

# 地震勘探信号时频分析方法对比与应用分析

刘喜武<sup>1</sup>, 张宁<sup>1</sup>, 勾永峰<sup>2</sup>, 李华<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2. 大庆石油管理局钻探集团地球物理勘探公司, 大庆 163357)

**摘要** 针对地震勘探信号, 对非平稳信号时频分析几种适效方法: 短时 Fourier 变换、小波变换、S 变换、Wigner 分布、平滑伪 Wigner 分布、锥形核时频分布、AOK(adaptive optimum kernel, 自适应最优核函数) 分布等进行对比与应用研究。在阐明各种方法基本原理的基础上, 进行数值分析与应用研究。首先对非平稳地震勘探模拟信号进行试算及时频属性提取, 结合各类方法的信号表示理论, 在时频局部化的精度和交叉项抑制等方面对计算结果进行对比分析; 进一步应用于实际二维地震数据, 提取瞬时频率和瞬时带宽等时频属性, 进行比较研究。研究表明: 对于地震勘探信号, 就本文涉及的几种时频分析方法而言, AOK 分布是时频局部化精度最高、交叉项抑制最好、时频匹配最优的方法, 值得在地震勘探信号分析和地震属性提取、频谱分解等应用中深入研究和应用。

**关键词** 地震, 时频分析, 对比, AOK 分布, 瞬时属性

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)03-0743-11

## The comparison and application of time-frequency analysis methods to seismic signal

LIU Xi-wu<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>1</sup>, GOU Yong-feng<sup>2</sup>, LI hua<sup>2</sup>

(1. School of Marine Geo-sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Geophysical Prospecting Company of Daqing Petroleum, Daqing 163357, China)

**Abstract** Aiming at seismic prospecting signals, the comparisons of some effective time-frequency analysis methods for nonstationary signal are studied, including short time Fourier transform (STFT), wavelet transform (WT), S transform (ST), Wigner distribution (WVD), smoothed pseudo-Wigner distribution (SPWVD), cone-kernel time-frequency distribution (CKD) and adaptive optimum kernel time-frequency representation (AOK). Numerical methods and applications are implemented on base of their principles. Firstly, time-frequency representations of the above methods and testing computations are implemented with a modeling unstable seismic signal and time-frequency attributes are extracted. The comparisons of the results of above methods are studied according to the time-frequency localization precision and cross-terms suppressing. Secondly, the above methods are applied to real 2D seismic data and seismic attributes extraction for instantaneous frequency and instantaneous bandwidth. On base of the results, it can be concluded that AOK time-frequency representation is the best method among the above methods according to the time-frequency localization precision, cross-terms suppressing, sequences detection validity and worthing to do more research for seismic attributes extraction and spectral decomposition.

**Keywords** time-frequency analysis, comparison, AOK time-frequency representation, instantaneous attributes

### 0 引言

地震波在地层介质中传播, 散射和吸收衰减等均与频率有关, 信号的功率谱密度是时变的, 严格意义上属于非平稳信号。时频分析 (Time-Frequency

Analysis) 是这类非平稳信号分析的重要手段<sup>[1]</sup>, 它们在地震勘探数据分析中已有重要的应用<sup>[2~4]</sup>, 如地震波能量衰减补偿、时变滤波、层序检测、提高分辨率、地震频谱分解、地震旋回分析、瞬时属性提取等。

信号的时频分析描述信号在不同时间和不同频

收稿日期 2007-10-16; 修回日期 2007-12-20.

基金项目 国家自然科学基金项目(40674070)资助。

作者简介 刘喜武, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 从事地球物理信息与计算方面教学与科研工作. (E-mail: liuxiwu@ouc.edu.cn)

率处的能量密度和强度,是时域分析和频域分析的自然推广<sup>[5]</sup>.时频分析的基本思想是设计时间和频率的联合函数.目前常用的方法有线性时频表示、二次型(双线性)时频分布和自适应时频分布等<sup>[6~11]</sup>.线性时频表示法计算简单,且无交叉项干扰,但受测不准原理的影响,时频分辨率受到一定的限制,不能同时达到最好;而二次型时频分布在满足时频边缘分布的条件下,可理解为能量密度的分布,其时频分辨率一般较高,但受交叉项干扰严重;自适应时频分布能最大限度的适应某一类信号的变化,可以达到较高的时频分辨率,且无交叉项干扰.

关于时频分析在地球物理信号分析中的应用,由于论述的时频分析方法有所不同,结论不一<sup>[12~18]</sup>.本文主要研究短时 Fourier 变换(STFT, Short Time Fourier Transform),小波变换(WT, Wavelet Transform),S变换(S Transform),Wigner分布,平滑伪 Wigner 分布(smoothed pseudo-Wigner distribution),锥形核时频分布(cone-kernel time-frequency distribution),AOK分布(adaptive optimum kernel time-frequency representation)等方法,依据方法原理,通过数值实现和应用分析,从时频局部化的精度、交叉项抑制、属性提取效果等方面进行研究.理论分析和数值计算结果都表明在本文研究的方法中,AOK分布是一种时频局部化精度最高,交叉项抑制最好、层序检测最理想的方法.对地震勘探信号时频分析方法及在地震属性提取方面的效果综合评价研究可以更好的指导和改进时频分析技术,并为进一步深化应用提供技术准备,特别是在地震属性提取、频谱分解技术等方面应用与创新,值得深入研究.

首先给出各类时频分析方法的基本原理,然后针对模型地震数据,结合原理,数值实现并比较分析.在此基础上,分别应用于模型和实际数据,提取瞬时频率和瞬时带宽,展示应用效果,得出研究结论.

## 1 各时频分析方法的基本原理

### 1.1 线性时频表示

短时 Fourier 变换、小波变换、S变换等方法属于线性时频表示.

短时 Fourier 变换(STFT)是一种固定时间窗的时频分析方法,其基本思想<sup>[7]</sup>是:用窗函数来截取信号,假定信号在窗内是平稳的,采用傅立叶变换来分析窗内信号,确定该时间存在的频率,然后沿着信号时间移动窗函数,得到信号频率随时间的变化关

系,就得到时频分布.信号  $h(t)$  的 STFT 定义<sup>[4]</sup>为

$$H(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)g(\tau-t)e^{-i2\pi ft} dt, \quad (1)$$

其中  $g(t)$  是窗函数,反变换的公式为

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(f, \tau) g(\tau-t)e^{i2\pi ft} df d\tau, \quad (2)$$

窗函数为高斯函数时,时频分辨率最高. STFT 方法中时间窗是固定的,时频网格等宽,不能随频率需要使网格变宽或变窄,不利于低频、高频信号的检测. STFT 时间和频率的精度无法兼顾,使用长时间滑动窗,在频域获得高精度,但时域精度降低;反之,使用短时间滑动窗,在时域获得高精度,又会使频域精度降低<sup>[8]</sup>.

小波变换(WT)是一种多分辨分析方法,针对高频、低频信号分别采用窄时窗和宽时窗.信号  $h(t)$  的连续小波变换(CWT)定义<sup>[4]</sup>为

$$W_{\psi}(a, \tau) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)\psi^*\left(\frac{\tau-t}{a}\right) dt, \quad (3)$$

式中,  $a$  为伸缩尺度;  $\tau$  为平移因子(时间);  $\psi(t)$  为小波母函数,满足

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hat{\psi}(\omega)}{\omega} d\omega < \infty, C_{\psi} \neq 0$$

反变换定义为

$$h(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{\infty} a^{-2} W_{\psi}(a, \tau) \psi^*\left(\frac{\tau-t}{a}\right) da d\tau, \quad (4)$$

小波变换使用了位移参数  $\tau$  和尺度参数  $a$ , 可以分析出任意时间内的频率性质,但小波变换是时间-尺度分析,时间和频率的关系并不直接,要根据具体的小波函数而定.而 S 变换,既能保持小波变换的优点,又能克服这种不足.

信号  $h(t)$  的 S 变换(ST)的定义<sup>[2]</sup>为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}\right] \times \exp(-i2\pi ft) dt, \quad (5)$$

式中  $\tau, f$  分别表示时间和频率,均为实数.反变换为

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau \right] \exp(i2\pi ft) df. \quad (6)$$

S 变换是介于 STFT 和 CWT 之间的一种时频分析方法,吸取了两者的优点,引进小波的多分辨分析,克服了 STFT 不能调节分析窗口频率的缺点,同时变换结果又与 Fourier 频谱保持直接联系<sup>[4]</sup>.然而,时频表示的频谱图对信号能量的描述十分粗糙,为更好描述信号能量密度的分布,须采用“能量化”二次型时频分布.此外,对于二次型非平稳信号,采用基于二次型时频分布的方法可以得到较高的频

率分辨率。

## 1.2 双线性时频分布

Wigner 分布、平滑伪 Wigner 分布、锥形核时频分布属于双线性时频分布。

对某些类型的信号,通过使用反向信号作为分析窗函数,可以得到较好的结果。信号  $h(t)$  的 Wigner 分布定义为<sup>[5]</sup>

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h\left(t + \frac{\tau}{2}\right) h^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (7)$$

其中星号表示复共轭。但由于 Wigner 分布最大的缺点是产生交叉项,特别是在分析多分量信号时,会出现难以避免的交叉干扰项,严重影响信号时变谱规律的可分辨性和可解释性,不利于信号自身项的识别<sup>[8]</sup>。

抑制交叉项一直是时频分布研究领域中的一个棘手的问题,也是将时频分布更广泛应用于各信号处理领域所要克服的困难。通过在 Wigner 分布的整个时间和频率域滤波,交叉项能够大大地被抑制,从而得到平滑伪 Wigner 分布<sup>[5]</sup>

$$P(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t', f') W(t - t', f - f') dt' df'. \quad (8)$$

其中滤波函数  $\Psi(t, f)$  被称为核函数。选取不同的核函数可得到不同的时频表示。但核函数在减少交叉项的同时,也会带来负面作用:信号自身项展宽,信号分辨率的降低。抑制交叉项与提高信号分辨率,如同短时傅立叶变换中时域和频域分辨率一样,不可能同时做到最好,只能折中最优。目前大多抑制交叉项的方法是以降低分辨率为代价的。

分析地震信号时频分布,需要寻找一个适应于地震信号性质的滤波核函数,最大地抑制交叉项同时尽可能小地降低分辨率。研究表明锥形核函数

$$\Psi(t, f) = \omega(t) \left| t \right| \frac{\sin(2\pi\alpha ft)}{2\pi\alpha ft}, \quad (9)$$

很好的适合于地震数据分析<sup>[5]</sup>。其中  $\omega(t)$  是一个实对称的窗函数,  $\alpha$  是一个无量纲的常量,通常取  $\alpha=1/2$ 。这个核函数不像频谱图那样消除脉冲,但可完全地抑制它们,从而得到一个有效和准确的频率局部化表示。

## 1.3 自适应时频分布——AOK 分布

单一固定核函数不能适应各类信号的时频分析,核函数随信号不同而变化的自适应时频分布十分有意义。自适应最优化核时频分布(AOK 分布, adaptive optimum kernel time-frequency representation)就是采用短时模糊函数和随时间变化的自适

应核函数,能够在时频分布中区分出多分量信号的细节部分<sup>[9,10]</sup>。

自适应最优化核时频分布(AOK 分布)定义<sup>[10]</sup>为:

$$P_{AOK}(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(t; \theta, \tau) \times \Phi_{opt}(t; \theta, \tau) e^{-j\theta t - j\tau\omega} d\theta d\tau, \quad (10)$$

其中  $\Phi_{opt}(t; \theta, \tau)$  为最优化核函数,  $A(t; \theta, \tau)$  是信号的短时模糊函数,定义为

$$A(t; \theta, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \omega\left(u - t - \frac{\tau}{2}\right) \times h\left(u + \frac{\tau}{2}\right) \omega\left(u - t + \frac{\tau}{2}\right) e^{j\theta u} du, \quad (11)$$

式中,  $\omega(u)$  为对称窗函数,  $t$  为  $\omega(u)$  的中心位置,令  $|u| > T$  时,  $\omega(u) = 0$ , 则只有在  $[t - T, t + T]$  范围内的信号才能计算其核函数,对于信号的任意细节部分,短时模糊函数都可以准确地刻画出来。有了短时模糊函数的定义,便可以很容易地计算相应的  $\Phi_{opt}(t; \theta, \tau)$ 。短时模糊函数是随时间而变化的,所以最优化核也随时间变化<sup>[10]</sup>。

$\Phi_{opt}(t; \theta, \tau)$  通过求解以下最优化问题得到:

$$\max_{\Phi} \iint_0^{2\pi\infty} |A(t; r, \psi) \Phi(t; r, \psi)|^2 r dr d\psi, \quad (12)$$

约束条件为:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(t; r, \psi) &= \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2(\psi)}\right) \\ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi\infty} |\Phi(t; r, \psi)|^2 r dr d\psi & \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma^2(\psi) d\psi \leq \alpha, \alpha \geq 0 \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

其中  $\sigma(\psi)$  是控制径向高斯函数在径向角  $\psi$  方向的扩展,称为扩展函数,  $\psi$  为径向与水平方向的夹角  $\psi = \arctan \frac{\tau}{\theta}$ ,  $r = \sqrt{\theta^2 + \tau^2}$ 。

地震记录自适应最优化核时频分布,使在每一个瞬时  $t$  的核函数的形状适应于在时频平面最大程度地集中能量,同时抑制交叉项。相对于 Wigner 分布,在使结果恶化最小化的情况下,交叉项被大大地抑制了。短的持续时间信号成分(脉冲)和长的持续时间成分(带)能很好的被局部化。这种在时间和频率域都能很好地使能量局部化的能力使 AOK 分布非常好地适用于地震信号的局部频谱分析。

## 2 模型数据试算及效果对比

根据前述各种时频分析方法理论的分析 and 比

较,本文首先模拟了一道非平稳地震信号,数值实现各类时频分析算法,获得时频表示结果.图 1(a)为一模拟地震信号记录,共 300 个采样点,采样率为 1/100(s).图 1(b)~(d)分别是短时 Fourier、小波变换和 S 变换三种方法的时频表示结果图.其中 Gauss 窗函数表达式为

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right),$$

小波函数  $\psi(t)$  选取 Gaussian-Morlet 小波,

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \exp(-i\omega_0 t), \omega_0 \geq 5.$$

由图可以看出,STFT(图 1(b))能够反映局部特征,但分辨能力不能调节.STFT 在整个频率域用一个分析窗,即窗口函数的形状和大小与频率变化无关而保持不变,所以分析的分辨率在整个时间-频率平面上所有位置都相同而不改变.这不符合实际问题中高频信号的分辨率应比低频信号高,也就是说变换窗口的大小应随频率而变,频率越高,窗口应越小的要求.小波变换(WT)(图 1(c))能较好地反映局部特征,分辨能力可以随频率(尺度)变化调节,但与 S 变换相比,时频分辨率不太理想.S 变换(ST)(图 1(d))能较好地反映局部特征,分辨能力可以随频率调节,但由于窗口形状不变,时频的分辨率还不是太理想.图 1(e)~(g)是 Wigner 分布、平滑伪 Wigner 分布、锥形核时频分布三种方法的效果对比图.由图可以看出,Wigner 分布(图 1(e))中时频平面的能量局部化大大的改善了,能够看到一个相对于时频表示图 1(b)~(d)来说很尖的时频局部化.然而,现在振动的最高点出现在  $(t, f)$  处两种信号成分之间,而这里不应该有能量.这些所谓的交叉项是由于 Wigner 分布二次型的性质产生的,交叉项的干扰使得地震信号的 Wigner 分布的解释复杂化.图 1(f)所示的是平滑伪 Wigner 分布,使用了一个可分离的核函数  $\Psi(t, f) = h(t)G(f)$ .本文使用高斯型时间和频率窗.可以看到交叉项被大大抑制了,但时频局部化精度降低了.图 1(g)所示的是锥形核时频分布,最大程度地抑制交叉项同时尽可能小地降低时频分布分辨率.核函数沿着频率轴变化是零,尖脉冲被抑制,平行于时间轴的成分则被强调.因此,锥形核时频分布虽不像频谱图那样消除脉冲,但可完全地抑制它们,得到一个有效准确的频率部化的表示.然而,信号中存在线性调频成分时,不能很好的在时频图像中被区分,因为它不平行于时间轴.

图 1(h)为 AOK 分布时频表示图.由图可以看

出,相对于 Wigner 分布,在使结果恶化最小的情况下,交叉项被大大地抑制了.注意到短的持续时间信号成分(脉冲)和长的持续时间成分(带)都能很好自适应地被局部化,时频局部化精度也达到最优化的效果.这种在时间和频率域都能很好使能量局部化的能力使 AOK 分布非常好地适用于地震信号的局部频谱分析.

### 3 时频分析方法在地震属性提取中的应用

采用上述不同的时频方法进行地震属性的提取并进行对比分析.本文提取瞬时频率,瞬时带宽两种属性.

瞬时频率定义为:

$$g(t) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f |P(t, f)| df}{E(t)}, \quad (14)$$

瞬时带宽的定义为:

$$B(t)^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (f - g(t))^2 |P(t, f)| df}{E(t)}. \quad (15)$$

其中,  $P(t, f)$  是时频分析的结果,  $E(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t, f) df$  是时间的边缘积分.瞬时频率是被能量正则化时频分布的一次矩,瞬时带宽是被能量正则化时频分布的二次矩.

本文运用各种时频方法,分别从地震模型数据和 2D 实际地震数据中提取这两种地震属性,将所得结果进行对比分析.图 2 中所示的是用图 1 中相应的时频方法求得的图 1(a)地震模拟信号的瞬时频率和瞬时带宽.从图中可以明显的看出,线性时频表示得到的瞬时频率和瞬时带宽精度和规律都不很理想,双线性时频分布得到的瞬时频率和瞬时带宽精度大大提高,但是交叉项干扰比较严重.从时频局部化精度、交叉项的抑制优化折中和层序检测的准确性(与模拟信号比较)看,AOK 分布得到的瞬时频率和瞬时带宽的效果最好.

图 3 为一段二维地震数据,共 64 道,每道 256 个样点,采样率 2 ms,约 1.25 s 处为主要的目的层,在第 30 道附近有一断层.

图 4 中所示的是用图 1 中相应的时频方法对图 3 中实际二维地震数据的求得的瞬时频率图和瞬时带宽图.从图中可以明显的看出,线性时频表示得到的瞬时频率和瞬时带宽精度和规律都不很理想,双线性时频分布得到的瞬时频率和瞬时带宽精度大大提高,但是交叉项干扰比较严重.从时频局部化精度、交叉项的抑制优化折中、层序和地层特征检测的

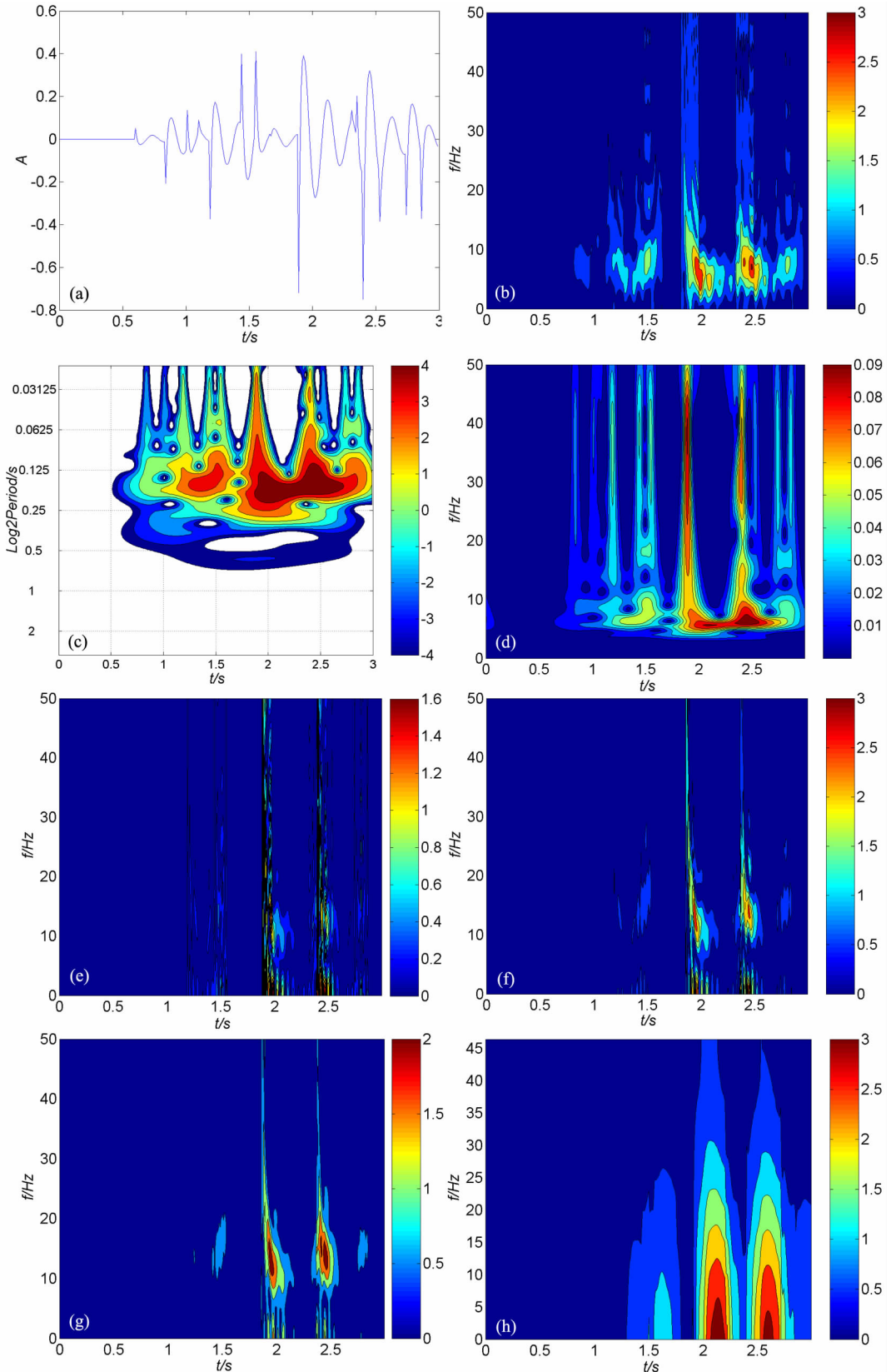
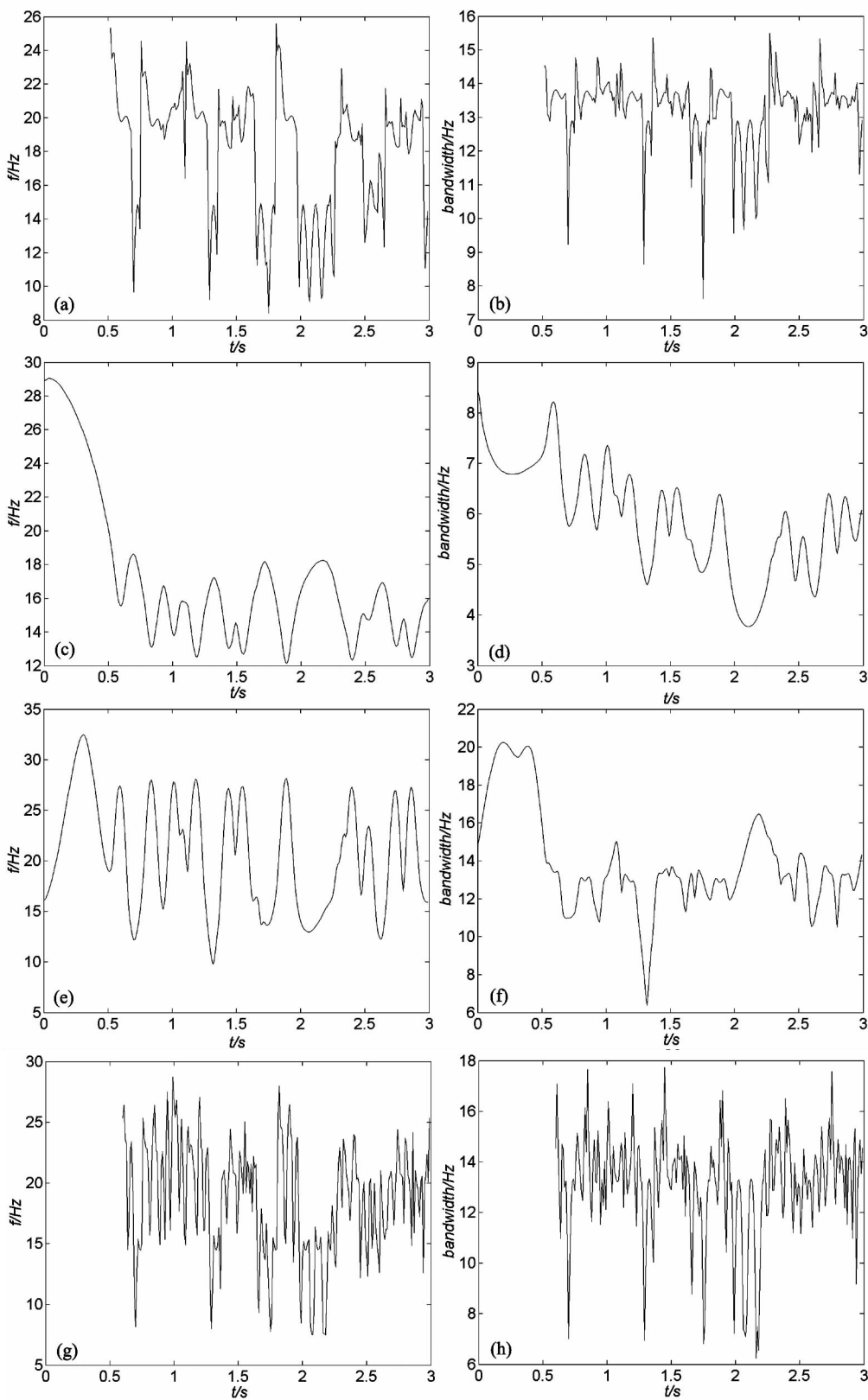


图 1 模拟地震信号(a), 相应的 STFT 振幅谱 (b), 小波变换(WT)功率谱 (c), S 变换振幅谱 (d), Wigner 分布 (e), 平滑伪 Wigner 分布 (f), 锥形核分布 (g) 及其 AOK 分布 (h)

Fig. 1 Modeling seismic signal(a), its STFT amplitude spectrum(b), WT power spectrum(c) and ST amplitude spectrum(d), Wigner distribution (e), smoothed pseudo wigner distribution(f), cone-kernel time-frequency distribution (g) and AOK time-frequency representation (h)



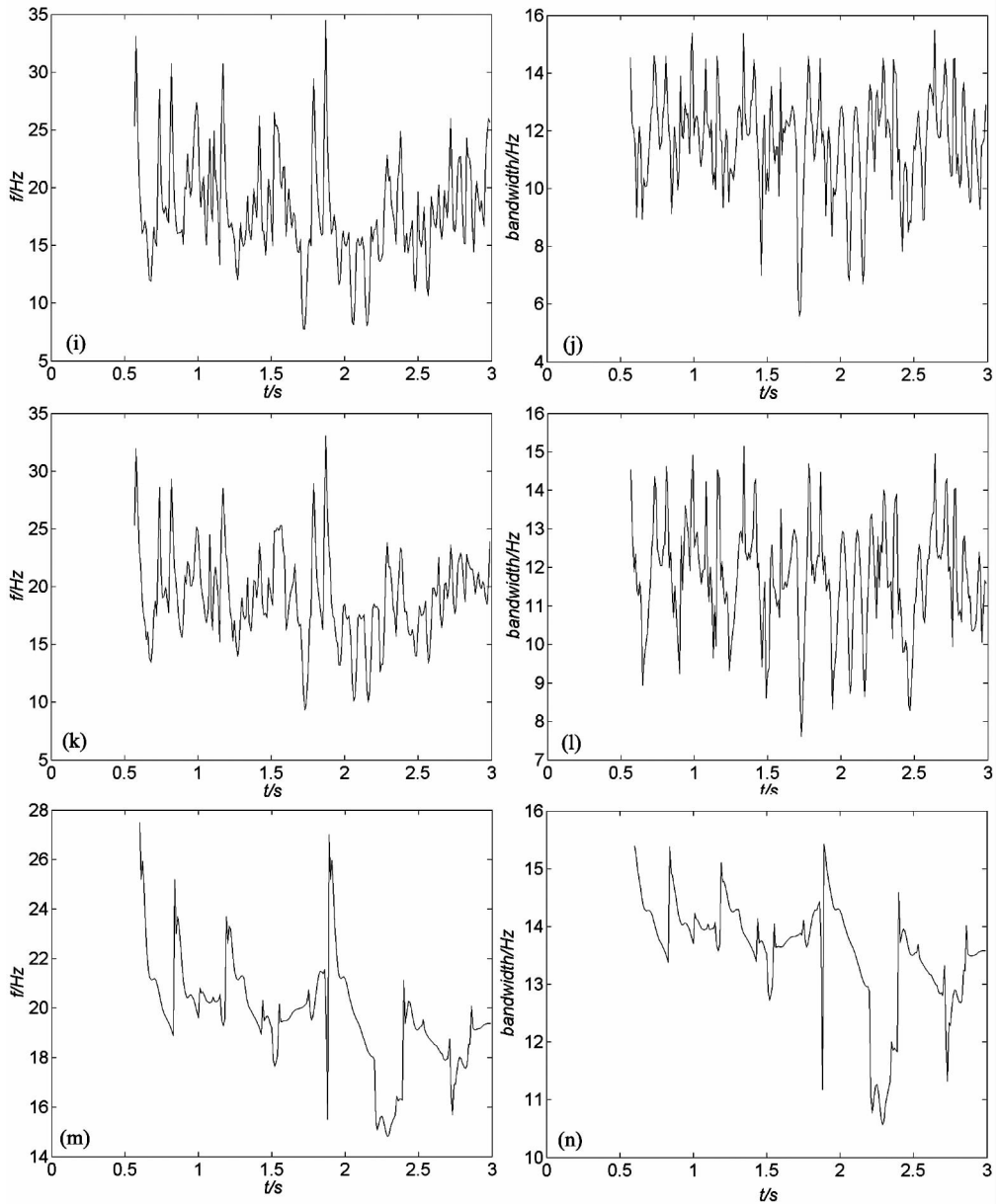
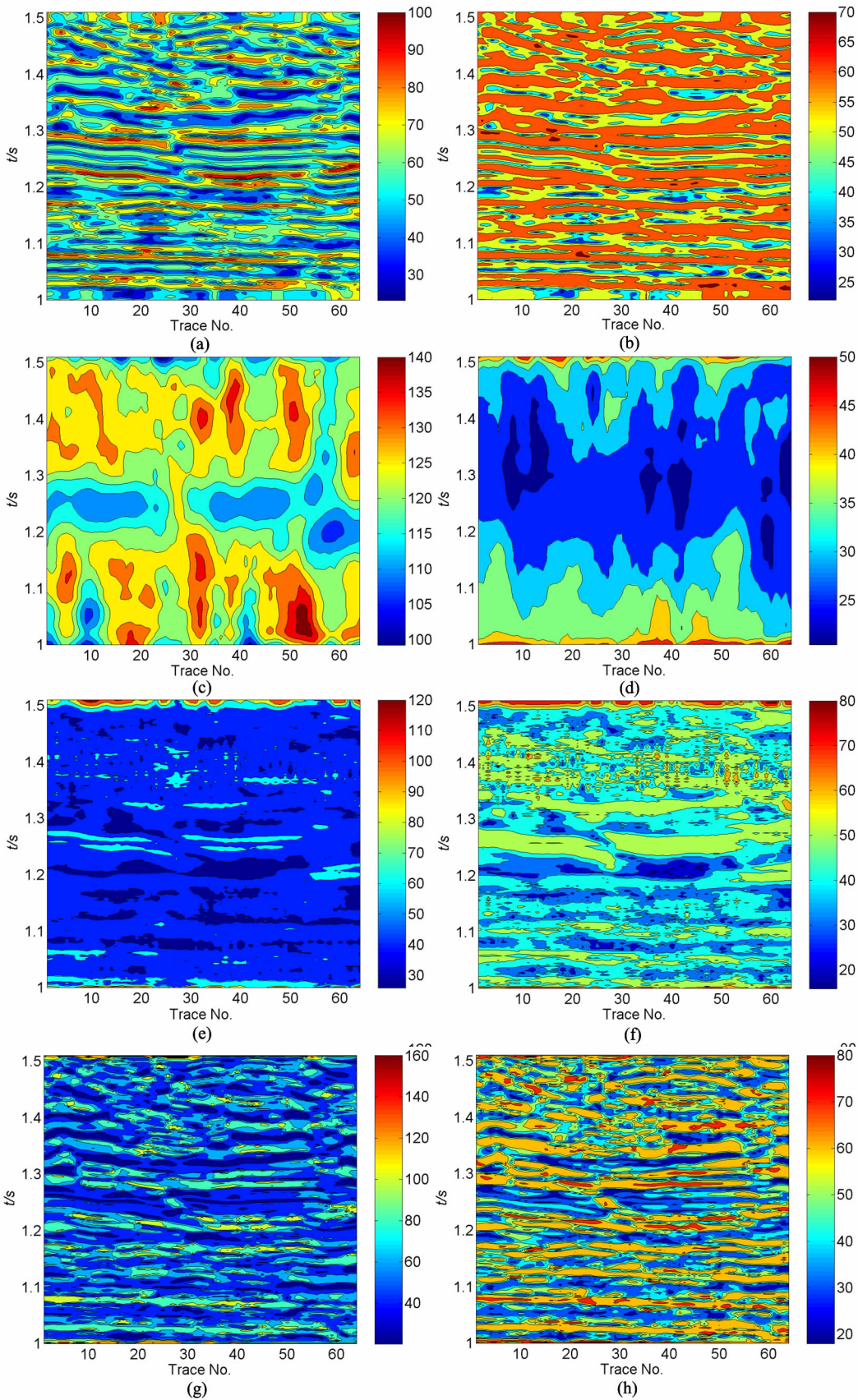


图 2 对图 1(a)中模拟地震信号用图 1 中相应的时频分析方法提取的瞬时频率和瞬时带宽图. 其中: STFT 瞬时频率(a)和 STFT 瞬时带宽(b); WT 瞬时频率(c)和 WT 瞬时带宽(d); ST 瞬时频率(e)和 ST 瞬时带宽(f); Wigner 分布瞬时频率(g)和 Wigner 分布瞬时带宽(h);平滑伪 Wigner 分布瞬时频率(i)和平滑伪 Wigner 分布瞬时带宽(j);锥形核时频分布瞬时频率(k)和锥形核时频分布瞬时带宽(l);AOK 分布提取的瞬时频率(m)和 AOK 分布提取的瞬时带宽(n)

Fig. 2 Instantaneous frequency(IF) and bandwidth(IB) of the modeling seismic signal in Fig. 1 (a) extracted by the corresponding time-frequency methods of Fig. 1, with IF and IB using STFT(a) and (b); WT (c) and (d) ;ST(e) and (f);WVD(g) and (h), SPWVD(i) and (j); CKD(k) and (l); AOK(m) and (n)







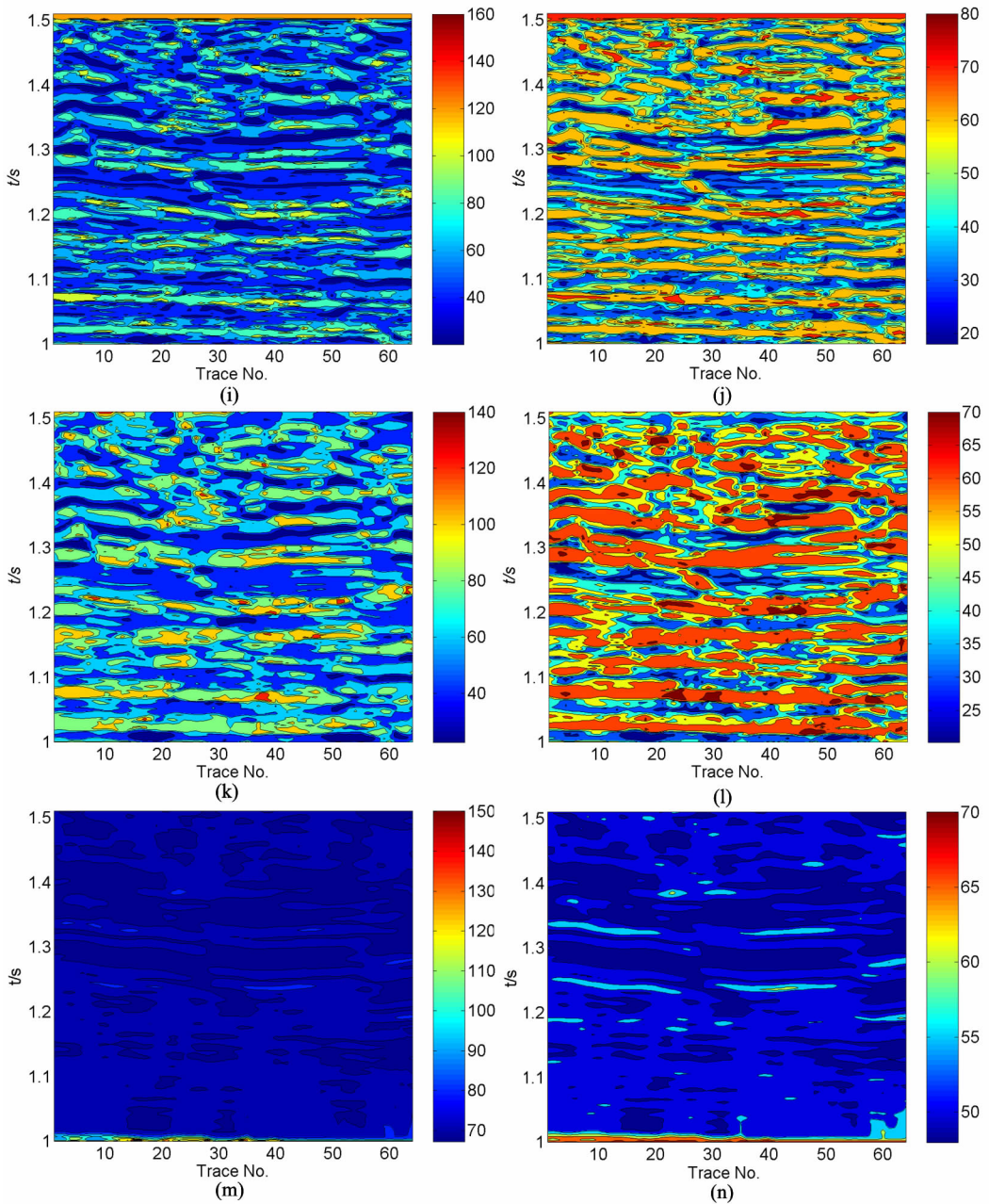


图 4 对图 3 中二维实际地震数据用图 1 中相应的时频分析方法提取的瞬时频率和瞬时带宽剖面图。其中:STFT 瞬时频率剖面(a)和 STFT 瞬时带宽剖面(b);WT 瞬时频率剖面(c)和 WT 瞬时带宽剖面(d); ST 瞬时频率剖面(e)和 ST 瞬时带宽剖面(f); Wigner 分布瞬时频率剖面(g)和 Wigner 分布瞬时带宽剖面(h);平滑伪 Wigner 分布瞬时频率剖面(i)和平滑伪 Wigner 分布瞬时带宽剖面(j);锥形核时频分布瞬时频率剖面(k)和锥形核时频分布瞬时带宽剖面(l);AOK 分布提取的瞬时频率剖面(m)和 AOK 分布提取的瞬时带宽剖面(n)

Fig. 4 Instantaneous frequency(IF) and bandwidth(IB) section of 2D real seismic data in Fig. 3 extracted by the corresponding time-frequency methods of Fig. 1, with IF and IB using STFT(a) and (b);WT (c) and (d) ;ST(e) and (f);WVD(g) and (h) , SPWVD(i) and (j); CKD(k) and (l); AOK(m) and (n)

准确性(与实际 2D 地震数据比较)看, AOK 分布得到的瞬时频率和瞬时带宽的效果最好, 断点和地层层序清楚。

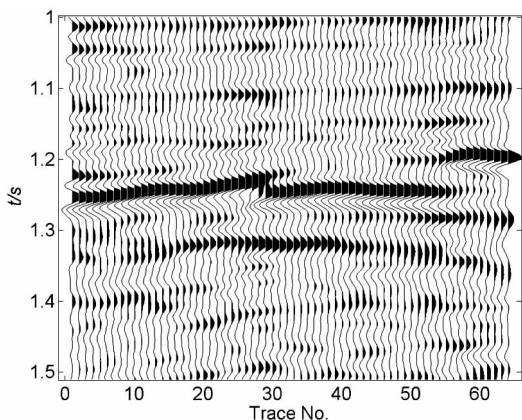


图 3 2D 实际地震数据

Fig. 3 2D real seismic data

#### 4 结 论

通过模型试算和应用效果的分析比较, 从时频局部化的精度、交叉项的抑制、瞬时属性的有效性等方面考虑, 可以看出:

(1) STFT、S 变换、小波变换等线性时频表示, 时频局部化的精度不够高; Wigner 分布较线性时频表示时频局部化的精度大大提高, 但存在严重的交叉项干扰; 平滑伪 Wigner 分布, 通过在整个时间和频率域滤波可较好抑制交叉项, 但是降低了时频局部化的精度; 锥形核时频分布在抑制交叉项和提高时频局部化精度之间, 找到一个较好的折中, 但信号中线性调频成分不能很好的在时频图像中被区分; AOK 分布是一种时频匹配最优的时频分布方法, 它能够完全抑制交叉项, 时频局部化精度也达到最优。

(2) 线性时频表示方法提取的瞬时频率和瞬时带宽等属性精度不够高, 而双线性时频分布精度大大提高, 但交叉项干扰严重, AOK 分布瞬时属性在时频局部化精度、抑制交叉项、地层层序和特征检测等方面效果皆最为理想, 在地震时频属性提取分析、地震频谱分解、地震信号处理等方面中具有良好应用前景, 值得进一步深入研究。

#### 参 考 文 献 (References):

[1] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

Zhang X D, Bao Z. Non-stationary signal analysis and pro-

cessing[M]. Beijing: National defense industry publisher, 1998.

[2] 刘喜武, 刘洪, 李幼铭, 年静波. 基于广义 S 变换研究地震地层特征[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 440~451.

Liu X W, Liu H, Li Y M, Nian J B. Study on characteristics of seismic stratigraphy by generalized S-transform[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(2): 440~451.

[3] 刘喜武, 年静波, 刘洪. 基于广义 S 变换的地震波能量衰减分析[J]. 勘探地球物理学进展, 2006, 29(1): 20~24.

Liu X W, Nian J B, Liu H. Generalized S-transform based seismic attenuation analysis[J]. Progress in Exploration Geophysics (in Chinese), 2006, 29(1): 20~24.

[4] 刘葵, 刘招军, 朱建伟等. 时频分析在石油地球物理勘探中的应用[J]. 世界地质, 2000, 19(3): 282~284.

Liu K, Liu Z J, Zhu J W, et al. Application of time-frequency analysis in geology[J]. World Geology (in Chinese), 2000, 19(3): 282~284.

[5] 张晔. 信号时频分析及应用[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2006.

Zhang Y. Signal time-frequency analysis and application[M]. Harbin Institute of Technology publisher, 2006.

[6] 汪源源. 现代信号处理理论和方法[M]. 复旦大学出版社, 2003.

Wang Y Y. Modern signal processing theory and method[M]. Fudan University publisher, 2003.

[7] 卫俊平. 时频分析技术及应用[M]. 西安电子科技大学, 2005.

Wei J P. Technique and application of time-frequency analysis [M]. Xi'an Electronic Science and Technology University, 2005.

[8] Jone D, Baraniuk R. An adaptive optimum kernel time-frequency representation[J]. IEEE Trans. Signal Processing, vol. 43, no. 10, pp: 2361~2371, 1995.

[9] 潘建华. SPWV 在脉内混合信号时频分析中的应用[J]. 舰船电子对抗, 2005, 28(5): 41~44.

Pan J H. Application of SPWV in time-frequency analysis of intra-pulse mixed-signal[J]. Shipboard Electronic Countermeasure (in Chinese), 2005, 28(5): 41~44.

[10] 王喆, 马世伟, 邓家梅, 曹家麟. 基于信号先验知识的几种时频分析法[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6(1): 77~80.

Wang Z, Ma S W, Deng J M, Cao J L. Some methods of time-frequency analysis based on previous knowledge of signal [J]. Journal of Image and Graphics (in Chinese), 2001, 6(1): 77~80.

[11] 李亚安, 王军, 雷粉霞. 自适应核时频分布在抑制交叉项中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(11): 1567~1569.

Li Y A, Wang J, Lei F X. Application of adaptive kernel time-frequency distribution in cross-components suppression [J]. Systems Engineering and Electronics (in Chinese), 2004, 26(11): 1567~1569.

[12] 陈雨红, 杨长春, 曹齐放等. 几种时频分析方法比较[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1180~1185.

Chen Y H, Yang C C, Cao Q F, et al. The comparison of

- some time-frequency analysis methods[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(4): 1180~1185.
- [13] 王祝文,刘菁华,聂春燕. 基于 Choi-Williams 时频分布的阵列声波测井信号时频分析[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1481~1486.  
Wang Z W, Liu J H, Nie C Y. Time-frequency analysis of array acoustic logging signal based on Choi-Williams energy distribution[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(5): 1481~1486.
- [14] 杨培杰,印兴耀,张广智. 希尔伯特-黄变换地震信号时频分析与属性提取[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1585~1590.  
Yang P J, Yin X Y, Zhang G Z. Seismic signal time-frequency analysis and attributes extraction based on HHT[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(5): 1585~1590.
- [15] 吕公河,于常青,董宁. 叠后地震属性分析在油气田勘探开发中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 161~166.  
Lu G H, Yu C Q, Dong N. The application of post-stack seismic attribute analysis in the oil-gas exploration and development[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(1): 161~166.
- [16] 高静怀,万涛,陈文超,毛剑. 三参数小波及其在地震资料分析中的应用[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1802~1812.  
Gao J H, Wan T, Chen W C, Mao J. Three parameter wavelet and its applications to seismic data processing. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1802~1812.
- [17] 岳文正,陶果. 小波变换在识别储层流体性质中的应用[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 863~869.  
Yue W Z, Tao G. A method for recognition of fluid property in reservoirs using wavelet transformation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(6): 863~869.
- [18] 祝志慧,孙云莲,李洪. 基于 EMD 的时频分析方法的电力故障信号检测[J]. 武汉大学学报工学版, 2007, 40(5): 119~122, 132.  
Zhu Z H, Sun Y L, Li H. Power fault detection using empirical mode decomposition[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(5): 119~122, 132.