文章编号:1673-5005(2019)03-0036-09 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.03.004

时间域和频率域二阶同步压缩变换及其在储层识别中的应用

李振春[1], 孙苗苗[1,2], 王 姣[1], 刘延利[1], 杨国权[1], 李庆洋[3], 杨 博[1]

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580;2. 中国石化石油工程地球物理有限公司胜利分公司,山东东营 257088; 3. 中国石化中原油田分公司物探研究院,河南濮阳 457001)

摘要:从时间域推导出时间域二阶同步压缩短时傅里叶变换和时间域二阶同步压缩小波变换,从频率域推导出频率域二阶同步压缩短时傅里叶变换和频率域二阶同步压缩小波变换,通过公式推导结果可以得到二阶同步压缩变换的统一形式,这一规律可以推广到其他二阶同步压缩线性时频变换中去。将二阶同步压缩小波变换应用到实际地震资料处理中。结果表明:该方法可以得到非常高的时频分辨率,能够有效识别储层及有利圈闭,所得结果与测井资料相吻合;相对于传统线性时频分析方法和一阶同步压缩变换方法,二阶同步压缩变换可以使能量更加聚焦到时频脊上,提高时频域分辨率。

关键词:时频分析; 分辨率; 二阶同步压缩变换; 储层识别

中图分类号:P 631.4 **文献标志码**:A

引用格式:李振春,孙苗苗,王姣,等.时间域和频率域二阶同步压缩变换及其在储层识别中的应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(3):36-44.

LI Zhenchun, SUN Miaomiao, WANG Jiao, et al. Second-order synchrosqueezing transform in time domain and frequency domain and its application in reservoir identification[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2019,43(3):36-44.

Second-order synchrosqueezing transform in time domain and frequency domain and its application in reservoir identification

LI Zhenchun[1], SUN Miaomiao[1,2], WANG Jiao[1], LIU Yanli[1], YANG Guoquan[1], LI Qingyang[3], YANG Bo[1]

(1. *School of Geosciences in China University of Petroleum(East China), Qingdao* 266580, *China*; 2. *Shengli Branch, Geophysical Corporation, SINOPEC, Dongying* 257088, *China*; 3. *Geophysical Exploration Research Institute of Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang* 457001, *China*)

Abstract: In this paper, we derive the second-order synchrosqueezing short-time Fourier transform and the second-order synchrosqueezing wavelet transform in time domain and frequency domain respectively, and obtain a unified form of the second-order synchrosqueezing transform. This law can be extended to other second-order synchrosqueezing linear time-frequency transforms. The actual seismic data processed by the second-order synchrosqueezing wavelet transform show that the method has a very high time-frequency resolution and can effectively identify the reservoirs and favorable traps. The results obtained are consistent with the logging data. Compared with the traditional linear time-frequency methods and the first-order synchrosqueezing transforms, the second-order synchrosqueezing transform can focus the energy more on the time-frequency ridge

收稿日期:2018-06-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC060110501);国家油气重大专项(2016ZX05006-002,2016ZX05024-003-011,2016ZX05026-002-002);中国石化胜利油田分公司局级课题项目(YKW1704);国家自然科学基金项目(41604103);中央高校基本科研业务费专项(18CX02009A)

作者简介:李振春(1963-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为地震波正演与偏移成像、多尺度地震资料联合反演与综合解释等。E-mail:leonli@upc.edu.cn。

通信作者:王姣(1985-),女,博士研究生,研究方向为提高地震资料分辨率、去噪、时频分析。E-mail:wangjiao19860918@163.com。

to improve the resolution in the time-frequency domain.

Keywords: time-frequency analysis; resolution; second-order synchrosqueezing transform; reservoir identification

近年来,地震勘探目标逐渐转向薄层、薄互层[1]以及小规模储集体[2-3]。时频分析能有效地展现信号的频率和时间之间的关系,从而进行储层厚度预测、流体识别、断层检测、去噪等。传统的时频分析方法如短时傅里叶变换、小波变换、S 变换等时频聚焦能力较差,对于薄层、小规模的储集体、复杂地质体来说,识别能力有限,不能准确显示储层边界,或因为分辨率不足,不能识别规模小的、薄的储层。为了得到更高的时频分辨率,Daubechies 等[4-5]提出了一种新的时频能量重排算法——同步压缩小波变换(synchrosqueezing transform,SST),其仅对频率进行重排,可以重构原始信号。后来,以同步压缩变换为核心发展了多种时频变换方法,包括同步压缩短时傅里叶变换(FSST)[6]和同步压缩 S 变换(SSST)[7],Yang 等[8]提出了同步压缩小波包变换和同步压缩曲波变换(SSCT)[9],与前面几种同步压缩变换不同,这两种方法是在二维空间实现的。随着对地震勘探精度要求越来越高,这些高分辨率时频分析方法也在不同的地震处理问题上展现了自身的优势[10-20]。由于上述一阶同步压缩变换对于频率变化剧烈的信号不能准确地进行时频聚焦,Oberlin 等[21]给出了时间域二阶同步压缩短时傅里叶变换和频率域二阶同步压缩小波变换[22]的公式,但是没有在时间域和频率域将二者统一起来。笔者从时间域和频率域分别推导出二阶同步压缩短时傅里叶变换和二阶同步压缩小波变换,通过公式推导的结果可以得到二阶同步压缩变换的统一形式。

1　方法原理

对于一个信号 $x(t)$,其连续小波变换为

$$W_x^{\varphi}(t,a)=\int_{\mathbf{R}}x(\tau)\frac{1}{\sqrt{a}}\varphi^*\left(\frac{\tau-t}{a}\right)\mathrm{d}\tau. \tag{1}$$

式中,φ 为母小波;φ^* 为 φ 的复数共轭;τ 为平移参数,决定了信号分析的时间中心;a 为尺度因子,控制着小波的拉伸或者压缩程度。连续小波变换的能量发散现象主要是发生在尺度方向的,该方向上小波系数的相位基本不变,时间方向的振荡反映了原始频率信息。同步压缩小波变换首先需要在小波域估计瞬时频率,即对小波变换 $W_x(t,a)$ 求 t 的偏导,

$$\tilde{\omega}(t,a)=\frac{-\mathrm{i}\partial_t W_x(t,a)}{2\pi W_x(t,a)},\ W_x(t,a)\neq 0. \tag{2}$$

对于简谐信号,$\tilde{\omega}(t,a)$ 即为真实频率 f。通过同步压缩的方法,把时间–尺度(t,a)的小波系数映射到时间–频率$(t,\tilde{\omega}(t,a))$处,以第 l 个频率 $\tilde{\omega}_l$ 为中心,将相邻瞬时频率范围内 $\left[\tilde{\omega}_l-\frac{1}{2}\Delta\omega,\tilde{\omega}_l+\frac{1}{2}\Delta\omega\right]$ 的小波系数相加,得到压缩变换后的时频分析结果 $T_x(t,\omega_l)$,即

$$T_x(t,\omega_l)=\Delta\omega^{-1}\sum_{a_k:\left|\tilde{\omega}_x(t,a_k)-\tilde{\omega}_l\right|\leqslant\Delta\omega/2}W_x(t,a_k)a_k^{-\frac{3}{2}}(\Delta a)_k. \tag{3}$$

其中$(\Delta a)_k=a_k-a_{k-1}$,$\Delta\omega=\tilde{\omega}_l-\tilde{\omega}_{l-1}$。

若信号 $x(t)$ 的时间域短时傅里叶变换表达式为

$$S_x^g(t,f)=\int_{\mathbf{R}}x(\tau)g^*(\tau-t)\mathrm{e}^{-i2\pi f(\tau-t)}\mathrm{d}\tau. \tag{4}$$

则其瞬时频率估计为

$$\tilde{\omega}(t,f)=\frac{-\mathrm{i}\partial_t S_x^g(t,f)}{2\pi S_x^g(t,f)},\ S_x^g(t,f)\neq 0. \tag{5}$$

相应地,同步压缩短时傅里叶变换的表达式为

$$\begin{cases}T_x(t,f)=\dfrac{1}{g(0)}\displaystyle\int_{\mathbf{R}}S_x^g(t,f)\delta(\omega-\tilde{\omega}(t,f))\mathrm{d}f,\\ g(0)\neq 0.\end{cases} \tag{6}$$

与同步压缩小波变换相似,同步压缩短时傅里叶变换也具有较高的时频聚焦能力。

一阶同步压缩变换假设信号是弱调制的,即对于任意 t,都有 $f'(t)<\varepsilon$,此时,可以用 $\tilde{\omega}(t,f)$ 估计频率 $f(t)$,但是当 $f'(t)$ 较大时,简单的一阶估计不能得到理想的结果,需要考虑短时傅里叶变换、连续小波变换等时频方法相位的二阶差分,令调制参数 $\tilde{q}(t,f)=\dfrac{\partial_t\tilde{\omega}(t,f)}{\partial_t\tilde{\tau}(t,f)}$,则二阶同步压缩变换的频率估计为

$$\tilde{\omega}^{(2)}(t,f)=\tilde{\omega}(t,f)+\tilde{q}(t,f)(t-\tilde{\tau}(t,f)). \tag{7}$$

此时,二阶同步压缩变换表达式为

$$T_x^{(2)}(t,f)=\frac{1}{g(0)}\int_{\mathbf{R}}S_x^g(t,f)\delta(\omega-\tilde{\omega}^{(2)}(t,f))\mathrm{d}f. \tag{8}$$

国外一些学者给出了时间域二阶同步压缩短时傅里叶变换和频率域二阶同步压缩小波变换的结果,但是没有在时间域和频率域将二者统一起来,本文中从时间域和频率域分别推导出二阶同步短时傅里叶变换和二阶同步压缩小波变换。

1.1 二阶同步压缩短时傅里叶变换

1.1.1 时间域二阶同步压缩短时傅里叶变换

一阶频率估计:

$$\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{-\mathrm{i}\partial_t S_x^g}{2\pi S_x^g}=\frac{-S_x^{g'}+2\pi\mathrm{i}fS_x^g}{2\pi\mathrm{i}S_x^g}=f-\frac{S_x^{g'}}{2\pi\mathrm{i}S_x^g}, \tag{9}$$

$$\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{S_x^g\ S_x^{g''}-(S_x^{g'})^2}{2\pi\mathrm{i}(S_x^g)^2}. \tag{10}$$

群延迟:

$$\tilde{\tau}(t,f)=t+\frac{\mathrm{i}\partial_f S_x^g}{2\pi S_x^g}=t+\frac{S_x^{tg}}{S_x^g}, \tag{11}$$

$$\partial_t\tilde{\tau}(t,f)=\frac{S_x^{g'}\ S_x^{tg}-S_x^{tg'}\ S_x^g}{(S_x^g)^2}. \tag{12}$$

调制参数:

$$\tilde{q}(t,f)=\frac{\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)}{\partial_t\tilde{\tau}(t,f)}=\frac{S_x^g\ S_x^{g''}-(S_x^{g'})^2}{2\pi\mathrm{i}(S_x^{g'}S_x^{tg}-S_x^{tg'}\ S_x^g)}. \tag{13}$$

1.1.2 频率域二阶同步压缩短时傅里叶变换

根据 Parseval 定理,公式(4)对应的频率域短时傅里叶变换表达式为

$$S_x^{\hat{g}}(t,f)=\int_{\mathbf{R}}\hat{X}(\xi)\hat{g}^*(\xi-f)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi\xi t}\mathrm{d}\xi. \tag{14}$$

其中,$\hat{X}(\xi)$和 $\hat{g}^*(\xi-f)$分别为 $x(\tau)$和 $g^*(\tau-t)$的傅里叶变换。

一阶频率估计:

$$\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{-\mathrm{i}\partial_t S_x^{\hat{g}}}{2\pi S_x^{\hat{g}}}=\frac{2\pi\mathrm{i}S_x^{\xi\hat{g}}+2\pi\mathrm{i}fS_x^{\hat{g}}}{2\pi\mathrm{i}S_x^{\hat{g}}}=f+\frac{S_x^{\xi\hat{g}}}{S_x^{\hat{g}}}, \tag{15}$$

$$\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{2\pi\mathrm{i}[S_x^{\xi^2\hat{g}}\ S_x^{\hat{g}}-(S_x^{\xi\hat{g}})^2]}{(S_x^{\hat{g}})^2}. \tag{16}$$

群延迟:

$$\tilde{\tau}(t,f)=t+\frac{\mathrm{i}\partial_f S_x^{\hat{g}}}{2\pi S_x^{\hat{g}}}=t+\frac{S_x^{\hat{g}'}}{2\pi\mathrm{i}S_x^{\hat{g}}}, \tag{17}$$

$$\partial_t\tilde{\tau}(t,f)=\frac{(S_x^{\hat{g}})^2+S_x^{\xi\hat{g}'}\ S_x^{\hat{g}}-S_x^{\xi\hat{g}}\ S_x^{\hat{g}'}}{(S_x^{\hat{g}})^2}. \tag{18}$$

调制参数:

$$\tilde{q}(t,f)=\frac{\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)}{\partial_t\tilde{\tau}(t,f)}=\frac{2\pi\mathrm{i}[S_x^{\xi^2\hat{g}}\ S_x^{\hat{g}}-(S_x^{\xi\hat{g}})^2]}{(S_x^{\hat{g}})^2+S_x^{\xi\hat{g}'}\ S_x^{\hat{g}}-S_x^{\xi\hat{g}}\ S_x^{\hat{g}'}}. \tag{19}$$

1.2 二阶同步压缩小波变换

公式(1)对应的频率域小波变换表达式为

$$W_x^{\hat{\varphi}}(t,a)=\sqrt{a}\int_{\mathbf{R}}\hat{X}(\xi)\hat{\varphi}^*(a\xi)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi\xi t}\mathrm{d}\xi. \tag{20}$$

若在小波变换中乘以一个加权系数 τ,则

$$\int_{\mathbf{R}}\tau x(\tau)\frac{1}{\sqrt{a}}\varphi^*\left(\frac{\tau-t}{a}\right)\mathrm{d}\tau=$$

$$a\int_{\mathbf{R}}\left(\frac{\tau-t}{a}\right)x(\tau)\frac{1}{\sqrt{a}}\varphi^*\left(\frac{\tau-t}{a}\right)\mathrm{d}\tau+$$

$$t\int_{\mathbf{R}}x(\tau)\frac{1}{\sqrt{a}}\varphi^*\left(\frac{\tau-t}{a}\right)\mathrm{d}\tau=aW_x^{t\varphi}+tW_x^{\varphi}. \tag{21}$$

公式(21)中关于 τ 的频率域表达式为

$$F\left[\int_{\mathbf{R}}\tau x(\tau)\frac{1}{\sqrt{a}}\varphi^*\left(\frac{\tau-t}{a}\right)\mathrm{d}\tau\right]=\frac{aW_x^{\hat{\varphi}'}}{2\pi\mathrm{i}}+tW_x^{\hat{\varphi}}. \tag{22}$$

1.2.1 时间域二阶同步压缩小波变换

一阶频率估计:

$$\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{-\mathrm{i}\partial_t W_x^{\varphi}}{2\pi W_x^{\varphi}}=-\frac{W_x^{\varphi'}}{2\pi\mathrm{i}aW_x^{\varphi}}, \tag{23}$$

$$\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{W_x^{\varphi}\ W_x^{\varphi''}-(W_x^{\varphi'})^2}{2\pi\mathrm{i}a^2(W_x^{\varphi})^2}. \tag{24}$$

群延迟:

$$\tilde{\tau}(t,f)=\frac{\int_{\mathbf{R}}\tau x(\tau)\frac{1}{\sqrt{a}}\varphi^*\left(\frac{\tau-t}{a}\right)\mathrm{d}\tau}{W_x^{\varphi}}=t+\frac{aW_x^{t\varphi}}{W_x^{\varphi}}, \tag{25}$$

$$\partial_t\tilde{\tau}(t,f)=\frac{W_x^{\varphi'}\ W_x^{t\varphi}-W_x^{t\varphi'}\ W_x^{\varphi}}{(W_x^{\varphi})^2}. \tag{26}$$

调制参数:

$$\tilde{q}(t,f)=\frac{\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)}{\partial_t\tilde{\tau}(t,f)}=\frac{W_x^{\varphi}\ W_x^{\varphi''}-(W_x^{\varphi'})^2}{2\pi\mathrm{i}a^2(W_x^{\varphi'}\ W_x^{t\varphi}-W_x^{t\varphi'}\ W_x^{\varphi})}. \tag{27}$$

1.2.2 频率域二阶同步压缩小波变换

一阶频率估计:

$$\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{-\mathrm{i}\partial_t W_x^{\hat{\varphi}}}{2\pi W_x^{\hat{\varphi}}}=\frac{W_x^{\xi\hat{\varphi}}}{aW_x^{\hat{\varphi}}}, \tag{28}$$

$$\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{2\pi\mathrm{i}[W_x^{\xi^2\hat{\varphi}}\ W_x^{\hat{\varphi}}-(W_x^{\xi\hat{\varphi}})^2]}{a^2(W_x^{\hat{\varphi}})^2}. \tag{29}$$

群延迟:

$$\tilde{\tau}(t,f)=\frac{\frac{aW_x^{\hat{\varphi}'}}{2\pi\mathrm{i}}+tW_x^{\hat{\varphi}}}{W_x^{\hat{\varphi}}}=t+\frac{aW_x^{\hat{\varphi}'}}{2\pi\mathrm{i}W_x^{\hat{\varphi}}}, \tag{30}$$

$$\partial_t\tilde{\tau}(t,f)=\frac{(W_x^{\hat{\varphi}})^2+W_x^{\xi\hat{\varphi}'}\ W_x^{\hat{\varphi}}-W_x^{\xi\hat{\varphi}}\ W_x^{\hat{\varphi}'}}{(W_x^{\hat{\varphi}})^2}. \tag{31}$$

调制参数:

$$\tilde{q}(t,f)=\frac{\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)}{\partial_t\tilde{\tau}(t,f)}=\frac{2\pi\mathrm{i}[W_x^{\xi^2\hat{\varphi}}\ W_x^{\hat{\varphi}}-(W_x^{\xi\hat{\varphi}})^2]}{a^2[(W_x^{\hat{\varphi}})^2+W_x^{\xi\hat{\varphi}'}\ W_x^{\hat{\varphi}}-W_x^{\xi\hat{\varphi}}\ W_x^{\hat{\varphi}'}]}. \tag{32}$$

1.3 二阶同步压缩变换调制参数的统一形式

通过公式推导可以得到时间域二阶同步压缩变换调制参数的统一形式为

$$\tilde{q}(t,f)=\frac{G_x^{\phi}\ G_x^{\phi''}-(G_x^{\phi'})^2}{2\pi\mathrm{i}P(G_x^{\phi'}\ G_x^{t\phi}-G_x^{t\phi'}\ G_x^{\phi})}. \tag{33}$$

(1)当 $G_x^{\phi}=S_x^g,P=1$ 时,$\tilde{q}(t,f)$为二阶同步压缩短时傅里叶变换的调制参数。

(2)当 $G_x^{\phi}=W_x^{\varphi},P=a^2$ 时,$\tilde{q}(t,f)$为二阶同步压

缩小波变换的调制参数。

(3) 当 G_x^{ϕ} 为 S 变换,且 $P=1$ 时,$\tilde{q}(t,f)$ 为二阶同步压缩 S 变换的调制参数。这一规律可以推广到其他二阶同步压缩线性时频变换中去。

相应地,频率域二阶同步压缩变换调制参数的统一形式为

$$\tilde{q}(t,f)=\frac{2\pi\mathrm{i}[G_x^{\xi^2\hat{\phi}}G_x^{\hat{\phi}}-(G_x^{\xi\hat{\phi}})^2]}{P[(G_x^{\hat{\phi}})^2+G_x^{\xi\hat{\phi}'}G_x^{\hat{\phi}}-G_x^{\xi\hat{\phi}}G_x^{\hat{\phi}'}]}. \tag{34}$$

同时间域二阶同步压缩变换,当 $G_x^{\hat{\phi}}$ 为不同的线性时频变换时,能够得到该变换所对应的频率域二阶同步压缩变换调制参数,进而由公式(7)和公式(8)得到具有高分辨率的二阶同步压缩变换。

在具体实现过程上,时间域二阶同步压缩变换需要用 $\phi(t)$,$\phi'(t)$,$\phi''(t)$,$t\phi(t)$,$t\phi'(t)$ 5 种窗函数得到的时间域线性时频变换进行计算,频率域二阶同步压缩变换需要用 $\hat{\phi}(t)$,$\xi\hat{\phi}(t)$,$\xi^2\hat{\phi}(t)$,$\hat{\phi}'(t)$,$\xi\hat{\phi}'(t)$ 5 种窗函数得到的频率域线性时频变换进行计算,这种计算方式避免了对相位求二阶导数,计算方便且高效。

2　方法测试与应用效果分析

2.1　模型测试

图 1 为一个合成信号 $x(t)$,该信号由 3 部分组成,一个是频率的二次方项 $\sin(2\pi\cdot40(t+0.2)^3)$,一个是关于频率的对数 $\sin(2\pi(-100\log(1.02-t)))$,这两部分分布在 0 ~ 0.8 s,第三部分为一个时频域简谐波 $\sin(2\pi(3\sin(2\pi\cdot12t)+300)t)$,分布在 0.1 ~ 0.3 s。图 2(a) ~ (c) 分别为信号 $x(t)$ 的 Gabor 变换及其对应的一阶同步压缩 Gabor 变换、二阶同步压缩 Gabor 变换,对于低频平缓的信号,两种方法都能把时频能量较好地聚焦到时频脊上,得到比较理想的时频分析结果,但是对于高频端变化比较剧烈的信号,一阶同步压缩 Gabor 变换能量发散,时频分辨率较差,二阶同步压缩 Gabor 变换可以改善一阶同步压缩 Gabor 变换时频分辨率低的问题,但是仍然存在少量的假频或者能量不够聚焦的问题。图 2(d) ~ (f) 分别为小波变换及其对应的一阶、二阶同步压缩变换方法,对于高频部分,两种方法都能得到非常高的时频分辨率,尤其是二阶同步压缩小波变换,与理论的时频谱基本一致,而对于低频 20 Hz 以下部分,一阶同步压缩小波变换时间方向上分辨率比较差,二阶同步压缩小波变换针对这一问题做出了明显的改善。相对于二阶同步压缩 Gabor 变换,二阶同步压缩小波变换更具有优越性,

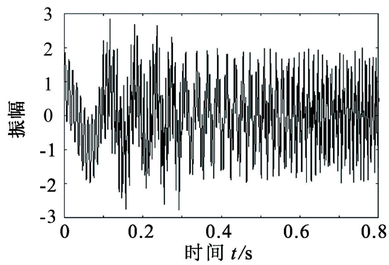

图 1　合成信号

Fig. 1　Synthetic signal

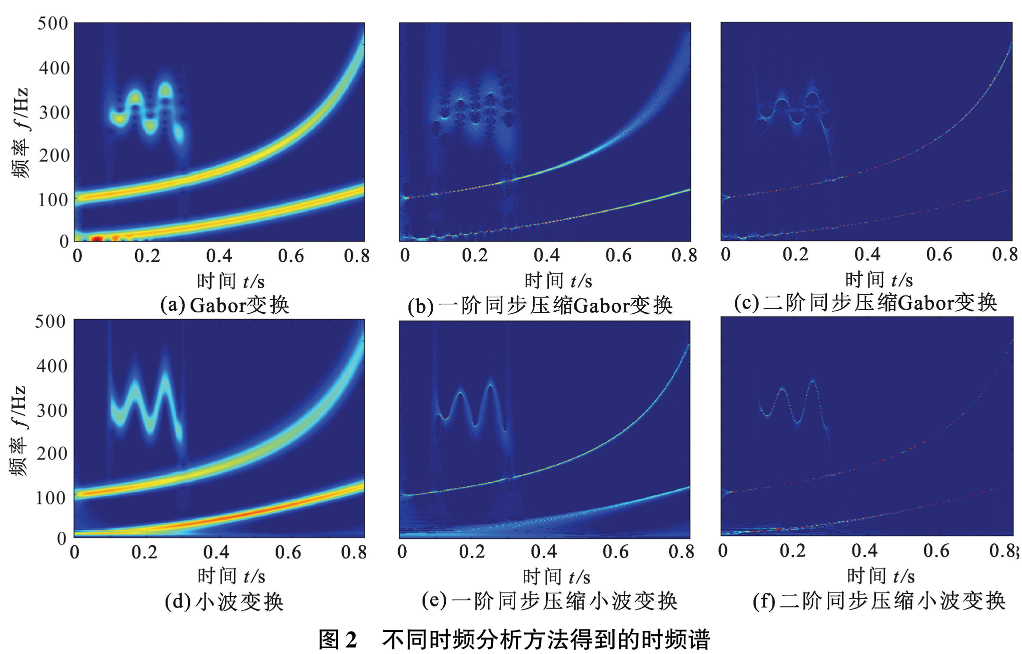

图 2　不同时频分析方法得到的时频谱

Fig. 2　Time-frequency spectrum by different methods

因此采用二阶同步压缩小波变换作为地震处理的方法。

2.2 实际资料处理

为了验证二阶同步压缩变换的适应性,选取某井区的实际资料(图 3)分别用小波变换和二阶同步压缩小波变换做处理。该连井剖面中有两口井,A 井和 B 井,目的层为层 4、5,左右两侧为目的层对应的 A、B 两井综合录井图。从两口井的录井岩性资料可以看出,右侧的 B 井目的层段中,砂砾岩储层无论是层数、单层厚度还是累计总厚度均比左侧 A 井要发育得多,且测井解释 B 井有多套含油层,A 井未见油气显示。沉积相解释 B 井为右侧高部位作为物源的湖底扇沉积。地震剖面(图 3)B 井和 A 井间有较为明显的同相轴自右向左合并尖灭现象,揭示了自 B 井到 A 井岩性、岩相的变化。

图 4(a)为 B 井井旁道的地震波形,对该地震道分别做小波变换(图 4(b))和二阶同步压缩小波变换(图 4(c)),从图 4(b)中可以看出,储层发育的目的层(1.62 ~ 1.72 s)主频大概在 18 ~ 19 Hz,图 4(c)将能量压缩到时频能量脊上,提高了时频域的分辨率。

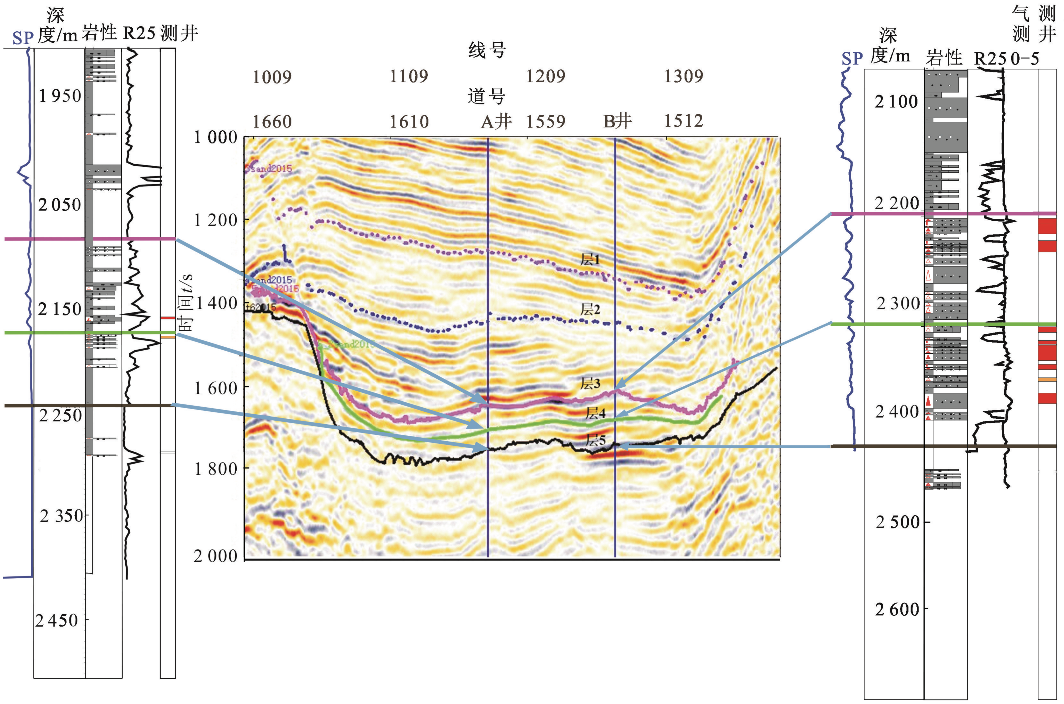

图 3 某研究区连井剖面及录井岩性对比

Fig. 3 Comparison of well-tie seismic cross-section and logging lithology of a research area

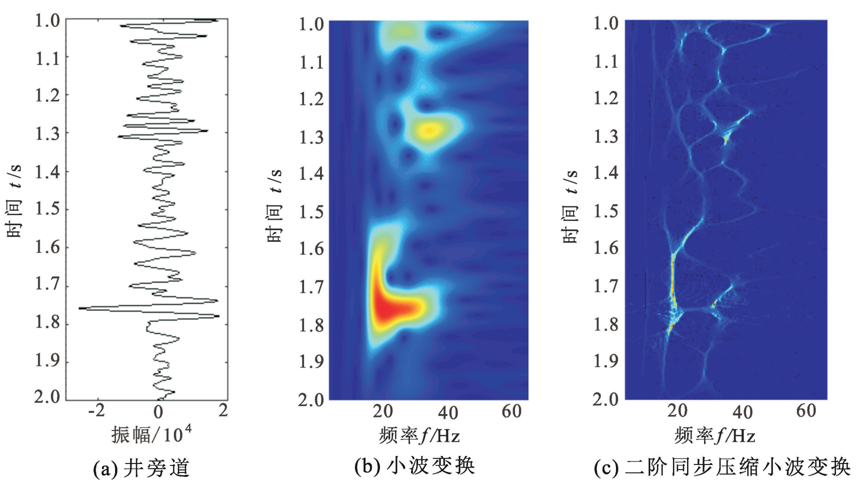

图 4 井旁道及其时频谱

Fig. 4 Borehole-side trace and its time-frequency

对所有地震道做小波变换和二阶同步压缩小波变换可以得到一个三维频率体,分别取频率为 15、17、18、19、21、22 Hz 的单频剖面(图 5,左栏为小波变换,右栏为二阶同步压缩小波变换)。图中圆圈标

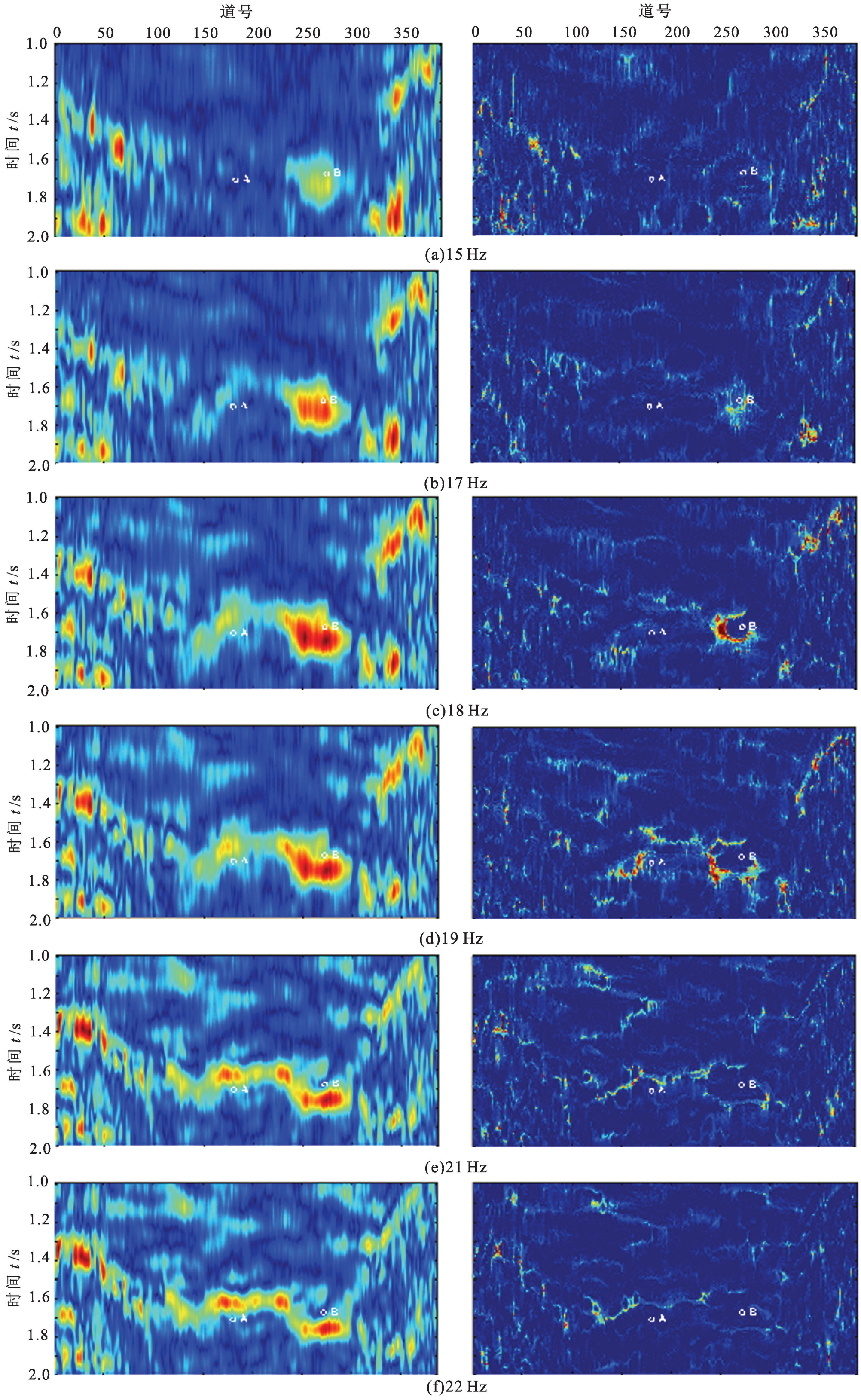

图 5　小波变换和二阶同步压缩小波变换单频剖面

Fig. 5　Single-frequency profile of wavelet transform and second-order synchrosqueezing wavelet transform

注的 A 和 B 对应着连井剖面中 A 井和 B 井目的层的中间位置,即层 4 底界。从小波变换单频剖面上可以看出,B 井所在的储层发育区出现了低频阴影现象,与 A 井区的差异较为明显,这与两井目的层段储层及其含油性的差异相对应。二阶同步压缩小波变换 17 Hz 频率剖面上,B 井位置附近出现了能量聚集,而在 15 Hz 频率剖面并没有出现这一现象,从 18 ~ 21 Hz 的频率剖面,B 井所在的区域周围出现了一圈能量强值(图 5(c) ~ (e)),其垂向幅度与图 3 所示该井的砂层组厚度相当,横向范围可能与储层的范围、含油气的边界相对应,当单频增加到 22 Hz 及以上开始消失,也进一步说明 B 井井点区目的层段的有效频率在 18 ~ 21 Hz。同时,井点 A 处未见有 B 井处的能量强值也说明了两口井之间储集性能及含油性的差异。

为了进一步说明储层的平面分布情况,取该研究区的三维地震数据体做二阶同步压缩小波变换,并取 18 Hz 频率体做时间切片,如图 6 所示,对应的时间分别为 1 500、1 614、1 654、1 680、1 714、1 736 ms。从 1614 ms 开始 B 井附近出现能量聚集,随后能量开始散开,在 B 井周围形成空白区域,直到 1714 ms 为止,空白区域闭合,而 A 井未见该现象。产生的原因可能是因为某一频段(18 Hz)的能量在油层和围岩间反应强烈,而同步压缩小波变换具有较高的时频

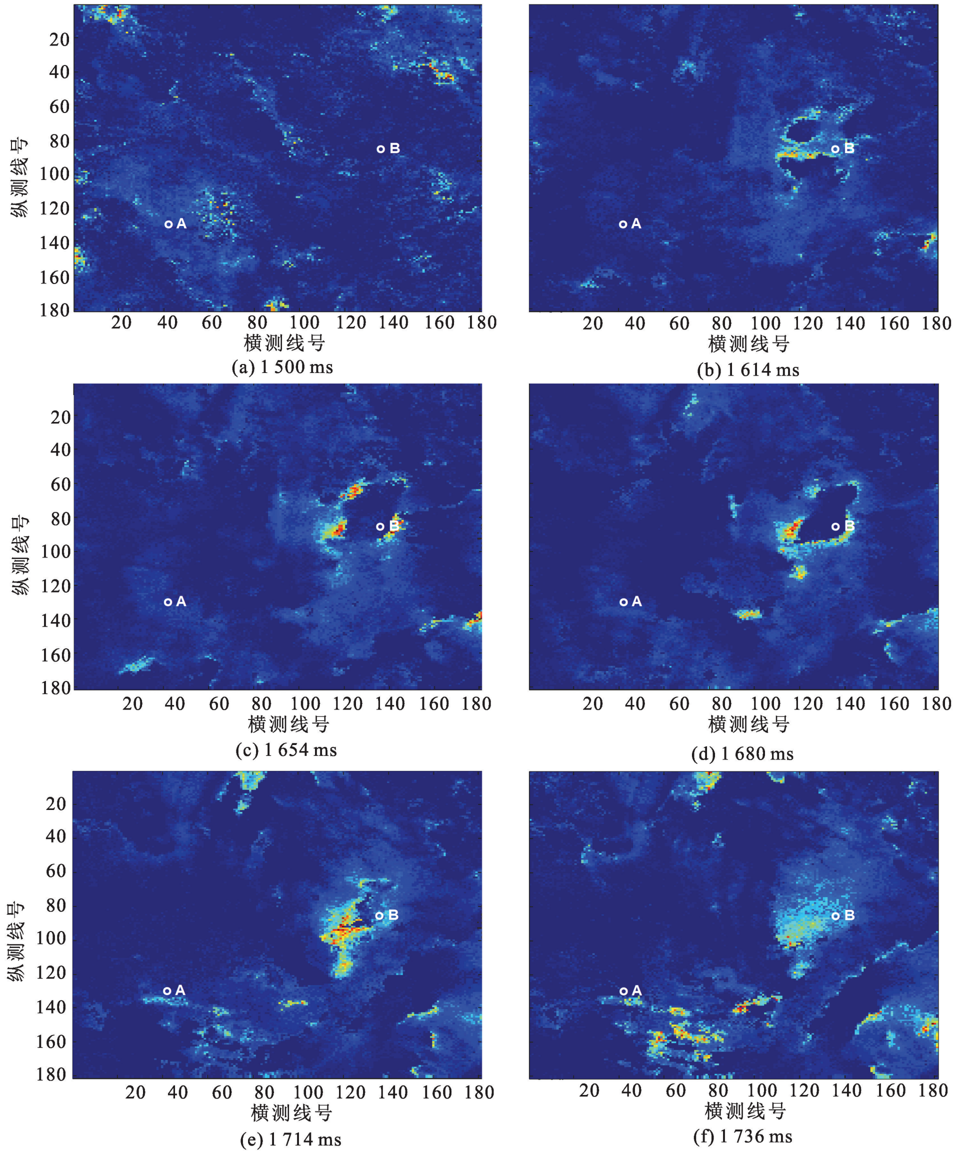

图 6 18 Hz 频率体对应的时间切片

Fig. 6 Time slices of 18 Hz frequency volume

分辨率,因此可以比较准确地识别储层边界,这一现象与实钻资料及生产单位利用属性及反演联合确定的有利圈闭相吻合,证明了二阶同步压缩小波变换对储层展布及油气分布的识别是有效的。

3　结　论

(1)通过在时间域和频率域分别推导二阶同步压缩短时傅里叶变换和二阶同步压缩小波变换可以看出,二阶同步压缩小波变换的瞬时频率调制参数除了分母上出现了尺度的二次方,其余形式与二阶同步压缩短时傅里叶变换瞬时频率调制参数相同,通过这一规律可以推广得到其他二阶同步压缩变换。

(2)相对于一阶同步压缩小波变换,二阶同步压缩小波变换具有更高的时频聚焦能力,对于识别边界和有利圈闭方面具有很大的优势。

(3)在处理地震数据时,二阶同步压缩小波变换的一些能量特征不如传统小波变换明显,可以根据需要来选择合适的时频分析方法,或者将二者联合起来使用。

参考文献:

[1]　王夕宾,郝延征,姚军,等. 东营凹陷沙一段薄层湖相碳酸盐岩成因研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016,40(1):27-34.
WANG Xibin, HAO Yanzheng, YAO Jun, et al. Genetic research of flaggy lacustrine carbonate in the first Member of Shahejie Formation, Dongying Depression[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016,40 (1):27-34.

[2]　张鹏飞,刘惠民,王永诗,等. 济阳坳陷太古界潜山储集体发育模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017,41(6):20-29.
ZHANG Pengfei, LIU Huimin, WANG Yongshi, et al. Development model of Archaeozoic buried hill reservoir in Jiyang Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(6):20-29.

[3]　李永强,侯加根,刘钰铭,等. 基于岩溶模式的溶洞储集体三维地质建模[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(5):43-50.
LI Yongqiang, HOU Jiagen, LIU Yuming, et al. 3D modeling of cave reservoirs based on karst patterns[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(5):43-50.

[4]　DAUBECHIES I. A nonlinear squeezing of the continuous wavelet transform based on auditory nerve models[J]. Wavelets in Medicine and Biology, 1996:527-546.

[5]　DAUBECHIES I, LU J, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2):243-261.

[6]　OBERLIN T, MEIGNEN S, PERRIER V. The Fourier-based synchrosqueezing transform: 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Florence, May 4-9, 2014[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2014.

[7]　HUANG Z, ZHANG J, ZHAO T, et al. Synchrosqueezing S-transform and its application in seismic spectral decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016,54(2):817-825.

[8]　YANG H, YING L. Synchrosqueezed wave packet transform for 2D mode decomposition[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2013,6(4):1979-2009.

[9]　YANG H, YING L. Synchrosqueezed curvelet transform for two-dimensional mode decomposition[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2014,46(3):2052-2083.

[10]　HERRERA R H, HAN J, MIRKO V D B. Applications of the synchrosqueezing transform in seismic time-frequency analysis[J]. Geophysics, 2014,79(3):V55-V64.

[11]　CHEN Y, LIU T, CHEN X, et al. Time-frequency analysis of seismic data using synchrosqueezing wavelet transform[C/OL]//2014 SEG International Exposition and Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists, 2014, October 26-31[2018-06-22]. https://doi.org/10.1190/segam2014-0034.1.

[12]　WANG P, GAO J, WANG Z. Time-frequency analysis of seismic data using synchrosqueezing transform[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014,11(12):2042-2044.

[13]　LIU W, CAO S, LIU Y, et al. Synchrosqueezing transform and its applications in seismic data analysis[J]. Journal of Seismic Exploration, 2016,25(3):27-44.

[14]　LI C, LIANG M. A generalized synchrosqueezing transform for enhancing signal time-frequency representation[J]. Signal Processing, 2012, 92(9):2264-2274.

[15]　CHEN H, LU L, XU D, et al. The synchrosqueezing algorithm based on generalized S-transform for high-precision time-frequency analysis[J]. Applied Sciences, 2017,7(8):769.

[16]　HERRERA R H, TARY J B, van DER BAAN M. Time-frequency representation of microseismic signals using the synchrosqueezing transform[C/OL]//GeoCo-

nvention, Alberta, Canada, May 6-10, 2013 [2018-06-22]. https://www. geoconvention. com/archives/2013/094_GC2013_Time-Frequency_Representation. pdf.

[17] GHOLTASHI S, NAZARI SIAHSAR M A, ROSHAN-DELKAHOO A, et al. Synchrosqueezing-based transform and its application in seismic data analysis[J]. Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, 2015,4(4): 1-14.

[18] JIANG Q, SUTER B W. Instantaneous frequency estimation based on synchrosqueezing wavelet transform [J]. Signal Processing, 2017,138:167-181.

[19] ZHANG Y, LI Z, WANG J. Time-varying spectral modeling deconvolution based on synchrosqueezed wavelet transform to improve seismic data resolution[C/OL]//2017 SEG International Exposition and Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists, 2017, September 24-27[2018-06-22]. https://doi. org/10. 1190/segam2017-17586876. 1.

[20] ZHANG Y, LI Z, WANG J. Seismic data resolution improvement by compensating time-frequency spectrum of synchrosqueezing wavelet transform[C/OL]//International Geophysical Conference, Qingdao, China, 2017, April 17-20[2018-06-22]. https://doi. org/10. 1190/IGC2017-119.

[21] OBERLIN T, MEIGNEN S, PERRIER V. Second-order synchrosqueezing transform or invertible reassignment? towards ideal time-frequency representations[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2015,63(5):1335-1344.

[22] OBERLIN T, MEIGNEN S. The second-order wavelet synchrosqueezing transform: 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), New Orleans, March 5-9, 2017[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2017.

(编辑 修荣荣)