تحلیل زمان- فرکانس داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تبدیل استخراج همزمان

مهدی برآبادی[۱]، محمد رداد[۲]، امین روشندل کاهو [۳]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، barabadi.mahdi@gmail.com
۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، mradad@shahroodut.ac.ir
۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، roshandel@shahroodut.ac.ir

چکیده:
تحلیل زمان-فرکانس داده‌های لرزه‌ای کاربردهای مختلف پردازشی و تفسیری در مطالعات ژئوفیزیک دارد. دست‌یابی به یک نمایش زمان-فرکانس با تفکیک پذیری بهتر، نتایج بهتری نیز در این کاربردها به ارمغان می‌آورد. در این مقاله تکنیک جدیدی برای تحلیل زمان-فرکانس داده‌های لرزه‌ای با قدرت تفکیک بالا تحت عنوان تبدیل استخراج همزمان (SET) استفاده شده است. SET اطلاعات زمان فرکانسی حاصل از تبدیل فوریه زمان-کوتاه را حفظ و انرژی پخش شده اضافی حول فرکانس لحظه‌ای استخراج شده در صفحه زمان-فرکانس را که با عث کاهش تفکیک‌پذیری می‌گردد حذف می‌کند. عملکرد این روش در ارائه نمایش زمان-فرکانس با تفکیک بالا در سیگنال مصنوعی لرزه‌ای و غیرلرزه‌ای نشان داده شده است. همچنین از این روش برای تشخیص سایه کم-فرکانس مربوط به یک مخزن گازی بهره گرفته شده است. نتایج نشان داد که تبدیل استخراج همزمان از عملکرد قابل قبولی در کاربرد لرزه‌ای مورد نظر برخوردار است.

کلمات کلیدی: تحلیل زمان– فرکانس، تبدیل فوریه زمان کوتاه، تبدیل استخراج همزمان، تفکیک‌پذیری، داده لرزه‌ای، سایه کم فرکانس

Time-frequency analysis of seismic data using synchroextracting transform

Mahdi Barabadi[1], Mohammad Radad[2], Amin Roshandel Kahoo[3]
1- M.Sc. Student, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
2- Assistant Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
3- Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Abstract
Time-frequency analysis of seismic data has various processing and interpretation applications in geophysical studies. Providing a time-frequency representation with better resolution results in more accuracy in the applications. In this paper, a new technique for time-frequency analysis of seismic data with high resolution called as synchroextracting transform (SET) is used. SET retains the time-frequency energy, provided by short-time Fourier transform, around the extracted instantaneous frequency and eliminates the extra energy elsewhere and by this way the resolution is increased. The performance of this method has been shown in providing high resolution time-frequency representation through some experiments on synthetic seismic and non-seismic signals. Also, this method has been used to detect the low-frequency shadow related to a gas reservoir. The results showed that the synchroextracting transform has an acceptable performance in the considered seismic application.

Keywords: time frequency analysis, short-time Fourier transform, synchroextracting transform, resolution, seismic data, low-frequency shadow.

۱ مقدمه

سیگنال‌های لرزه‌ای از جنس سیگنال‌های ناپایا هستندکه محتوی فرکانسی متغیر با زمان دارند و برای تحلیل آنها به تبدیل‌هایی نیاز است که اطلاعات زمانی و فرکانسی را به صورت همزمان ارائه دهند، روش‌های نمایش زمان-فرکانس این امکان را فراهم می‌سازد. لزوم نمایش زمان–فرکانسی که دارای قدرت تفکیک مناسب در راستای زمان و فرکانس به صورت همزمان باشد تا اطلاعاتی نظیر دامنه و فرکانس لحظه‌ای را بتوان با دقت بالاتری تخمین زد، در تحلیل سیگنال‌های لرزه‌ای بسیار مهم و حائز اهمیت است. اخیراً تحقیقات متعددی در زمینه‌ی افزایش تفکیک‌پذیری بر مبنای بازچینی (reassignment) و فشرده‌سازی همزمان (synchrosqueezing) انجام شده است. اساس کل این روش‌ها بر مبنای بازچینی انرژی در صفحه‌ی زمان-فرکانس در موقعیت فرکانس لحظه‌ای است. در همین زمینه یک تکنیک جدید در زمینه‌ی دستیابی به نمایش زمان-فرکانس با قدرت تفکیک ارتقاء

یافته، تبدیل استخراج همزمان (synchroextracting transform, SET) (یو و همکاران، ۲۰۱۷) می‌باشد که بعنوان فرایندی پساپردازشی از تبدیل فوریه زمان-کوتاه است. ایده اصلی تبدیل استخراج همزمان از روش نظریه نمایش زمان- فرکانس ایده آل (ITFA) الهام گرفته شده است که اطلاعات زمان فرکانسی حاصل از تبدیل فوریه زمان-کوتاه را حفظ و انرژی پخش شده اضافی در صفحه زمان-فرکانس را حذف می‌کند. در زمینه استفاده از روش‌های تحلیل زمان-فرکانس برمبنای بازچینی و فشرده‌سازی در تحلیل داده‌های لرزه‌ای می‌توان به تحقیقات هررا و همکاران (۲۰۱۴) در زمینه آشکارسازی کانال‌ها، در تخمین تضعیف (تری و همکاران،۲۰۱۷)، و در اکتشاف هیدروکربن (مهدوی و همکاران، ۲۰۲۱؛ رداد، ۱۳۹۸) اشاره کرد. در این مقاله از روش SET برای آشکار سازی سایه‌کم فرکانس در داده‌های لرزه‌ای یکی از میادین گازی ایران استفاده شده است.

۲ روش تحقیق

۲-۱ تبدیل فوریه‌ی زمان‌کوتاه (STFT)

تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) سیگنال $x(t)$ به صورت معادله (۱) نمایش داده می شود که $w(t)$ پنجره زمانی است که توزیع طیفی محلی در درون آن با تبدیل فوریه محاسبه می‌شود و نمایش زمان فرکانس $G_e(\tau.\omega)$ بدست می‌آید:

$$G_e(\tau,\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\,w(t-\tau)\,e^{-j\omega t}\,dt \qquad (۱)$$

۲-۲ تبدیل استخراج همزمان (SET)

SET بعنوان ترکیبی از روش فشرده‌سازی و نظریه نمایش زمان-فرکانس ایده‌آل معرفی شد. با استخراج دامنه‌ی فرکانسی ماکزیمم، حول فرکانس لحظه‌ای (در نمایش زمان-فرکانس تبدیل فوریه زمان کوتاه سیگنال) و حذف بقیه‌ی دامنه‌ها توسط عملگر استخراج همزمان یک نمایش جدید زمان-فرکانس با قدرت تفکیک‌پذیری بالا در راستای فرکانس بصورت رابطه‌ی (۲) ارائه می‌دهد (یو و همکاران، ۲۰۱۷):

$$Te(t,\omega)=G_e(t,\omega)\cdot\delta\left(\omega-\omega_0(t,\omega)\right) \qquad (۲)$$

که در این رابطه $G_e(t,\omega)$ تبدیل فوریه زمان کوتاه سیگنال و $\delta\left(\omega-\omega_0(t,\omega)\right)$ را عملگر استخراج همزمان (SEO) می نامند که می‌توان آن را به صورت رابطه‌ی (۳) تفسیر کرد.

$$\delta\left(\omega-\omega_0(t,\omega)\right)=\begin{cases}1 & ,\ \omega=\omega_0\\ 0 & ,\ \omega\neq\omega_0\end{cases} \qquad \omega_0(t,\omega)=i\,\frac{G_e^{w'}(t,\omega)}{G_e(t,\omega)}+\omega \qquad (۳)$$

که $G_e^{w'}(t,\omega)$ تبدیل فوریه زمان‌کوتاه با مشتق تابع پنجره نسبت به زمان $w'(t)$ می‌باشد. بنابراین عملگر استخراج همزمان می‌تواند قابلیت زیر را در اختیار ما قرار دهد:

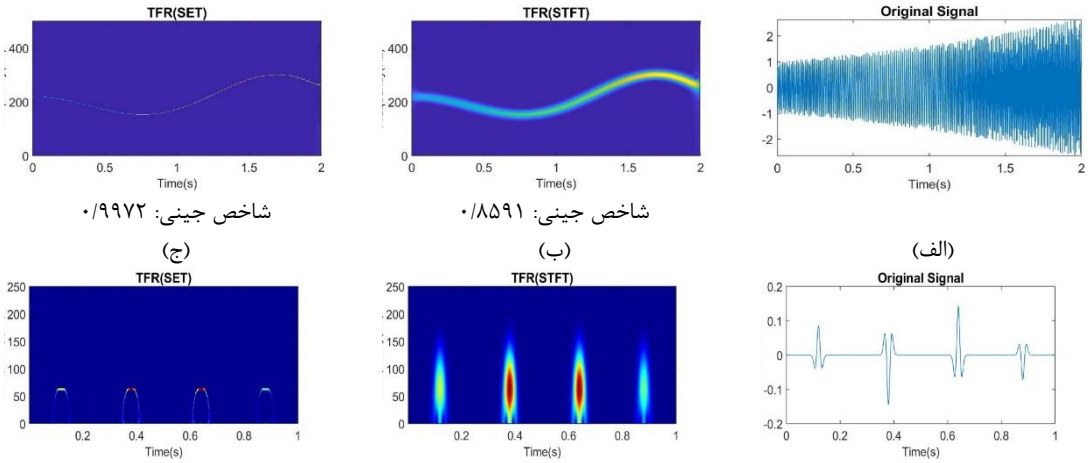
$$Te(t,\omega)=\begin{cases}G_e(t,\omega) & ,\ \omega=\omega_0\\ 0 & ,\ \omega\neq\omega_0\end{cases} \qquad (۴)$$

در تئوری، عملگر استخراج همزمان، ضرایب زمان-فرکانس از $G_e(t,\omega)$ را فقط در امتداد فرکانس لحظه‌ای استخراج می‌کند و بقیه ضرایب حذف می‌شوند. روش SET تنها از ضریب زمان-فرکانسی استفاده می‌کند که دارای حداکثر مقدار برای تولید یک نمایش زمان-فرکانس جدید است به طوری که اثر نویزها بر نتیجه زمان-فرکانس را می‌توان به حداقل رساند. روش تبدیل استخراج همزمان $Te(t,\omega)$ می‌تواند انرژی متمرکزتری نسبت به نتیجه STFT اصلی داشته باشد و وضوح زمان-فرکانس می‌تواند بسیار بهبود یابد.

۳ سیگنال مصنوعی

برای نمایش کارایی تبدیل SET، این تبدیل بر روی یک سیگنال غیرلرزه‌ای مصنوعی و یک سیگنال لرزه‌ای مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در شکل ۱ مشخص است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمایش زمان-فرکانس حاصل از SET تمرکز انرژی بسیار بالاتری نسبت به نتیجه STFT دارد. برای بررسی تمرکز انرژی معیارهای مختلفی تعریف شده‌اند که شاخص جینی (Gini Index) یکی از آنها می‌باشد (رداد و همکاران، ۲۰۱۵). هر چقدر این معیار به ۱ نزدیک‌تر باشد سیگنال متمرکزتر و قدرت

تفکیک‌پذیری بیشتری دارد. در شکل در زیر هر نقشه مقدار شاخص جینی برای مقایسه کمی ارائه شده است که مشاهده می‌شود که توزیع زمان-فرکانس حاصل از روش SET نسبت به روش STFT در مورد هر دو سیگنال شاخص جینی بالاتر و بنابراین تمرکز انرژی بالاتری ارائه داده است.



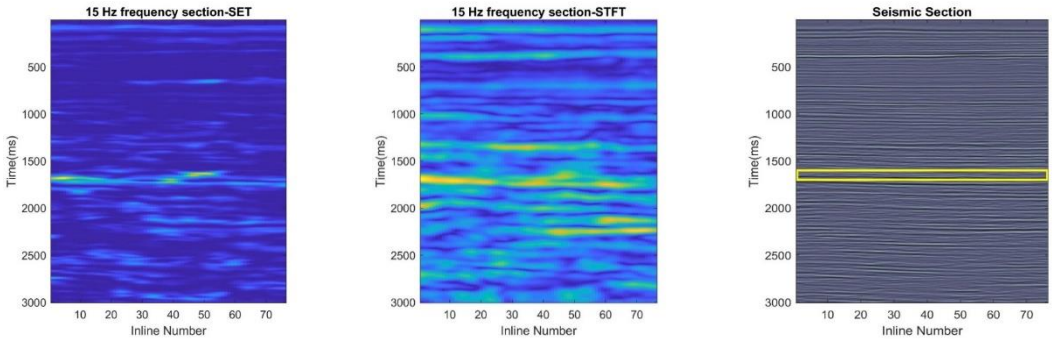
(الف) (ب) شاخص جینی: ۰/۸۵۹۱ (ج) شاخص جینی: ۰/۹۹۷۲

(د) (ه) شاخص جینی: ۰/۸۶۶۸ (و) شاخص جینی: ۰/۹۹۶۹

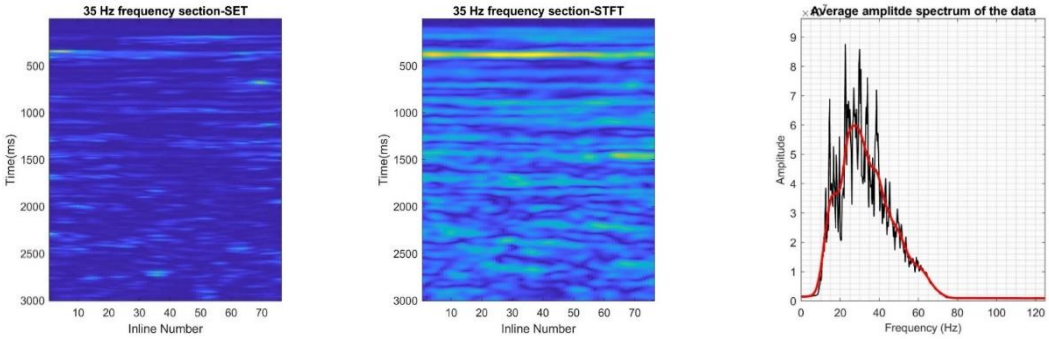
شکل ۲. (الف) و (د) بترتیب سیگنال‌های مصنوعی غیرلرزه‌ای و لرزه‌ای، (ب) و (ه) به ترتیب نمایش‌های زمان-فرکانس حاصل از STFT و (ج) و (و) به ترتیب نمایش‌های زمان-فرکانس حاصل از SET را نشان می‌دهند.

۴ مثال لرزه‌ای واقعی

تضعیف امواج لرزه‌ای که از داخل مخازن نفتی و گازی عبور می‌کنند، تابعی از خصوصیات سنگ مخزن است. این تضعیف بصورت کاهش انرژی فرکانس‌های بالا مشاهده می‌شود و این ناهنجاری‌های تضعیف می‌توانند شاخص مهم هیدروکربن باشند. این اثر با عنوان سایه کم-فرکانس شناخته می‌شود (رداد، ۱۳۹۸). مقایسه مقاطع لرزه‌ای تک فرکانس متفاوت (فرکانس‌های زیاد و کم) می‌تواند برای آشکارسازی سایه‌های کم-فرکانس که توسط مخازن هیدروکربن ایجاد شده‌اند، بکار رود. اثر سایه کم-فرکانس بصورت ناهنجاری‌های با دامنه بالایی در فرکانس کم مشاهده می‌شود که در فرکانس زیاد وجود ندارند. به عنوان یک کاربرد لرزه‌ای و نیز نمایش کارایی تبدیل SET در مورد یک مثال واقعی، آشکارسازی سایه کم فرکانس بر روی یک مقطع لرزه‌ای مربوط به یکی از میادین هیدروکربنی در نظر گرفته شده است. مقاطع تک فرکانس ۱۵و ۳۵ هرتز توسط تبدیلSTFT و SET محاسبه شد. نتایج حاصل در شکل ۲ نشان می‌دهد حضور ناهنجاری‌های کم-فرکانس (۱۵ هرتز) با دامنه‌ی بالا و تضعیف آن در فرکانس زیاد (۳۵ هرتز) در نتایج حاصل از SET با تمرکز بهتری مشاهده می‌شود که بیانگر حضور گاز در محدوده‌ی زمانی ۱۶۰۰-۱۷۰۰ میلی ثانیه است که در شکل ۲الف نیز محدوده‌ی مخزن با مستطیل زرد رنگ نشان داده شده است.



(ه) (ج) (الف)



(و) (د) (ب)

شکل ۳. (الف) یک مقطع لرزه‌ای مربوط به یک میادین گازی، (ب) طیف دامنه میانگین مقطع، (ج) مقطع تک-فرکانس ۱۵ هرتزی حاصل از روش STFT، ، (د) مقطع تک-فرکانس ۳۵ هرتزی حاصل از روش STFT ، (ه) مقطع تک-فرکانس ۱۵ هرتزی حاصل از روش SET، (و) مقطع تک-فرکانس ۳۵ هرتزی حاصل از روش SET.

۵ نتیجه گیری

در این مقاله، SET به عنوان یک ابزار نمایش زمان-فرکانس با قدرت تفکیک بالا جهت پردازش سیگنال‌های ناپایا ارائه شد. نشان داده شد که SET با حفظ انرژی حول فرکانس لحظه‌ای (در نمایش زمان-فرکانس STFT) و حذف بقیه‌ی انرژی می‌تواند تفکیک‌پذیری زمان-فرکانسی STFT را افزایش دهد. نتایج آزمایش روی سیگنال‌های مصنوعی این موضوع را تأیید کرد. همچنین بعنوان کاربرد لرزه‌ای مشاهده شد که می‌توان با استفاده از روش SET مقاطع تک-فرکانس با قدرت تفکیک بالاتری تهیه کرد که به تشخیص بهتر سایه‌های کم-فرکانس کمک کند.

۶ مراجع

رداد، م.، ۱۳۹۸، تحلیل زمان-فرکانس داده‌های لرزه‌ای با روش تبدیل S بازچینی شده برای آشکارسازی سایه‌های کم-فرکانس: پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۵، ۲۸۳-۲۹۳.

Herrera, R. H., Han, J., and van der Baan, M. 2014, Applications of the synchrosqueezing transform in seismic time-frequency analysis: Geophysics, **79**, V55–V64.

Radad, M., Gholami, A. and Siahkoohi, H. R. 2015, S-transform with maximum energy concentration: Application to non-stationary seismic deconvolution: Journal of Applied Geophysics, **118**, 155–166.

Tary, J. B., van der Baan, M., and Herrera, R. H., 2017, Applications of high-resolution time-frequency transforms to attenuation estimation: Geophysics, **82**, V7–V20.

Yu, G., Yu, M. and Xu, C., 2017, Synchroextracting transform: IEEE Transactions on Industrial Electronics, **64**, 8042-8054.