

一种低副瓣无混叠的线性调频信号时频分析方法

刘会杰^① 高新海^{*①②③} 郭汝江^①

^①(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201203)

^②(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 作为通信与勘探中广泛使用的一类信号, 线性调频信号的参数分析经常采用基于Wigner-Ville分布(WVD)的时频分析方法。该方法具有高时频分辨率, 但在交叉项、高副瓣以及频谱混叠问题上存在缺陷。该文提出一种名为空间变迹重排Wigner-Ville分布(SVA-rWVD)的时频分析方法, 结合空间变迹技术(SVA)的副瓣抑制能力及短时傅里叶变换(STFT)的无混叠无交叉项特性, 得到一个新的时频分布。基于单分量和多分量线性调频信号的仿真实验结果表明, 该方法得到的时频分布可以降低副瓣水平至-40 dB以下同时消除交叉项及频谱混叠现象。

关键词: 时频分析; 线性调频信号; Wigner-Ville分布; 空间变迹; 短时傅里叶变换

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)11-2614-09

DOI: 10.11999/JEIT181190

A Time-frequency Analysis Method for Linear Frequency Modulation Signal with Low Sidelobe and Nonaliasing Property

LIU Huijie^① GAO Xinhai^{①②③} GUO Rujiang^①

^①(Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China)

^②(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China)

^③(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Chirp signals are widely used in communication and exploration. The parameter analysis of the chirp signals often uses a Wigner-Ville Distribution (WVD) based time-frequency analysis method, which achieves high time-frequency resolution. However, this method has defects in cross terms, high sidelobes, and spectral aliasing problems. To solve these problems, a time-frequency analysis method called Spatially Variant Apodization-rearrange Wigner Ville Distribution (SVA-rWVD) is proposed, which achieves low sidelobes by exploiting the Spatially Variant Apodization (SVA) techniques, and avoids the cross terms and the spectral aliasing problems by applying the Short Time Fourier Transform (STFT). Furthermore, a new time-frequency distribution is obtained from the proposed method. Extensive simulations show that the time-frequency distribution obtained by the proposed method not only reduces the sidelobe level to -40 dB but also eliminates cross terms and spectral aliasing for both single-component and multi-component chirp signals.

Key words: Time-frequency analysis; Linear Frequency Modulation (LFM); Wigner-Ville Distribution (WVD); Spatially Variant Apodization (SVA); Short Time Fourier Transform (STFT)

1 引言

根据信号的频率、功率谱等统计特征, 能够将其分成非平稳信号和平稳信号。其中, 根据信号的频率是否随时间线性变化可将非平稳信号分为非线性

调频信号和线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号。LFM信号作为大时间-频带积的扩频信号^[1], 广泛出现在雷达、通信、声呐和地震勘探等系统^[2], 具有较高的研究价值。

非平稳信号的时频分析工具主要包括两类^[3], 一类是以短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)和小波变换为代表的线性变换方法, 另一类是以Wigner-Ville分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)为代表的2次方法。

STFT等线性变换方法对多分量的非平稳信号

收稿日期: 2018-12-28; 改回日期: 2019-05-27; 网络出版: 2019-08-23

*通信作者: 高新海 gXH777@mail.ustc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(91738201), 上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1418200)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (91738201), Shanghai Sailing Program (17YF1418200)

进行分析时不产生交叉项。但STFT通过在时域加滑动窗来计算信号频谱，因此相关的时间、频率分辨率受测不准原理制约，无法同时兼顾并达到最优。另外，由于STFT对信号进行了分段加窗，因此还存在窗口大小选择的问题。

WVD具备理论上最高的时频分辨率以及许多优异的数学性质^[4]，高时频分辨率可以更好地估计一些重要的参数比如瞬时频率^[5]，因此经常作为时频分析的主要工具，但由于WVD是双线性变换，因此存在严重的交叉项干扰，它降低了信号时频分布的分辨率，含混了信号的原始特征，妨碍了其对信号的有效分析、解释和参数提取，国内外学者对交叉项抑制问题进行了广泛研究^[6-8]，提出了核函数方法^[9](如平滑伪Wigner分布)、信号分解算法(如基于小波变换^[10])以及多谱图叠加法^[11]等方法。除了交叉项问题，WVD还存在两个缺陷：

(1)非平稳信号的WVD谱中含有副瓣，使得对其输出的解释变得困难。当多分量信号存在时，强分量的输出副瓣很可能会混淆或者湮没弱频谱分量的主瓣，导致观测分辨率的下降，影响对弱分量的探测，因此必须进行副瓣抑制。学者们提出很多抑制副瓣的方法，总体来说可以分为两类，第1类为通过使用线性加权方法来抑制副瓣，如经典窗加权，常用的经典窗有汉宁窗、汉明窗、布莱克曼窗和切比雪夫窗等，但经典窗加权算法都是在窄主瓣和低副瓣之间做一个折中，无法同时兼顾；第2类是采用非线性变迹算法^[12]，该技术已经被应用在合成孔径雷达成像^[13,14]以及超分辨率技术^[15]等领域，其基本原理是通过在每个像素点寻求最优的加权系数，以便空间相近的分量有一个很好的分辨率，同时使得保持矩形窗主瓣宽度的同时降低副瓣。非线性变迹算法有良好的副瓣抑制能力，但结合时频分布的研究比较少。文献^[16]结合非线性变迹算法对WVD进行了副瓣抑制，但其只分析了单分量的LFM信号，关于多分量LFM信号下的交叉项问题并未进行分析解决。

(2)信号经过离散WVD后在频率域的周期将变为采样率的一半，因此即使采样率等于奈奎斯特率，WVD仍然会产生混叠现象。频域混叠会使得信号的时频图中本不存在信号的区域出现频谱分量，或者使得本来有信号的区域混入其它的频谱分量，对信号信息的准确提取带来困难。处理这一问题的直接措施是增加采样频率，但有时候，一旦信号被采样后，要想对其重新采样是困难的，另外，提高采样率也会提高运算量，带来额外硬件开销。

为了在不提高采样率的情况下，得到低副瓣无

混叠无交叉项的时频分析结果，本文第2节结合了空间变迹(Spatially Variant Apodization, SVA)算法及重排WVD无混叠算法，提出了SVA-rWVD方法，第3节结合单分量LFM信号和多分量LFM信号对该方法进行仿真验证，第4节总结全文。

2 SVA-rWVD方法

SVA算法属于非线性变迹算法的一种，已经验证其对单分量LFM信号有良好的副瓣抑制能力。从理论上说，对多分量LFM信号同样适用，可以用来抑制其副瓣。另外，STFT作为一种线性变换，没有WVD固有的混叠现象，也不存在交叉项干扰，时频图可以反映信号各个分量的真实分布，因此可以用来作为WVD时频图中信号自项的支撑区域，结合WVD的高时频分辨率，得到最终无混叠的时频分布。

因此，SVA-rWVD方法将按照先抑制副瓣后消除混叠的顺序对信号进行处理，首先将SVA算法引入WVD进行副瓣抑制，接着对通过SVA算法处理得到的时频矩阵进行重排，最后结合STFT作Hadamard积^[17]，得到低副瓣无混叠的时频图。

2.1 空间变迹(SVA)算法

常见的非线性变迹算法有3种：双变迹，三变迹和SVA算法。双变迹计算两次脉冲响应，一次不加窗，另一次使用加了权重的窗函数比如汉宁窗，然后在每个频点处，选择模值最小的脉冲响应进行输出。把以上窗函数的形式扩展到3个，就是三变迹算法。随着窗函数类型的增加，脉冲响应图中副瓣在不断降低，双变迹的第2副瓣可以降到-31 dB，三变迹的第2副瓣可以下降到-40 dB以下^[12]。

经过上述分析，可以推测随着变迹次数(窗函数类型)的进一步增多，可以在保证主瓣宽度最低的情况下不断降低副瓣水平，这即本文所采用的SVA算法的核心思想，该方法如下：

SVA算法使用了一个1阶升余弦函数来减小一个频点到下一个频点到副瓣水平，这个函数可表示为

$$A(n) = 1 + 2w \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), 1 < n \leq N-1 \quad (1)$$

其中， $w = 0$ 时表示矩形窗， $w = 0.43$ 表示汉明窗， $w = 0.5$ 表示汉宁窗，因此， w 的选择就会直接影响着主瓣分辨率和副瓣水平。

对式(1)的1阶升余弦函数进行离散傅里叶变换可得 $a(m) = w \cdot \delta_{m,-1} + \delta_{k,0} + w \cdot \delta_{m,1}$ ，这里 $\delta_{m,j}$ 为delta函数。可以看出，时域加窗相当于在频域的3点卷积。假设未加窗时的频谱可以表示为 $f(m) = I(m) + iQ(m)$ ，利用上面的3点卷积函数，可以得到

$$f'(m) = w(m) \cdot f(m-1) + f(m) + w(m) \cdot f(m+1) \quad (2)$$

其中, $w(m)$ 由每一个 m 的值确定。

按照和双变迹等算法同样的处理方式, 可以将SVA算法转换为式(3)所示约束优化问题

$$\min_{w(m)} (|f'(m)|^2), \text{ s.t. } 0 \leq w(m) \leq 0.5 \quad (3)$$

式(3)中之所以将参数限定在 $0 \sim 0.5$ 是要限制时域的窗函数处在矩形窗和汉宁窗之间。对式(3)求解有 $I-Q$ 分离算法以及 $I-Q$ 联合算法, 这里只给出 $I-Q$ 分离算法的原理。

$I-Q$ 分离算法分别对未加窗信号的 I 路与 Q 路进行单独处理, 以 Q 路信号举例, 计算 $|f'(m)|^2$ 关于 $w(m)$ 的导数, 解得 $\hat{w}(m) = -f(m)/(f(m-1) + f(m+1))$, 将其代入式(2), 可得

$$f'(m) = \begin{cases} f(m), & \hat{w}(m) < 0 \\ 0, & 0 \leq \hat{w}(m) \leq 0.5 \\ f(m) + 0.5[f(m-1) + f(m+1)], & \hat{w}(m) > 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

对 I 路信号进行同样的操作, 从以上推导可知, $I-Q$ 分离算法实际上是分别使得实部和虚部的能量 I^2 和 Q^2 的输出最小。

2.2 SVA算法应用于WVD

信号 $x(t)$ 的Wigner-Ville分布记为 $WVD(t, f)$, 用 $W(n, k)$ 代表信号的WVD谱, 利用上面的3点卷积器与之卷积, 则 $W(n, k)$ 将会被替换为 $W'(n, k)$

$$W'(n, k) = w(n, k) \cdot W(n, k-1) + W(n, k) + w(n, k) \cdot W(n, k+1) \quad (5)$$

为了在每个 k 值处获得最佳的窗函数来提供最窄的主瓣和最低的副瓣, $w(n, k)$ 将会根据能量最小化原则, 最小化 $|W'(n, k)|^2$, 解出 $w(n, k)$ 的值, 有

$$\hat{w}(n, k) = -\frac{W(n, k)}{W(n, k-1) + W(n, k+1)} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5), 则有

$$W'(n, k) = \begin{cases} W(n, k), & \hat{w}(n, k) < 0 \\ 0, & 0 \leq \hat{w}(n, k) \leq 0.5 \\ W(n, k) + 0.5[W(n, k-1) + W(n, k+1)], & \hat{w}(n, k) > 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

综上, 将SVA算法引入到WVD的步骤如下:

步骤1 求出信号的WVD;

步骤2 在每个时刻 n , 由式(6)求出 $\hat{w}(n, k)$ 的值;

步骤3 利用式(7), 求出每个时刻 n 的 $W'(n, k)$ 值, 作为最终的WVD谱, 记为 $WVD(n, k)$ 。

2.3 重排WVD无混叠算法

2.3.1 混叠现象的原因分析

将 $x(t)$ 变成 $x(n)$ 后, $x(n)$ 的频谱 $X(e^{j\omega})$ 将变成周期的, 周期为 2π (对应采样频率), 易证明WVD同样也是周期的, 但周期为 π , 即 $WVD(n, \omega + \pi) = WVD(n, \omega)$ 。

如果信号的最高频率为 f_{\max} , 那么采样频率至少应满足 $f_s \geq 2f_{\max}$, 这是由采样定理决定的。如若按 $f_s = 2f_{\max}$ 对 $x(t)$ 采样, 并对采样后的 $x(n)$ 做WVD, 由于其WVD的周期为 π , WVD中 $\pi/2 < |\omega| < \pi$ 范围的频谱将被折叠到 $|\omega| < \pi/2$ 的范围中, 因此在WVD中必将产生严重的混叠。

与此不同的是, 按照同样的采样频率 $f_s = 2f_{\max}$, 并对采样后的 $x(n)$ 做STFT, 结果就不会产生混叠现象。

信号 $x(t)$ 的STFT记为 $STFT(t, f)$, 其离散形式为 $STFT(n, k)$, STFT的谱图定义为STFT模的平方

$$S(n, k) = |STFT(n, k)|^2 \quad (8)$$

易得: $STFT(n, \omega + 2\pi) = STFT(n, \omega)$, 即STFT在频域的周期为 2π 。这是一个非常重要的不同之处: 同样的 $f_s = 2f_{\max}$ 采样频率下, WVD会产生混叠, 而STFT不会。

2.3.2 重排WVD无混叠算法

结合上文对STFT优点的分析, 重排WVD无混叠算法如下:

步骤1 由式(8)计算出信号的短时傅里叶变换谱图, 为统一起见, 将结果记为 $STFT(n, k)$;

步骤2 按照2.2节的步骤获取由SVA算法处理得到的新的WVD谱, 记为 $WVD(n, k)$;

步骤3 将WVD谱中, $[0, 0.25]$ 范围的部分复制至WVD谱的下方, $[-0.25, 0]$ 范围的部分复制至WVD谱的上方, 得到新的重排后的时频矩阵 $rWVD(n, k)$;

步骤4 对STFT时频矩阵 $STFT(n, k)$ 进行插值, 使其与时频矩阵 $rWVD(n, k)$ 的点数相同;

步骤5 最后对 $rWVD(n, k)$ 和 $STFT(n, k)$ 进行线性映射, 作Hadamard积

$$SVA - rWVD(n, k) = STFT(n, k) * rWVD(n, k) \quad (9)$$

其中, $*$ 代表计算 $STFT(n, k)$ 和 $rWVD(n, k)$ 的Hadamard积, $SVA - rWVD(n, k)$ 为最终的分布。

为了从理论上论证重排WVD算法的有效性, 不失一般性, 可以考虑由两个LFM信号组成的多分量信号 $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$, 该信号离散化得到 $x(n) = x_1(n) + x_2(n)$, 其WVD经过SVA算法并重排处理后得到的结果可以表示为

$$\begin{aligned} \text{rWVD}_x(n, k) = & \text{rWVD}_{x_1}(n, k) + \text{rWVD}_{x_2}(n, k) \\ & + \text{rWVD}_{x_1x_2}(n, k) + \text{rWVD}_{x_2x_1}(n, k) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\text{rWVD}_{x_1}(n, k)$ 和 $\text{rWVD}_{x_2}(n, k)$ 为信号自项, $\text{rWVD}_{x_1x_2}(n, k)$ 和 $\text{rWVD}_{x_2x_1}(n, k)$ 为交叉项。

$$\begin{aligned} \text{信号 } x(n) \text{ 的 STFT 可以表示为 } & \text{STFT}_x(n, k) = \\ & \text{STFT}_{x_1}(n, k) + \text{STFT}_{x_2}(n, k), \text{ 结合式(9), 有} \\ \text{SVA-rWVD}(n, k) = & \text{STFT}_x(n, k) * \text{rWVD}_x(n, k) \\ = & \text{STFT}_{x_1}(n, k) * \text{rWVD}_{x_1}(n, k) \\ & + \text{STFT}_{x_2}(n, k) * \text{rWVD}_{x_2}(n, k) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, 由于信号WVD时频图中与交叉项相对应的STFT谱图为0, 故 $\text{rWVD}_{x_1x_2}(n, k)$ 与 $\text{STFT}_{x_1}(n, k)$ 作Hadamard积的结果也为0, 因此该项可以消掉, 则最终输出的频谱中, 混叠现象和交叉项都已经被消除, 且保持了WVD的高时频聚集性和高分辨率特性。

3 仿真实验与结果分析

为验证本文方法的有效性, 进行了仿真实验。建立的信号模型为^[18]

$$x(t) = \sum_{k=1}^Q e^{j2\pi(f_k t + 1/2 m_k t^2)} + n(t) \quad (12)$$

其中, Q 为信号分量的个数, f_k 为信号的初始频率, $m_k = B/T$ 为调频斜率, 其中 B 是带宽, T 是脉冲宽度, $n(t)$ 为零均值、方差为 σ^2 高斯白噪声。信号的仿真参数设置如表1所示。

注意到选用的采样率满足 $f_s = 2f_{\max}$ (采样率等于带宽)。同时为了对比, 选用了几种主流的时频分析方法, 分别是STFT(使用了Gauss窗, 窗长是采样点数的1/4), WVD以及平滑伪Wigner-Ville分布(Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution, SPWVD)。

3.1 单分量LFM信号处理结果

先分析SVA-rWVD方法在单分量LFM信号下的表现, 结果如图1所示。

对于归一化频率为 $[-0.5, 0.5]$ 的LFM信号, 其时频分布理论上应该是一条直线, 如图1(a)所示。图1(b)是该LFM信号短时傅里叶变换的结果, 它可以正确反映信号的时频分布, 不过其主瓣比较宽, 故时频聚集性稍差。图1(c)是Wigner-Ville分布, 其时频聚集性较短时傅里叶变换有了非常大的提升, 不过正如2.3.1节分析的, 它出现了混叠现象, 即其频率范围只有采样频率的一半, 在 $[-0.25, 0.25]$ 频率范围以外的频谱成分混叠进入了 $[-0.25, 0.25]$ 频率范围。图1(d)是平滑伪Wigner-Ville分布, 这种分布一般用来消除多分量信号存在时产生的交叉项。平滑伪Wigner-Ville分布和图1(c)的WVD一样, 都无法避免混叠现象, 而且它的时频聚集性也比较差。

图1(e)是使用了本文SVA-rWVD方法的分析结果, 从结果可以看出成功地消除了混叠现象, 并且具备WVD的高主瓣分辨率, 是4种方法中性能最优的。为进一步说明这一点, 取4种方法时频图中的时间切片^[16]进行对比, 如图1(f)所示, 其中 $T = 400 \mu\text{s}$ 。

由图1(f)可知, 短时傅里叶变换和平滑伪Wigner-Ville分布的副瓣尽管都比较低, 但其主瓣都很宽, WVD的主瓣宽度和SVA-rWVD方法一致, 但它的副瓣没有得到抑制。图2是图1(f)取对数得到的结果, 可见SVA-rWVD方法的副瓣可以降到-40 dB以下, 达到了非常好的抑制效果。

3.2 SVA-rWVD方法消除混叠现象的原理

为了更清晰地说明SVA-rWVD方法消除混叠现象的原理, 结合3.1节的单分量LFM信号仿真结果进行理论分析, 如图3所示。

图3(a)为理论上的该LFM信号的时频分布, 由于混叠的原因, 实际的WVD如图3(b)所示, 原本在 $[-0.5, -0.25]$ 范围的信号被折叠至 $[0, 0.25]$, 原本在 $[0.25, 0.5]$ 范围的信号被折叠至 $[-0.25, 0]$, 该理论分析与图1(c)的实际结果是吻合的。按照2.3节的重排WVD无混叠算法对WVD时频矩阵进行重排, 即可将原本的信号恢复出来。

3.3 多分量LFM信号处理结果

单分量LFM信号的仿真初步验证了本文方法

表1 仿真参数设置

参数名称	单分量LFM(图1)	多分量LFM(图4)	多分量LFM(图6)
脉冲宽度(μs)	1024	1024	1204
带宽(MHz)	1	1	1
采样率(MHz)	1	1	1
时间切片(μs)	400	500	300
频率范围(kHz)	-500~500	3个分量均为-500~500, 且时间间隔相同	-300~-100 0~300 -500~500

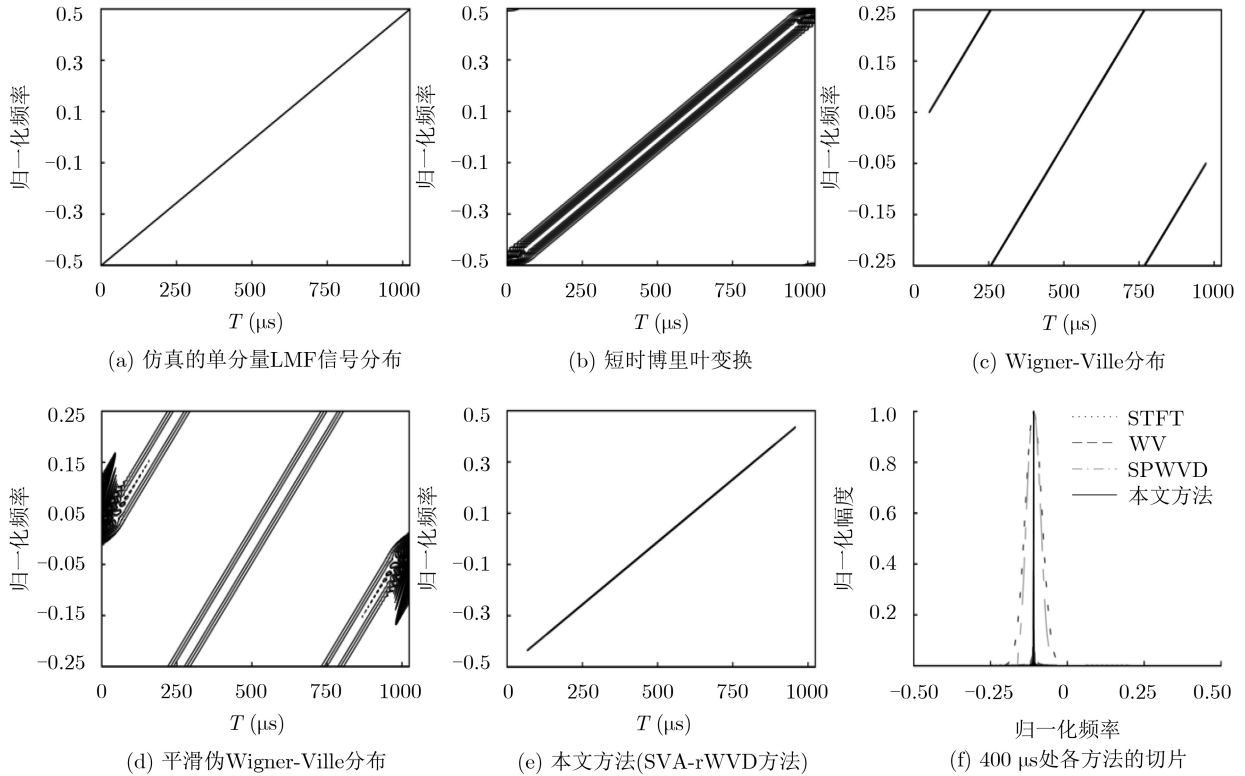


图1 单分量LMF信号的时频分析结果对比

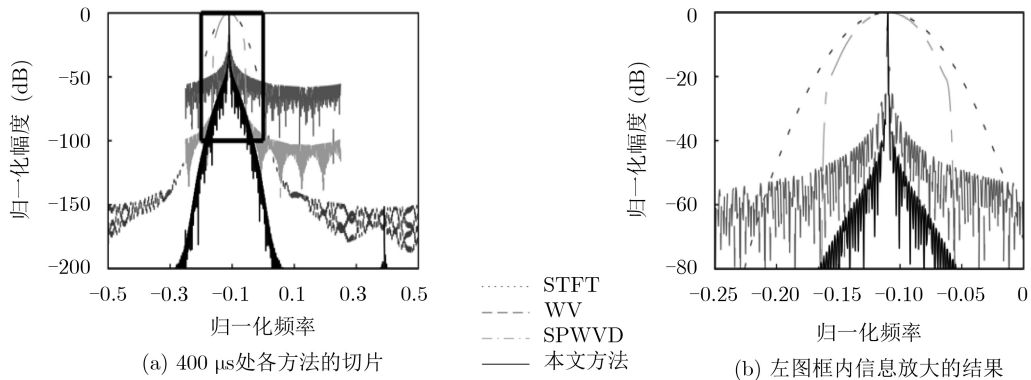


图2 时间切片比较结果(取对数进行分析)

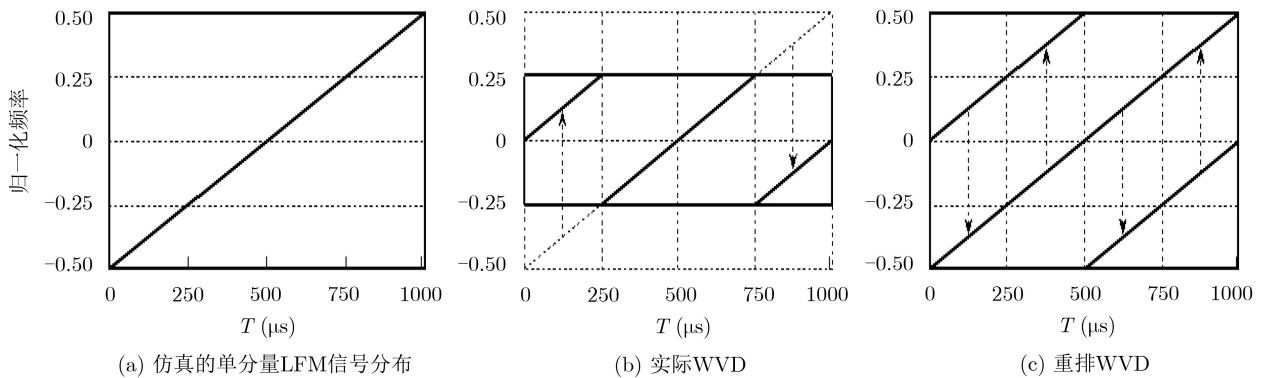


图3 SVA-rWVD方法消除混叠现象的原理

的效果, 接下来考虑较为复杂的多分量情况, 综合考虑多分量的数量、位置以及噪声的影响。为了验

证该方法的有效性和适用性, 选取多分量LMF信号会出现的两种情况^[2]进行仿真说明。

3.3.1 交叉项与自项重合的情况

当信号分量大于等于3个时，可能会出现交叉项和自项重合的情况，对于参数相同且出现的时间间隔相等的3分量情况，位于中间位置分量的自项会与其它两个分量的交叉项重叠，处理结果如图4所示。

图4(a)是该多分量LFM信号的理论分布，它在时频面应显示为3条直线，图4(e)是本文SVA-rWVD方法的结果，在引入了低副瓣无混叠算法以后，它的性能较图4(b)图4(c)图4(d)的方法均有了显著的提升，Wigner-Ville分布的交叉项被成功滤除，而且消除了混叠现象，其时频图中频率的分布范围与理论分布一致。为分析其副瓣的抑制情况，与单分量仿真时的做法一样，取4种方法时频图中的时间切片进行对比，如图4(f)所示，其中 $T = 500 \mu\text{s}$ 。

因为WVD的交叉项干扰非常严重，几乎无法从时间切片中找到准确的频率范围，故在比较的时候将其删去。对图4(f) $T = 500 \mu\text{s}$ 处的时间切片取对数，得到的结果如图5所示，即图5是图4(f)的放大形式。图5中，SVA-rWVD方法的主瓣同样也是3种方法中最窄的，另外，交叉项与自项重合的情形会影响自项的幅度和相位，使得所提方法受到一定影响，产生了残余主瓣，可看出残余主瓣为-20 dB，远区副瓣仍为-40 dB以下，注意到这里的“远区”实际上才是其它方法的副瓣区域，故SVA-rWVD方法的副瓣水平满足了设计的要求。

3.3.2 多分量之间出现交叉的情况

实际应用中还会出现各个分量调频斜率不一致的情况，本文考虑复杂的3信号交叉情况，该信号的理论时频分布如图6(a)所示。图6(b)图6(c)图6(d)的优缺点与3.3.1节基本相同，不再赘述，图6(e)为本文方法处理得到的结果，处理效果依然明显，能够准确显示出信号的实际分布且时频聚集度较高。取 $300 \mu\text{s}$ 处的时间切片，得到的结果如图6(f)及图7所示，副瓣水平是几种时频分布里面最低的，由此说明SVA-rWVD方法在多分量LFM信号存在的复杂情况下仍然有非常好的表现。

3.3.3 噪声的影响

最后，考虑本文方法在噪声影响下的鲁棒性，以图4中的多分量LFM信号为例，加入信噪比为-10~10 dB且变化间隔为1 dB的噪声。以时频图中瞬时频率估计的均方根误差^[19]作为衡量本文算法抗噪性能指标，对该方法做100次蒙特卡洛实验，得到的结果如图8所示，其中信号分量1, 2, 3分别是图4(e)中的左中右3分量。

由图8所示，随着信噪比的增大，各信号分量瞬时频率估计的均方根误差均在不断减小。当信噪比大于0 dB时，信号分量1和信号分量3瞬时频率估计的均方根误差小于-13 dB，信号分量2受交叉项与自项重合的影响，均方根误差稍高，不过也在-9 dB以下，说明本文方法能够准确从时频图中

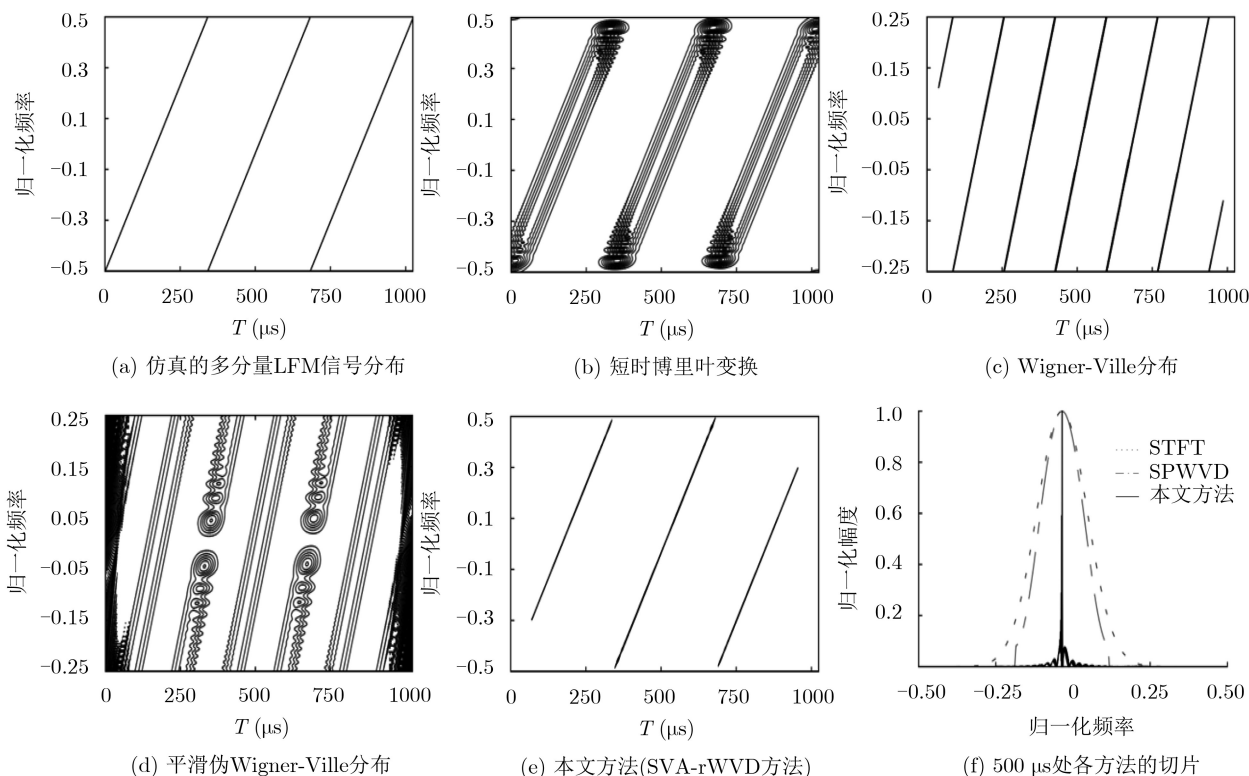


图4 多分量LFM信号的时频分析结果对比

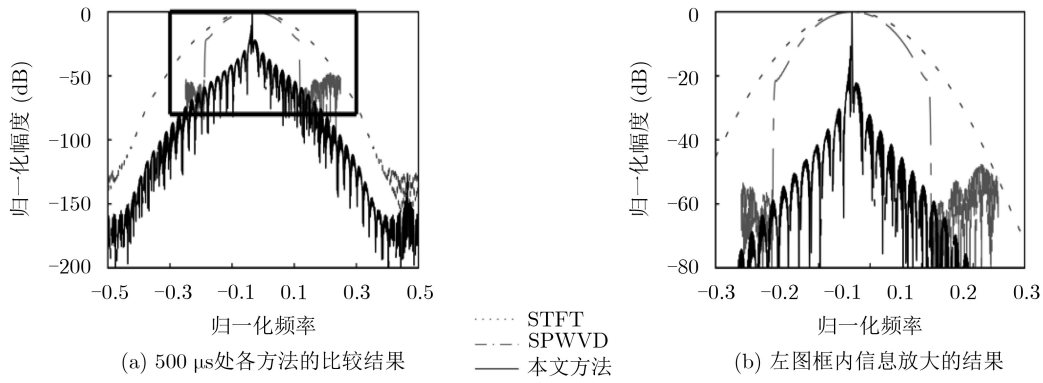


图5 时间切片比较结果(取对数进行分析)

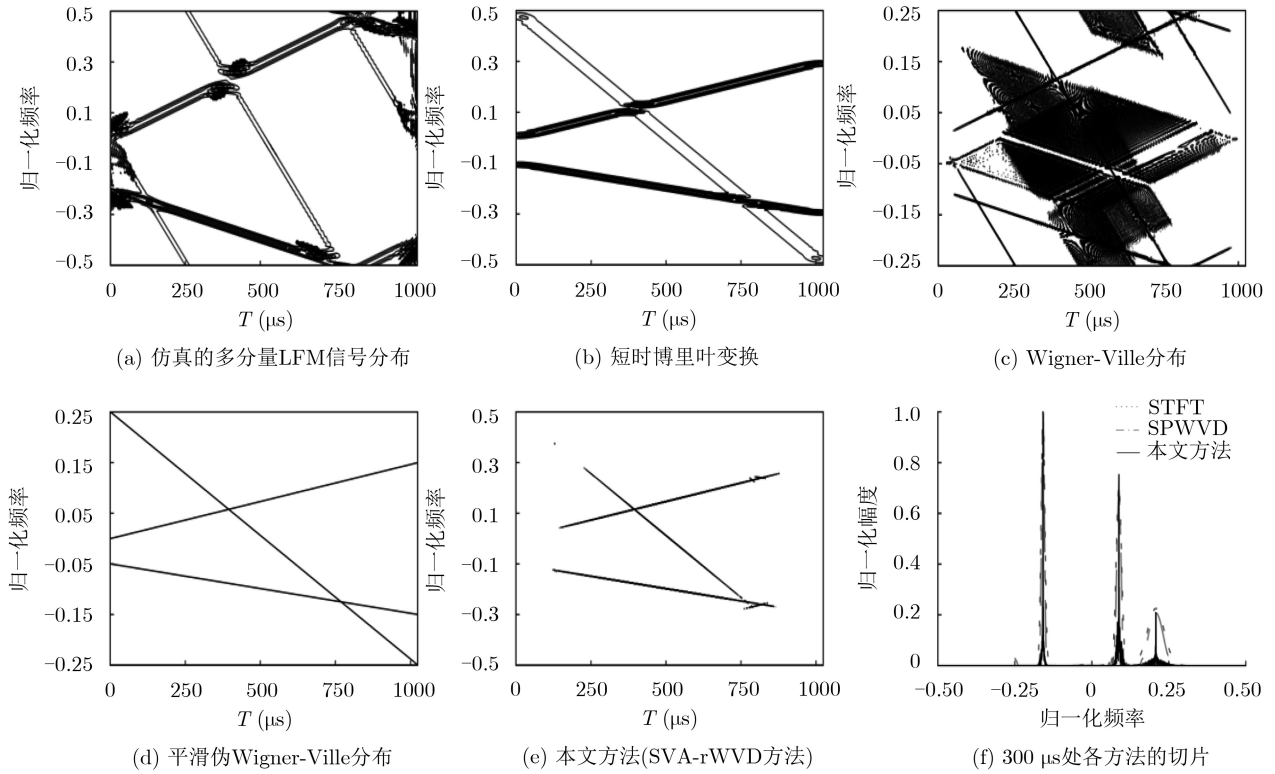


图6 多分量LFM信号的时频分析结果对比

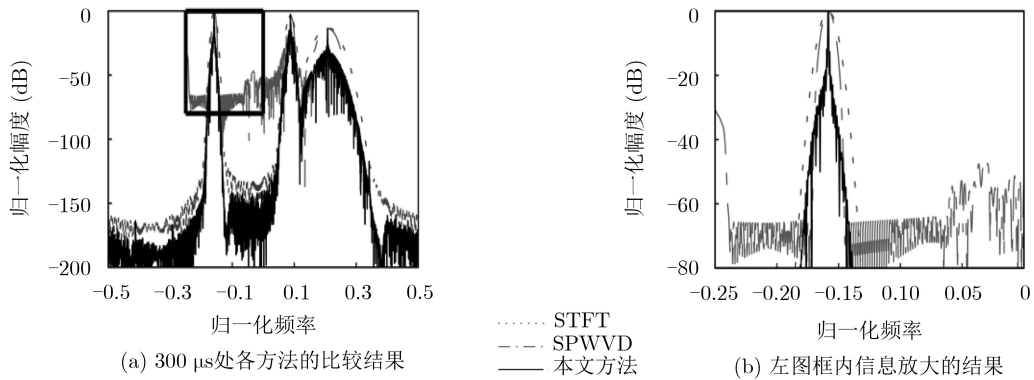


图7 时间切片比较结果(取对数进行分析)

估计出信号的瞬时频率，具有很好的抗噪声干扰能力。

4 结束语

线性调频信号是一种常见的非平稳信号，时频

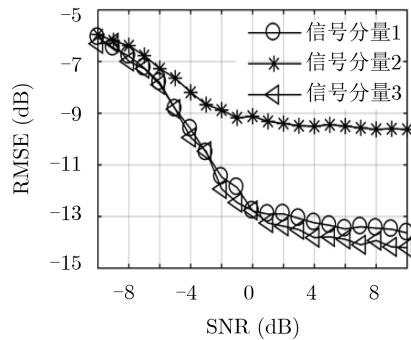


图8 不同信噪比下瞬时频率估计的均方根误差

分析技术是处理该类信号的有力工具，获得高主瓣低副瓣且无混叠的的时频分布结果是众多学者努力的方向。本文基于Wigner-Ville分布，提出了一种名为SVA-rWVD的时频分析方法，本文方法解决了奈奎斯特采样率下Wigner-Ville分布固有的混叠问题，且有效滤除了交叉项。与此同时，本文方法还可以在保持主瓣不展宽的同时抑制副瓣水平至-40 dB以下，使得时频图具有高时频分辨率。仿真实验证明本文方法不仅对单分量线性调频信号适用，对复杂多分量线性调频信号同样适用。

参考文献

- [1] YI Wei, CHEN Zhenhua, HOSEINNEZHAD R, *et al.* Joint estimation of location and signal parameters for an LFM emitter[J]. *Signal Processing*, 2017, 134: 100–112. doi: [10.1016/j.sigpro.2016.11.014](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.11.014).
- [2] 李秀坤, 吴玉双. 多分量线性调频信号的Wigner-Ville分布交叉项去除[J]. *电子学报*, 2017, 45(2): 315–320. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.008).
LI Xiukun and WU Yushuang. Cross-term removal of Wigner-Ville distribution for multi-component LFM signals[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(2): 315–320. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.008).
- [3] KUMAR R, ZHAO Wei, and SINGH V. Joint time-frequency analysis of seismic signals: A critical review[J]. *Structural Durability & Health Monitoring*, 2018, 12(2): 65–83. doi: [10.3970/sdlhm.2018.02329](https://doi.org/10.3970/sdlhm.2018.02329).
- [4] 邹红星, 戴琼海, 李衍达, 等. 不含交叉项干扰且具有WVD聚集性的时频分布之不存在性[J]. *中国科学: E辑*, 2002, 45(3): 174–180. doi: [10.1360/02yf9015](https://doi.org/10.1360/02yf9015).
ZOU Hongxing, DAI Qionghai, LI Yanda, *et al.* Nonexistence of cross-term free time-frequency distribution with concentration of Wigner-Ville distribution[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2002, 45(3): 174–180. doi: [10.1360/02yf9015](https://doi.org/10.1360/02yf9015).
- [5] BOASHASH B, ALI KHAN N, and BEN-JABEUR T. Time-frequency features for pattern recognition using high-resolution TFDs: A tutorial review[J]. *Digital Signal Processing*, 2015, 40: 1–30. doi: [10.1016/j.dsp.2014.12.015](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2014.12.015).
- [6] 赵培洪, 平殿发, 邓兵, 等. 魏格纳-维尔分布交叉项抑制方法综述[J]. *探测与控制学报*, 2010, 32(1): 23–29. doi: [10.3969/j.issn.1008-1194.2010.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1194.2010.01.006).
ZHAO Peihong, PING Dianfa, DENG Bing, *et al.* Review of cross-terms suppression methods in Wigner-Ville distribution[J]. *Journal of Detection & Control*, 2010, 32(1): 23–29. doi: [10.3969/j.issn.1008-1194.2010.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1194.2010.01.006).
- [7] ALI KHAN N and SANDSTEN M. Time-frequency image enhancement based on interference suppression in Wigner-Ville distribution[J]. *Signal Processing*, 2016, 127: 80–85. doi: [10.1016/j.sigpro.2016.02.027](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.02.027).
- [8] REN Huorong, REN An, and LI Zhiwu. A new strategy for the suppression of cross-terms in pseudo Wigner-Ville distribution[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2016, 10(1): 139–144. doi: [10.1007/s11760-014-0713-9](https://doi.org/10.1007/s11760-014-0713-9).
- [9] BOASHASH B and OUELHA S. An improved design of high-resolution quadratic time-frequency distributions for the analysis of nonstationary multicomponent signals using directional compact kernels[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(10): 2701–2713. doi: [10.1109/TSP.2017.2669899](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2669899).
- [10] PACHORI R B and NISHAD A. Cross-terms reduction in the Wigner-Ville distribution using tunable-Q wavelet transform[J]. *Signal Processing*, 2016, 120: 288–304. doi: [10.1016/j.sigpro.2015.07.026](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.07.026).
- [11] 王见, 李金同, 卢华玲, 等. 采用STFT-Wigner变换抑制Wigner-Ville分布交叉项[J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(8): 15–18. doi: [10.11835/j.issn.1000-582X.2013.08.003](https://doi.org/10.11835/j.issn.1000-582X.2013.08.003).
WANG Jian, LI Jintong, LU Hualing, *et al.* Using STFT-Wigner transform to suppress the cross terms in Wigner-Ville distribution[J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(8): 15–18. doi: [10.11835/j.issn.1000-582X.2013.08.003](https://doi.org/10.11835/j.issn.1000-582X.2013.08.003).
- [12] STANKWITZ H C, DALLAIRE R J, and FIENUP J R. Nonlinear apodization for sidelobe control in SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 31(1): 267–279. doi: [10.1109/7.366309](https://doi.org/10.1109/7.366309).
- [13] GUO Liang, YIN Hongfei, ZHOU Yu, *et al.* A novel sidelobe-suppression algorithm for airborne synthetic aperture imaging radar[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 714–719. doi: [10.1016/j.optlastec.2018.09.005](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.09.005).
- [14] 徐光耀, 刘永泽, 许小剑. 基于变迹滤波的MIMO-SAR图像分辨率增强技术[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(7): 1313–1320. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0514](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0514).
XU Guangyao, LIU Yongze, and XU Xiaojian. Enhanced resolution in MIMO-SAR imaging using apodization[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(7): 1313–1320. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0514](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0514).
- [15] NI Chong, WANG Yanfei, XU Xianghui, *et al.* A super-resolution algorithm for synthetic aperture radar based on

- modified spatially variant apodization[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54(2): 355–364. doi: [10.1007/s11433-010-4186-8](https://doi.org/10.1007/s11433-010-4186-8).
- [16] SARKAR B, PANIGRAHI R K, and MISHRA A K. Sidelobe suppression in Wigner distribution using non-linear apodization[C]. Proceedings of 2009 Annual IEEE India Conference, Gujarat, India, 2009: 1–4. doi: [10.1109/INDCON.2009.5409393](https://doi.org/10.1109/INDCON.2009.5409393).
- [17] SUN Kewen, ZHANG Min, and YANG Dongkai. A new interference detection method based on joint hybrid time-frequency distribution for GNSS receivers[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(11): 9057–9071. doi: [10.1109/TVT.2016.2515718](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2515718).
- [18] 刘颖, 陈殿仁, 陈磊, 等. 基于周期Choi-Williams Hough变换的线性调频连续波信号参数估计算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(5): 1135–1140. doi: [10.11999/JEIT140876](https://doi.org/10.11999/JEIT140876).
LIU Ying, CHEN Dianren, CHEN Lei, *et al.* Parameters estimation algorithm of linear frequency modulated continuous wave signals based on period Choi-Williams Hough transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(5): 1135–1140. doi: [10.11999/JEIT140876](https://doi.org/10.11999/JEIT140876).
- [19] 张天骐, 全盛荣, 强幸子, 等. 基于多尺度Chirplet稀疏分解和Wigner-Ville变换的时频分析方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1333–1339. doi: [10.11999/JEIT160750](https://doi.org/10.11999/JEIT160750).
ZHANG Tianqi, QUAN Shengrong, QIANG Xingzi, *et al.* Time-frequency analysis method based on multi-scale Chirplet sparse decomposition and Wigner-Ville transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1333–1339. doi: [10.11999/JEIT160750](https://doi.org/10.11999/JEIT160750).
- 刘会杰: 男, 1972年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为卫星移动通信系统理论与通信系统设计.
- 高新海: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为复杂电磁环境下的时频分析.
- 郭汝江: 男, 1977年生, 博士, 研究员, 研究方向为新体制雷达、保密通信、无源定位.