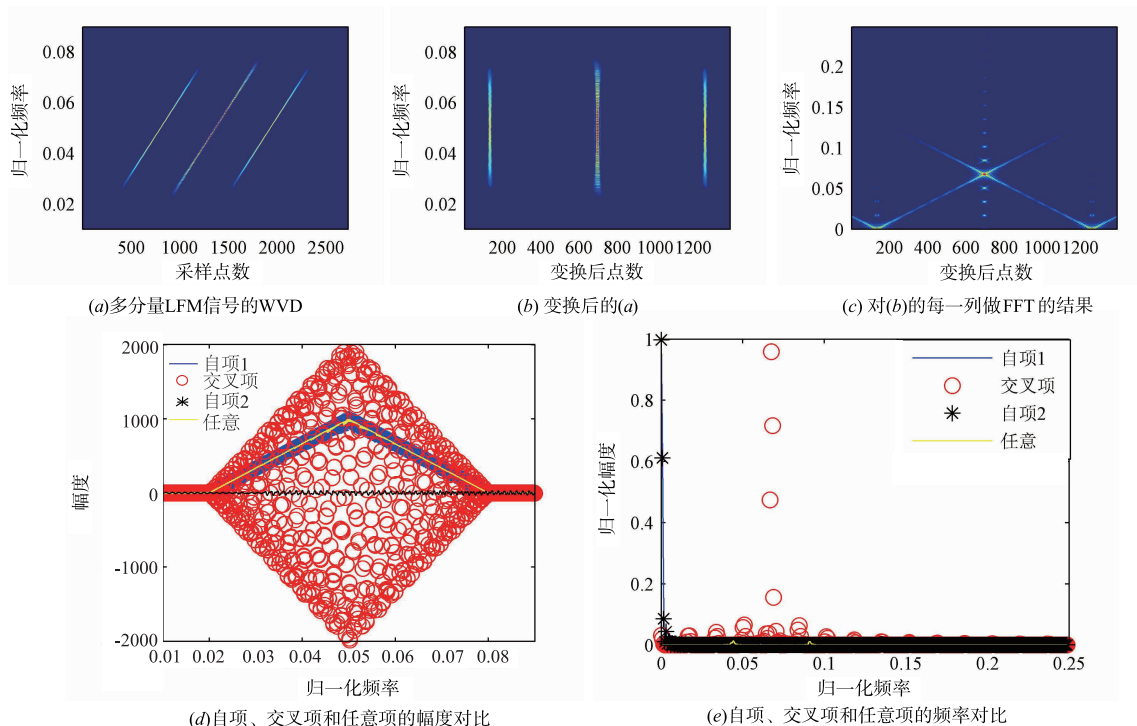


图5 两分量 LFM 信号 WVD 变换前后结果及各成分对比分析

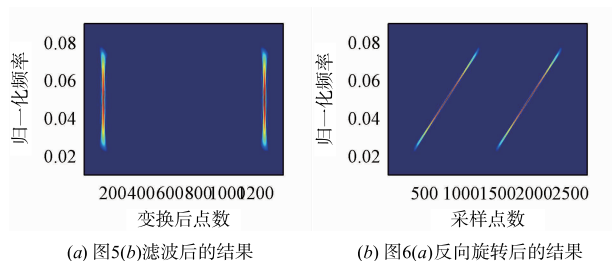


图6 图 5(b) 滤波后及其反向旋转后的结果

3 性能仿真分析及改进说明

3.1 性能仿真分析

为验证该方法的有效性和适用性,选取多分量线性调频信号会出现的两种情况进行仿真说明,一是自项和交叉项重合的情况,二是两个分量出现交叉的情况.

当信号分量大于三个或等于三个时可能会出现交

交叉项和自项重合的情况,仿真条件如下:假设该信号由三个参数相同的 LFM 分量组成,归一化调频范围为:0.02 - 0.08,三个分量出现的时间间隔相等.那么位于中间位置的分量与其他两个分量的交叉项重叠.处理结果前后结果如图 7 所示,处理之后完全去除了交叉项的影响,并且分辨率没有明显变化.由此说明,文章所述方法对于交叉项和自项重合的情况仍适用.

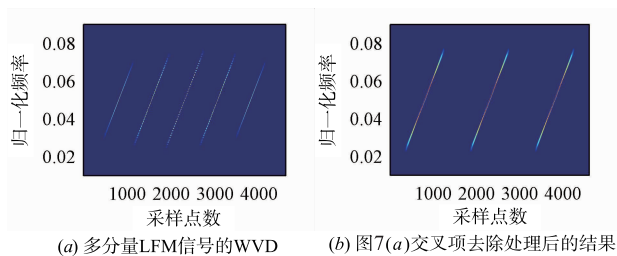


图7 多分量LFM信号的WVD及处理结果

实际应用中还会出现各个分量调频斜率不同的情况,以两个分量为例,假设两个分量出现交叉的情况,这时,就需要将数据分别按两个调频斜率分别进行处理以获得两个独立的分量,最后再将结果叠加.仿真两个分量的归一化调频范围分别为 0.02 - 0.08、0.1 - 0.04,脉宽为 1000 采样点,该信号的 WVD 及处理结果如图 8 所示.处理后,能明显检测出两个分量,由此说明该方法也同样适用于调频斜率不同的多分量 LFM 信号.

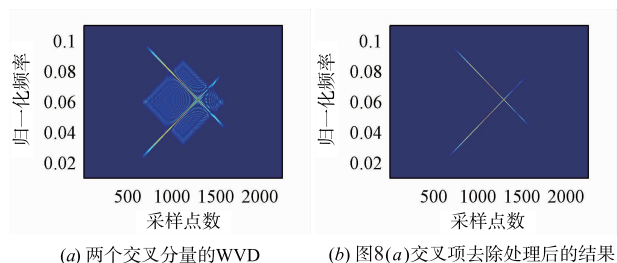


图8 两个交叉分量的WVD及处理结果

3.2 缓慢震荡交叉项消除方法改进

仿真过程中发现,受滤波器性能的影响,当两个调频斜率相同的 LFM 信号在时频平面上间隔较小时,交叉项震荡频率低,采用滤波的方法很难滤除,这时就需要对处理方法进行改进.考虑到旋转后,LFM 分量在矩阵中呈行或列分布,那么对滤波后的每一行或列求和,就得到每一行或列的累加值.由于是对频域求和,我们称之为能量累加.理论上,自项所在位置的累加值最大,交叉项所在位置的累加值最小为零.那么将该累加值作为权值与相应的行或列相乘,这样就能突出自项,弱化交叉项,有效去除缓慢震荡的交叉项.

对比图 9(a) 和图 9(b),未进行能量加权处理前,由于交叉项震荡速度慢,滤波无法去除交叉项;进行能

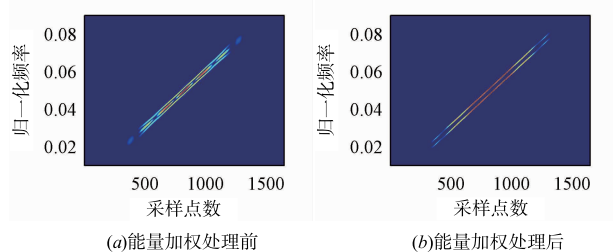


图9 能量加权处理前后结果对比

量加权后,明显去除了交叉项.

4 实验数据处理

为验证该方法在工程应用中的处理效果,对实验数据进行处理,待处理数据为水下目标回波数据.实验目标为半球头圆柱模型,发射线性调频信号并接收目标回波,通过对接收信号进行处理,判断回波个数,以获取目标回波几何亮点结构.

假设垂直于正横方向入射为 0° ,当入射方向与球头方向夹角约为 45° 时,理论上应有 3 个几何回波亮点.实验中接收信号几何回波时域波形如图 10(a) 所示,对该信号做 WVD,得到图 10(b) 所示结果,由于噪声等的影响,无法分辨哪是自项,哪是交叉项,因此很难判断回波个数.采用本文方法处理结果如图 10(c) 和图 10(d) 所示,可以看出,处理后能显著去除交叉项,判断回波个数.只是,对于震荡缓慢的交叉项,尽管能看出它与自项的不同,但去除效果不明显,因此进行能量加权处理.加权处理后,去除所有交叉项,而且加权处理前后对分辨率都没有影响.处理后,很容易判断出回波亮点个数为 3 个,与理论一致.需要说明的是,由于各个分量的能量不同,加权后会使得能量差异变大,但这并不影响交叉项的去除和分辨率.

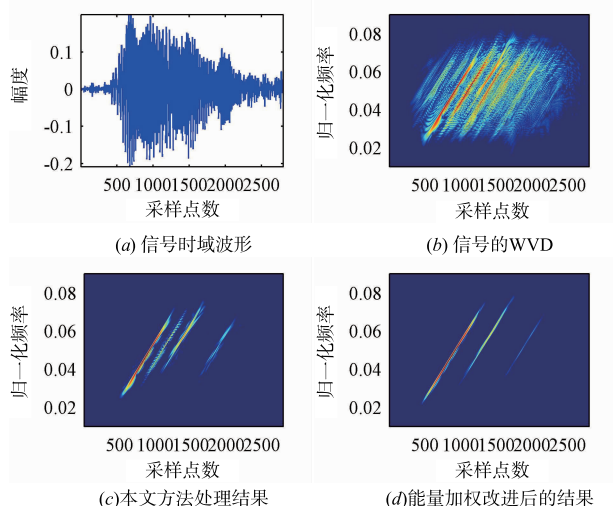


图10 实验数据及处理结果

5 结论

使用 WVD 分析处理多分量线性调频信号时,其结果受交叉项的影响严重. 已有研究表明,交叉项是震荡出现的,大多数的交叉项去除方法也都是利用自项和交叉项的差异来实现的. 本文同样利用自项和交叉项在频域上的差异,将信号的 WVD 作为处理对象,对其进行旋转变换域上的低通滤波处理,以达到去除交叉项的目的. 仿真结果证明,对于多分量 LFM 信号会出现的自项与交叉项重合和自项交叉等情况,该方法都能够有效去除交叉项,且不会对分辨率造成明显影响. 此外,对于受滤波器性能限制无法滤除的缓慢震荡的交叉项,还提出了能量加权的改进方法,改进后可以有效解决该问题. 实验结果证明了该方法的有效性.

参考文献

- [1] 邹红星,周小波,李衍达. 时频分析:回溯与前瞻[J]. 电子学报,2000,28(9):78-84.
Zou Hongxing, Zhou Xiaobo, Li Yanda. Which time-frequency analysis-a survey [J]. Acta Electronica Sinica, 2000,28(9):78-84. (in Chinese)
- [2] M Thomas, B Lethakumary, R Jacob. Performance comparison of multi-component signals using WVD and Cohen's class variants[A]. 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET) [C]. Kumaracoil: IEEE, 2012. 717-722.
- [3] 张德明,李整林,张仁和. 基于自适应时频分析的海底参数反演[J]. 声学学报,2005,30(5):414-419.
Zhang Deming, Li Zhenglin, Zhang Renhe. Inversion for the bottom geoacoustic parameters based on adaptive time-frequency analysis[J]. Acta Acustica, 2005,30(5):414-419. (in Chinese)
- [4] Gonzalo R. Arce. Elimination of interference terms of the discrete Wigner distribution using nonlinear filtering[J]. IEEE Transactions on Signals Processing, 2000, 48(8): 2321-2331.
- [5] 孙世钧,李秀坤. 经验模态分解 WVD 方法的水下目标特征提取[J]. 哈尔滨工程大学学报,2013,34(8):967-971.
Sun Shijun, Li Xiukun. Underwater target feature extraction using empirical mode decomposition and WVD method [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(8):967-971. (in Chinese)
- [6] Gómez S, Naranjo V, Miralles R. Removing interference components in time - frequency representations using morphological operators[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2011, 22(5):401-410.
- [7] L Cohen. Time-frequency distributions-A review[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 7(77):941-981.
- [8] L Cohen. Time-frequency analysis [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1999, 16(1):22-28.
- [9] Azeemsha Thacham Poyil, Shadiya Alingal Meethal. Cross-term reduction using Wigner Hough Transform and back estimation[A]. 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering [C]. Xi'an: IEEE, 2012. 5-8.
- [10] Azeemsha Thacham Poyil, Nasimudeen KM. Multi resolution signal analysis using improved Wigner Ville Distribution[A]. 2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT) [C]. Mumbai: IEEE, 2012. 1-4.
- [11] 王勇,姜义成. 一种抑制时频分布交叉项的新方法[J]. 电子学报,2008,36(12A):161-165.
Wang Yong, Jiang Yicheng. A new method for restrain the cross-terms of time-frequency distributions[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12A):161-165. (in Chinese)
- [12] 张贤达. 现代信号处理(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社,2002. 451-458.
- [13] F Hlawatsch, P Fladrin. The interference structure of Wigner distribution and related time-frequency signal representation[A]. The Wigner Distribution: Theory and Application in Signal Processing (W. Mecklenbr? uker, Franz Hlawatsch) [C]. Amsterdam: Elsevier, 1997. 59-133.

作者简介



李秀坤 (通信作者) 女,1962年12月生,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师. 分别于1989年、2000年获哈尔滨工程大学水声工程专业硕士、博士学位,并于2003年8月至2004年7月前往挪威科技大学访问学习. 主要从事水下目标识别、阵列信号处理等方面的研究.
E-mail: lixiukun@hrbeu.edu.cn



吴玉双 女,1989年10月生,山东聊城人,现于哈尔滨工程大学攻读信息与通信工程专业博士学位,研究方向为水下目标探测、识别、定位.
E-mail: wuyushuang@hrbeu.edu.cn