



تحلیل زمان-فرکانس داده‌های لرزه‌ای با روش تبدیل S بازچینی شده برای آشکارسازی سایه‌های کم-فرکانس

محمدرداد^۱

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۸

* نویسنده مسئول مکاتبات: mradat@shahroodut.ac.ir

چکیده

دستیابی به نمایش زمان-فرکانس سیگنال با تفکیک‌پذیری زمانی و فرکانسی قابل قبول، برای اهداف خاص در مطالعات کاربردی مختلف، همواره یکی از چالش‌های محققین در زمینه پردازش سیگنال بوده است. در تحلیل داده‌های لرزه‌ای نیز استفاده از یک نمایش زمان-فرکانس با تفکیک‌پذیری بالا، دقت بالاتر در پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تحلیل زمان-فرکانس را نتیجه خواهد داد. در اکثر روش‌های تحلیل زمان-فرکانس، یک فرایند هموارسازی در تولید نمایش زمان-فرکانس سیگنال انجام می‌شود؛ که باعث پخش شدن انرژی در صفحه زمان-فرکانس و کاهش توان تفکیک‌پذیری می‌گردد. یکی از فنون کارآمد برای جبران این رخداد و افزایش تفکیک‌پذیری، بازچینی می‌باشد. این فن قادر است از طریق انتقال و تمرکز انرژی پخش شده در صفحه زمان-فرکانس به موقعیت واقعی آن، تفکیک‌پذیری زمانی و فرکانسی بسیار بالایی ارائه دهد. بازچینی بر روی روش‌های مختلف تحلیل زمان-فرکانس پیاده‌سازی شده و عملکرد آن در تحقیقات مختلف نشان داده شده است. در این مقاله تبدیل S بازچینی شده؛ که یکی از رهیافت‌های جدید برای ارتقای تفکیک‌پذیری زمانی و فرکانسی در نمایش زمان-فرکانس حاصل از تبدیل S است، برای استخراج برخی نشانگرهای لرزه‌ای بکار گرفته خواهد شد. در این مقاله عملکرد این روش در ارائه تفکیک‌پذیری قابل قبول با آزمایش بر روی سیگنال‌های مصنوعی ناپایای غیر لرزه‌ای و لرزه‌ای نشان داده می‌شود. بعنوان یک کاربرد لرزه‌ای، تبدیل S بازچینی شده در تهیه نشانگرهای تک-فرکانس، دامنه لحظه‌ای، فرکانس لحظه‌ای غالب و فاکتور شیرینی از تحلیل زمان-فرکانس داده‌ی لرزه‌ای مربوط به یک میدان هیدروکربنی برای مطالعه ناهنجاری‌های سایه کم-فرکانس بکار گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این روش قادر است تمرکز انرژی بسیار بالاتری نسبت به تبدیل S استاندارد ارائه دهد و رویدادها و ناهنجاری‌ها با تفکیک‌پذیری بهتری در مقاطع نشانگرها نمایش داده شده و با دقت بیشتری تفسیر شوند.

واژگان کلیدی

تحلیل زمان-فرکانس
تبدیل S
بازچینی
نشانگر لرزه‌ای
سایه کم-فرکانس

۱- مقدمه

امروزه روش‌های تحلیل زمان-فرکانس جزء رایج مطالعات پردازش سیگنال و تصویر با مقاصد عملی در حوزه‌های مختلف علوم نظیر پزشکی، مهندسی برق، مهندسی مکانیک، علوم زمین و غیره شده است. در زمینه پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای از گذشته تا به امروز تحقیقات مختلفی انجام شده است؛ که می‌توان به مباحث نوفه‌زدایی (Liu and Fomel, 2010)، تخمین تضعیف (Tary et al., 2017)، واهمامیخت (Margrave et al., 2011)، اکتشافات هیدروکربن (Chen et al., 2017)، تصویرسازی کانال‌ها و گسل-ها (Herrera et al., 2014) و غیره اشاره کرد.

روش‌های تحلیل زمان-فرکانس متعدد هستند؛ اما می‌توان در یک نوع از دسته‌بندی خاص آنها را به سه دسته کلی تقسیم کرد. دسته اول روش‌های بر مبنای تحلیل فوریه هستند؛ که می‌توان به تبدیل فوریه زمان-کوتاه (STFT) (Gabor, 1946)، تبدیل S (ST) (Stockwell et al., 1996) و توزیع ویگنر-ویل (WVD) (Martin and Flandrin, 1985) اشاره کرد. دسته دوم روش‌های بر مبنای تحلیل موجک هستند؛ که تبدیل‌های موجک (WT) پیوسته و گسسته از آن دسته هستند (Mallat, 1999). دسته سوم از این نوع دسته‌بندی بر مبنای داده است، که شامل روش‌هایی مثل تجزیه مُد تجربی (EMD) می‌شوند (Haung and Wu, 2008). یکی از دلایل اصلی در توسعه پیوسته روش‌های تحلیل زمان-فرکانس تلاش برای دستیابی به تفکیک‌پذیری بهتر بوده است. اولین گام و البته ساده‌ترین راه برای نیل به این هدف تغییر طول پنجره در روش STFT است؛ که می‌توان یک توازن بین تفکیک‌پذیری زمانی و فرکانسی برقرار کرد. ایجاد انعطاف بیشتر در پنجره STFT باعث توسعه تبدیل S توسط استاکول و همکاران (Stockwell et al., 1996) شد. با این وجود که تبدیل S از یک پنجره گاوسی که پهنای آن با فرکانس بصورت وارون تغییر می‌کند، توانست تفکیک‌پذیری بهتری نسبت به STFT ارائه دهد؛ اما هنوز ضعف در ارائه تفکیک‌پذیری مطلوب در همه مؤلفه‌های فرکانسی را داشت (تفکیک‌پذیری زمانی پایین در فرکانس‌های پایین و تفکیک‌پذیری فرکانسی پایین در فرکانس‌های بالا)؛ که این موضوع باعث توسعه اصلاحاتی بر تبدیل S تحت عنوان تبدیل S تعمیم‌یافته (GST) گشت. در GST توابع دلخواه برای پنجره و دخیل کردن پارامترهای تأثیرگذار بیشتر در پهنای پنجره رویکرد محققین بوده است (Pinnegar and Mansinha, 2003; Liu et al., 2018). در ادامه تلاش‌ها برای افزایش قدرت تفکیک-پذیری در تبدیل S، رداد و همکاران (Radad et al., 2015) از معیارهای تمرکز انرژی بهره بردند و بر اساس معیار مورد نظر از طریق یک فرایند بهینه‌سازی بهترین پهنای پنجره را در هر مؤلفه فرکانسی پیدا کردند. روش بازچینی (RM) رهیافت دیگری در همین زمینه است. استفاده از این روش و کاربرد آن در نمایش‌های زمان-فرکانس در ابتدا توسط اوگر و فلاندرین (Auger and Flandrin, 1995) پیشنهاد شد. رهیافت این روش انتقال انرژی پخش شده در صفحه زمان فرکانس به مختصات واقعی آنها با بهره-گیری از یک فرایند بازچینی است. همزمان با معرفی RM، دابیشز و مائس

(Daubechies and Maes, 1996) شیوه دیگری را، که مشابه با RM و بر مبنای فاز بود، توسعه دادند و آنرا تبدیل فشرده‌ساز همزمان (SST) نام نهادند. الگوریتم این دو شیوه تا حدود زیادی مشابه با یکدیگر است، اما دو تفاوت بارز دارند: اول این که فرایند بازچینی در SST تنها در امتداد فرکانس، اما در RM در هر دو مسیر زمان و فرکانس انجام می‌شود؛ تفاوت دوم این که بازسازی کامل سیگنال در SST امکان‌پذیر بوده ولی در RM این امکان وجود ندارد. نکته دیگری که در مورد RM و SST می‌توان اشاره کرد، این است که در روش تبدیل S همانند تبدیل فوریه زمان-کوتاه و تبدیل موجک، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ باعث می‌شود که نتوان همزمان تفکیک‌پذیری زمانی و فرکانسی قابل قبولی بدست آورد. RM و SST که به لحاظ الگوریتم مشابه هستند، دو روش پس-پردازش هستند و در واقع برای بالا بردن تمرکز انرژی در نمایش زمان-فرکانس بکار می‌روند؛ که به شکلی رفع مشکل عدم قطعیت هایزنبرگ را هدف قرار داده‌اند (Tary et al., 2017; Pham and Meignen, 2018). کاربرد روش بازچینی و فشرده‌سازی همزمان تا کنون بر روی نمایش‌های زمان-فرکانس بر مبنای تبدیل فوریه زمان-کوتاه (Oberlin et al., 2014)، تبدیل موجک (Daubechies et al., 2011)، تبدیل کرولت (Yang and Ying, 2014) و تبدیل S (Fourer et al., 2015; Huang et al., 2016) اعمال شده است. در مورد تبدیل S، فوره و همکاران (Fourer et al., 2015) فرمول-بندی و اثبات روابط حاکم بر تبدیل S بازچینی شده (RST) و تبدیل S فشرده شده همزمان (SSST) را انجام داده‌اند. در این مقاله نسخه بازچینی شده تبدیل S (RST) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در زمینه استفاده از RM و SST در مورد داده‌های لرزه‌ای می-توان به تحقیقات هرا و همکاران (Herrera et al., 2014) در زمینه آشکارسازی کانال‌ها، تری و همکاران (Tary et al., 2017) در تخمین تضعیف، موسوی و لنگستون (Mousavi and Langston, 2017) در نوفه‌زدایی لرزه‌ای و چن و همکاران (Chen et al., 2017) در اکتشاف هیدروکربن اشاره کرد. همچنین در مورد استفاده از نسخه‌های بازچینی شده و فشرده شده همزمان تبدیل S در رابطه با تحلیل زمان-فرکانس داده‌های لرزه‌ای می‌توان به تحقیقات هوانگ و همکاران (Huang et al., 2017) در زمینه آشکارسازی هیدرات‌های گازی و چن و همکاران (Chen et al., 2017) و ژونگ-لای و همکاران (Zhong-Lai, 2017) در زمینه آشکارسازی گاز می‌توان اشاره کرد که همگی از SSST استفاده کرده‌اند. همانطور که پیش‌تر اشاره شد هر دو روش RM و SST، که بر روی نمایش-های زمان-فرکانس (در اینجا تبدیل S) پیاده‌سازی می‌شوند، قادر هستند که انرژی را در صفحه زمان-فرکانس به میزان بسیار زیادی متمرکز کنند. اما با توجه به اینکه فرایند بازچینی در RM در هر دو مسیر زمان و فرکانس انجام می‌شود بنابراین قادر است تمرکز انرژی بیشتری نسبت به SST ارائه دهد که در آن بازچینی تنها در امتداد فرکانس صورت می‌گیرد. در این مقاله با توجه به قدرت بالاتر RM در متمرکزسازی انرژی از تبدیل S بازچینی شده (RST) به جای تبدیل S فشرده شده همزمان (SSST) استفاده می‌شود. اما همانطور که بیان شد RM (و همچنین RST) قادر به

$$g(t, \omega) = \frac{|\omega|}{(2\pi)^{3/2}} e^{-\frac{\omega^2 t^2}{8\pi^2}} \quad \text{Fourer et al., (2015)}$$

ثابت کردند که بین نمایش زمان-فرکانس حاصل از تبدیل S و توزیع ویگنر-ویل رابطه زیر وجود دارد:

$$\left| ST_x^g(t, \omega) \right|^2 = \frac{|\omega|}{2\pi^{3/2}} \iint_{R^2} W_x(\tau, \nu) e^{-\frac{\omega^2(t-\tau)^2}{4\pi^2}} e^{-\frac{4\pi^2(\nu-\omega)^2}{\omega^2}} d\tau \frac{d\nu}{2\pi} \quad (3)$$

و با در نظر گرفتن این موضوع به فرمول‌بندی بازچینی تبدیل S پرداختند. همان‌طور که پیش‌تر بیان شده هدف فرایند روش بازچینی این است که انتقال‌های زمان-فرکانسی ناشی از هموارسازی دوبعدی جبران شود و به عبارتی انرژی پخش شده در صفحه زمان-فرکانس به موقعیت واقعی منتقل شود. برای این کار نیاز است که مختصات مرکز توزیع انرژی زمان-فرکانسی واقعی (عملگرهای بازچینی) تعیین شود. در مورد تبدیل S عملگرهای بازچینی این گونه محاسبه می‌شوند (Fourer et al., 2015):

$$\begin{aligned} \hat{t}(t, \omega) &= t - \text{Re} \left(\frac{ST_x^{Tg}(t, \omega)}{ST_x(t, \omega)} \right) \\ \hat{\omega}(t, \omega) &= \omega + \text{Im} \left(\frac{ST_x^{Dg}(t, \omega)}{ST_x(t, \omega)} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

که $Tg(t) = tg(t)$ و $Dg(t) = \frac{dg(t)}{dt}$ و همچنین Re و Im به ترتیب مبین بخش‌های حقیقی و موهومی عبارت متناظر داخل پرانتز هستند. وظیفه بازچینی این است که مقدار طیف زمان-فرکانس را از نقطه محاسبه شده به این مرکز جابجا کند. بنابراین نمایش زمان-فرکانس بازچینی شده تبدیل S این گونه محاسبه می‌شود (Fourer et al., 2015):

$$RST_x(t, \omega) = \iint_{R^2} \left| ST_x^g(t, \nu) \right|^2 \delta(t - \hat{t}(\tau, \nu)) \delta(\omega - \hat{\omega}(\tau, \nu)) d\tau d\nu. \quad (5)$$

که δ بیانگر توزیع دیراک است. برای انجام فرایند بازچینی روش‌هایی وجود دارد که در این مقاله از روش اوگر و همکاران (Auger et al., 2012) استفاده شده است. آنها یک فرایند بازچینی بر مبنای الگوریتم لونبرگ-مارکوارت را توسعه دادند؛ که قابلیت متمرکزسازی انرژی در صفحه زمان-فرکانس از طریق یک پارامتر میرایی μ را دارد. بر این مبنا عملگرهای بازچینی این گونه محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \hat{t}_\mu(t, \omega) \\ \hat{\omega}_\mu(t, \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t \\ \omega \end{bmatrix} - \left[\nabla^T R_x^g(t, \omega) + \mu I_2 \right]^{-1} R_x^g(t, \omega) \quad (6)$$

که در این رابطه I_2 ماتریس همانی 2×2 است و

بازسازی کامل سیگنال نیست؛ به همین منظور کاربرد مورد نظر در این مقاله استخراج نشانگرهای مورد نیاز از تحلیل زمان-فرکانس در آشکارسازی هیدروکربن در نظر گرفته شده است که نیاز به بازسازی سیگنال در آن وجود نداشته باشد.

در ادامه این مقاله پس از بیان تئوری حاکم بر روش RST، از طریق آزمایشاتی عملکرد این روش بر روی سیگنال مصنوعی غیر لرزه‌ای و لرزه‌ای نشان داده می‌شود. بعد از آن نتایج حاصل از کاربرد روش در تحلیل زمان-فرکانس یک مجموعه داده‌ی لرزه‌ای با هدف استخراج برخی نشانگرهای لرزه‌ای که در آشکارسازی سایه‌های کم‌فرکانس به کار می‌روند، نشان داده می‌شود.

۲- تئوری

اوگر و همکاران (Auger et al., 2013) برای درک بهتر از موضوع بازچینی مسئله را با ارتباط دادن نمایش حاصل از STFT و WVD بیان کرده‌اند. بر طبق تحقیق لاواچ و بودرکس-بارتلز (Hlawatsch and Boudreaux-) (Bartels, 1992)، طیف‌نمای (بزرگی توزیع زمان-فرکانس) حاصل از STFT را برای یک سیگنال $x(t)$ و با استفاده از پنجره تحلیل $g(t)$ می‌توان این گونه نوشت:

$$S_x^g(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \iint_{R^2} W_g(\tau - t, \nu - \omega) W_x(\tau, \nu) d\tau d\omega, \quad (1)$$

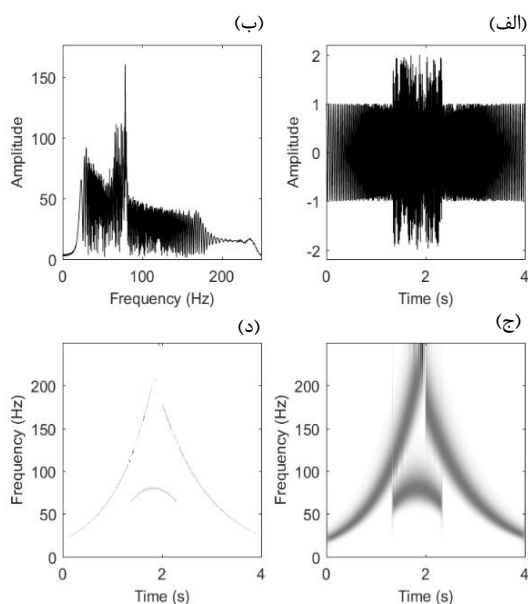
که $W_x(t, \omega)$ توزیع ویگنر-ویل سیگنال $x(t)$ است که این گونه بیان می‌شود:

$$W_x(t, \omega) = \int_R x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i\omega\tau} d\tau. \quad (2)$$

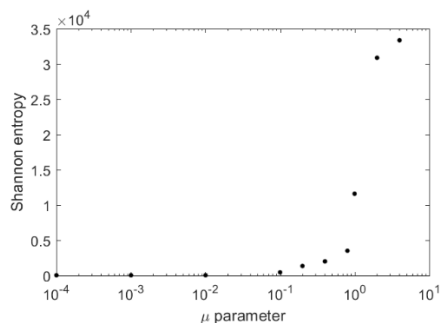
می‌توان گفت که طیف‌نما به نوعی هموارسازی توزیع ویگنر-ویل سیگنال تحلیل شده توسط توزیع ویگنر-ویل پنجره، $W_g(t, \omega)$ ، است و چون توزیع ویگنر-ویل به عنوان یک نمایش متمرکز از خصوصیات زمان-فرکانسی سیگنال شناخته می‌شود. بنابراین پنجره‌زنی دوبعدی باعث پخش‌شدگی انرژی در نمایش زمان-فرکانس می‌گردد. با وجود این محدودیت، باید به مزیت آن نیز اشاره کرد که پنجره‌زنی باعث حذف تداخل نوسانی، که یک محدودیت برای روش توزیع ویگنر-ویل است، می‌شود. اصل روش بازچینی این است که انتقال‌های زمان-فرکانسی ناشی از هموارسازی دوبعدی جبران شود. اوگر و همکاران (Auger et al., 2013) باور دارند که روش بازچینی می‌تواند علاوه بر اعمال روی طیف‌نما، بر هرگونه توزیع انرژی زمان-فرکانس که شکلی از هموارسازی در آن دخیل است، اعمال گردد. بنابراین این موضوع در مورد توزیع زمان-فرکانس حاصل از تبدیل S نیز صادق است. در همین راستا فوره و همکاران (Fourer et al., 2015) نسخه بازچینی شده تبدیل S (RST) را معرفی و روابط ریاضیاتی حاکم بر آن را نشان دادند. تبدیل S موردی خاص از تبدیل فوریه زمان-کوتاه است که در آن تابع پنجره به صورت

رداد، تحلیل زمان-فرکانس داده‌های لرزه‌ای با روش تبدیل S بازچینی شده برای آشکارسازی سایه‌های کم-فرکانس، صفحات ۲۸۳-۲۹۳.

برابر با ۰/۱ است. بنابراین در مورد آزمایش سیگنال مصنوعی شکل ۱ مقدار پارامتر μ در نتیجه نمایش زمان-فرکانس حاصل از تبدیل S بازچینی شده برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. (الف) یک سیگنال مصنوعی ساخته شده از ترکیب سه چیرپ متفاوت؛ (ب) طیف دامنه سیگنال؛ (ج) و (د) طیف زمان-فرکانس سیگنال به ترتیب حاصل از روش‌های تبدیل S استاندارد و تبدیل RST (با مقدار پارامتر μ برابر با ۰/۱).



شکل ۲. نمایش تغییرات بی‌نظمی طیف دامنه زمان-فرکانس سیگنال نشان داده شده در شکل ۱ (الف) با تغییر پارامتر μ که در الگوریتم لونبرگ-مارکوارت تبدیل S بازچینی شده وجود دارد.

شکل ۳ (الف) و ۳ (ب) یک سیگنال مصنوعی لرزه‌ای و طیف دامنه آن را نشان می‌دهد بطوریکه این سیگنال از هم‌میخت یک سری بازتابندگی تصادفی با یک موجک حداقل فاز با فرکانس غالب ۲۵ هرتز ساخته شده است. در ساخت سیگنال لرزه‌ای مقداری هم تضعیف در نظر گرفته شده است تا به واقعیت نزدیک‌تر شود. شکل ۳ (ج) و ۳ (د) طیف زمان-فرکانس سیگنال را نشان می‌دهند که به ترتیب توسط تبدیل S استاندارد و تبدیل S بازچینی شده حاصل شده است. مشاهده می‌شود که تا میزان زیادی انرژی پخش شده در طیف زمان-فرکانس تبدیل S توسط بازچینی حول موقعیت واقعی رویدادها متمرکز شده است.

$$R_x^g(t, \omega) = \begin{bmatrix} t - \hat{t}(t, \omega) \\ \omega - \hat{\omega}(t, \omega) \end{bmatrix}$$

$$\nabla^t R_x^g(t, \omega) = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_x^g}{\partial t}(t, \omega) & \frac{\partial R_x^g}{\partial \omega}(t, \omega) \end{bmatrix}.$$

بنابراین طیف زمان-فرکانس بازچینی شده لونبرگ-مارکوارت با جای-گزینی $(\hat{t}_\mu, \hat{\omega}_\mu)$ از رابطه (۶) به جای $(\hat{t}, \hat{\omega})$ در رابطه (۵) بدست می‌آید (Fourer et al., 2015).

۳- پیاده‌سازی بر روی داده مصنوعی

در این بخش عملکرد روش تبدیل S بازچینی شده بر روی یک سیگنال مصنوعی غیر لرزه‌ای و پس از آن بر روی یک سیگنال مصنوعی لرزه‌ای در تدارک طیف زمان-فرکانس نشان داده می‌شود. شکل ۱ (الف) و ۱ (ب) یک سیگنال مصنوعی و طیف دامنه آن را نشان می‌دهد که از حاصل جمع یک سیگنال چیرپ $x_1(t)$ با نرخ ناپایایی (نحوه تغییر فرکانس با زمان) درجه دو و دو سیگنال چیرپ $x_2(t)$ و $x_3(t)$ با نرخ ناپایایی لگاریتمی و بازه دوام زمانی ساخته شده است. نرخ ناپایایی این سیگنال به این صورت است:

$$\begin{cases} f_1(t) = 80 - 75t^2 & 1.33 \leq t \leq 2.33 \\ f_2(t) = 10 * (10)^{t/1.8} & 0 \leq t \leq 2 \\ f_3(t) = 180 * \left(\frac{1}{6}\right)^{t/1.8} & 2 \leq t \leq 4 \end{cases}$$

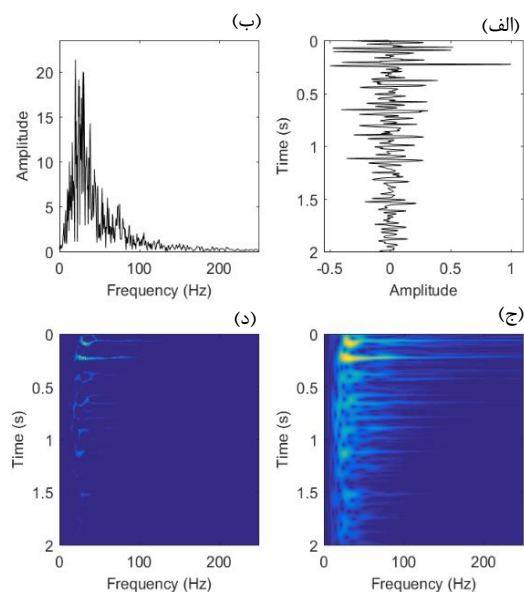
طیف انرژی زمان-فرکانس سیگنال توسط دو روش تبدیل S استاندارد و تبدیل S بازچینی شده در شکل‌های ۱ (ج) و ۱ (د) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تمرکز انرژی در نمایش زمان-فرکانس حاصل از تبدیل S بازچینی شده حول موقعیت واقعی زمان-فرکانسی سیگنال بسیار افزایش یافته است.

اوگر و همکاران (Auger et al., 2012) نشان دادند که در الگوریتم لونبرگ-مارکوارت تأثیر پارامتر μ در تنظیم میزان تمرکز انرژی طیف دامنه زمان-فرکانس است، به نحوی که با کاهش مقدار μ تمرکز انرژی افزایش می‌یابد و با افزایش آن تمرکز انرژی کاهش می‌یابد تا جایی که گویی بازچینی انجام نشده است. در مورد آزمایش سیگنال مصنوعی نشان داده شده در بالا، طیف زمان-فرکانس با مقادیر مختلف پارامتر μ تهیه شد و برای بررسی اثر این پارامتر بر میزان تمرکز انرژی، معیار بی-نظمی شانون به کار گرفته شد. مطابق تئوری بی‌نظمی، هرچه بی‌نظمی در یک توزیع کمتر باشد تمرکز انرژی در آن توزیع بیشتر است. در شکل ۲ تغییرات میزان بی‌نظمی طیف دامنه زمان-فرکانس با پارامتر μ مشاهده می‌شود. برای بررسی بهتر محور افقی در مقیاس لگاریتمی نشان داده شده است. همانطور که، مطابق پژوهش اوگر و همکاران (Auger et al., 2012)، انتظار می‌رفت با افزایش μ میزان بی‌نظمی افزایش می‌یابد و برعکس با کاهش μ از میزان بی‌نظمی کاسته می‌شود. از یک مقدار کمتر برای μ کاهش میزان بی‌نظمی تغییر چشم‌گیری ندارد که در شکل ۲ این مقدار

۴-۱ نشانگر مقطع تک-فرکانس

ناهنجاری فرکانسی در داده‌های لرزه‌ای ناشی از عواملی نظیر تضعیف، جذب، فشار بیش از حد، تیونینگ و شکستگی‌ها می‌باشد (Taner and Sheriff, 1977; Sinha et al., 2005). اگرچه به دلیل برخی فرایندهای پردازشی مانند کشیدگی برونراند نرمال، واهمامیخت و مشکلات سرعت نادرست نیز احتمال ظهور ناهنجاری فرکانسی وجود دارد (Barnes, 1992). دیلای و ایستوود (Dilay and Eastwood, 1995) نشان دادند که وجود هیدروکربن (عموماً گاز) نیز می‌تواند باعث ناهنجاری فرکانسی گردد؛ به طوری که انرژی فرکانس بالا در مخزن تضعیف شده و فرکانس غالب محلی به سمت گستره‌ی فرکانسی پایین سوق پیدا می‌کند. بنابراین انرژی کم-فرکانس ناهنجار در سطح و زیر مخزن متمرکز می‌شود؛ که به این ناهنجاری‌ها سایه کم-فرکانس گویند. بنابراین به منظور آشکارسازی این نواحی بر روی داده‌های لرزه‌ای، بررسی محلی (به لحاظ زمانی) داده‌ها در گستره‌ی فرکانسی خاص، ضرورت استفاده از تحلیل زمان-فرکانس داده‌های لرزه‌ای را ایجاد کرده است. یکی از فنون مورد استفاده در این زمینه استفاده از نشانگر تک-فرکانس است. نحوه تهیه این نشانگر به این صورت است که با انتقال یک مجموعه داده‌ی لرزه‌ای دو بُعدی به حوزه‌ی زمان-فرکانس یک حجم سه بُعدی حاصل می‌شود که بعد سوم فرکانس خواهد بود. با اعمال برش بر روی محور فرکانس حجم حاصل یک مقطع دو بُعدی حاصل خواهد شد که به مقطع تک-فرکانس لرزه‌ای موسوم است. بررسی مقاطع تک-فرکانس در فرکانس‌های مختلف فن رایج در مطالعه سایه‌های کم-فرکانس است (Liu et al., 2011; Sinha et al., 2005; Castagna et al., 2003). آنچه مسلم است دقت تخمین و نتایج با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای زمان-فرکانس تابع تفکیک پذیری روش مورد استفاده است. به همین منظور در این بخش مقایسه‌ای بین عملکرد تبدیل S بازچینی شده و تبدیل S استاندارد در تهیه مقاطع تک-فرکانس و تفسیر آنها با هدف آشکارسازی سایه‌های کم-فرکانس صورت می‌گیرد.

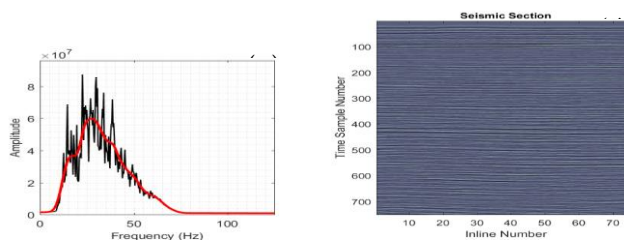
تحلیل زمان-فرکانس بر روی مقطع شکل ۴(الف) توسط دو روش تبدیل S استاندارد و تبدیل S بازچینی شده با هدف تهیه مقاطع تک-فرکانس با فرکانس‌های مختلف انجام شد؛ که نتایج در شکل ۵ مشاهده می‌شود. مقاطع تک-فرکانس ۱۵ هرتزی، ۲۵ هرتزی و ۳۵ هرتزی حاصل از تبدیل S استاندارد به ترتیب در شکل‌های ۵(الف)، ۵(ج) و ۵(ه) و حاصل از تبدیل S بازچینی به ترتیب در شکل‌های ۵(ب)، ۵(د) و ۵(و) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، مقاطع تک-فرکانس حاصل از تبدیل S بازچینی شده تفکیک پذیری بسیار بالاتری نسبت به مقاطع تک-فرکانس حاصل از تبدیل S استاندارد ارائه کرده است. البته در زمینه مطالعه سایه‌های کم-فرکانس می‌توان از پایش مقاطع تک-فرکانس به نتایجی دست یافت. همان‌طور که در شکل ۴(ب) در نسخه هموار شده طیف دامنه میانگین مقطع لرزه‌ای مشاهده می‌شود، فرکانس غالب میانگین مقطع در حدود ۳۰ هرتز می‌باشد. به همین منظور یکی از



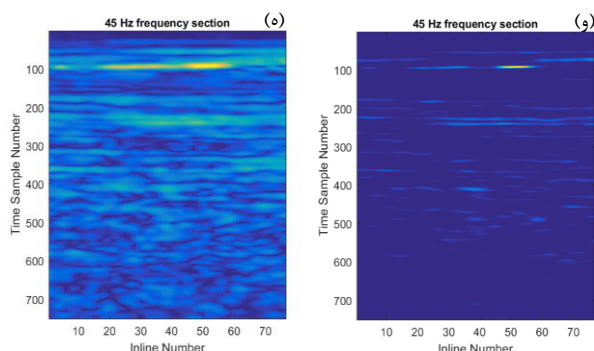
شکل ۱. (الف) یک سیگنال لرزه‌ای مصنوعی؛ (ب) طیف دامنه سیگنال؛ (ج) و (د) طیف زمان-فرکانس سیگنال به ترتیب حاصل از روش‌های تبدیل S استاندارد و تبدیل RST (با مقدار پارامتر ll برابر با ۰/۲).

۴- پیاده‌سازی بر روی داده حقیقی

به عنوان یک کاربرد بر روی داده حقیقی، عملکرد روش تبدیل S بازچینی شده در مورد مطالعه سایه‌های کم-فرکانس جهت آشکارسازی نواحی حاوی گاز مورد بررسی قرار گرفته است. در این زمینه در این پژوهش از چهار نشانگر مرتبط استفاده شده است که عبارتند از مقطع تک-فرکانس، دامنه-ی لحظه‌ای زمان-فرکانس، فرکانس لحظه‌ای غالب زمان-فرکانس و فاکتور شیرینی. در شکل ۴(الف) یک مقطع لرزه‌ای نشان داده شده است که شامل ۷۶ ردلرزه می‌باشد؛ که هر ردلرزه ۷۵۱ نمونه زمانی با فاصله نمونه برداری زمانی ۴ میلی ثانیه دارد. این مقطع لرزه‌ای یک *Inline* از یک مکعب داده لرزه‌ای است؛ که بر روی یک میدان هیدروکربنی برداشت شده است. مطابق گزارش مرز بالایی یک لایه گازی در محدوده نمونه زمانی حدود ۴۱۰ وجود دارد. طیف دامنه میانگین این مقطع نیز در شکل ۴(ب) نشان داده شده است.



شکل ۲. یک مقطع لرزه‌ای (الف) برداشت شده بر روی یک میدان هیدروکربنی و طیف دامنه میانگین آن (ب). منحنی قرمز رنگ طیف دامنه هموار شده توسط یک فیلتر هموارکننده میانه را نشان می‌دهد.

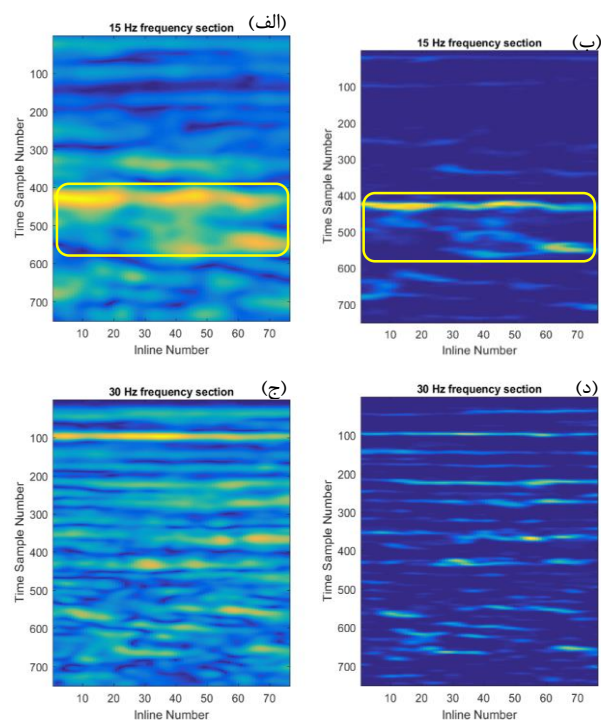


شکل ۳. مقاطع تک-فرکانس حاصل از تحلیل زمان-فرکانس مقطع لرزه‌ای نشان داده شده در شکل ۴ (الف) توسط روش‌های تبدیل S استاندارد ((الف)، (ج) و (ه)) و تبدیل S بازچینی شده ((ب)، (د) و (و)). مستطیل‌های زرد رنگ در (الف) و (ب) موقعیت احتمالی ناهنجاری سایه کم-فرکانس را نشان می‌دهند.

۴-۲ نشانگرهای دامنه‌ی لحظه‌ای، فرکانس غالب لحظه‌ای و فاکتور شیرینی

به منظور بررسی بیشتر سایه‌های کم-فرکانس سه نشانگر دیگر نیز از تحلیل زمان-فرکانس داده لرزه‌ای شکل ۴ (الف) استخراج شد که عبارتند از دامنه لحظه‌ای، فرکانس لحظه‌ای غالب و فاکتور شیرینی. توزیع فرکانسی هر لحظه‌ی زمانی در یک صفحه زمان-فرکانس بعنوان طیف محلی شناخته می‌شود. در هر طیف محلی دامنه‌ی بیشینه معرف دامنه‌ی لحظه‌ای زمان-فرکانس در آن لحظه است و فرکانسی که در آن، مقدار دامنه بیشینه رخ می‌دهد، فرکانس لحظه‌ای غالب زمان-فرکانسی در آن لحظه است. از تقسیم دامنه‌ی لحظه‌ای زمان-فرکانس بر ریشه‌ی دوم فرکانس لحظه‌ای زمان-فرکانس نشانگری فاکتور شیرینی حاصل می‌شود (Hart, 2008). دلیل این که این سه نشانگر انتخاب شده‌اند این است که، بر طبق پژوهش هارت (Hart, 2008)، در مدل AVO کلاس ۳ (Rutherford, S. R. and Williams, 1989)، اثر وجود هیدروکربن مثل گاز این طور است که باعث افزایش دامنه و کاهش فرکانس می‌گردد. بنابراین انتظار این است که نشانگرهای دامنه لحظه‌ای، فرکانس غالب لرزه‌ای و فاکتور شیرینی که از تحلیل زمان-فرکانس استخراج می‌گردند، نتایج قابل بحثی داشته باشند. شکل ۶ نتایج مربوط به این نشانگرها را که از تحلیل زمان-فرکانس داده لرزه‌ای با روش‌های تبدیل S استاندارد (شکل‌های ۶(الف)، ۶(ج) و ۶(ه)) و تبدیل S بازچینی شده (شکل‌های ۶(ب)، ۶(د) و ۶(و)) تهیه شده را نشان می‌دهد. در مقاطع دامنه لحظه‌ای (شکل‌های ۶(الف) و ۶(ب)) ناهنجاری در محدوده مورد مطالعه خیلی پرمادامه نیست که می‌توان این موضوع را به دامنه بسیار قوی بازتابنده سطحی در نمونه زمانی ۱۰۰ ارتباط داد که باعث شده است ناهنجاری محدوده مخزن نمود زیادی نداشته باشد. البته موضوع قابل انتظار در مقاطع فرکانس لحظه‌ای (شکل‌های ۶(ج) و ۶(د)) غالب به چشم می‌آید. جایی که افت قابل ملاحظه‌ای در فرکانس لحظه‌ای در

مقاطع تک-فرکانس که تهیه شده است مقطع تک-فرکانس ۳۰ هرتزی (شکل‌های ۵(ج) و ۵(د)) است. با توجه به توضیحاتی که در بالا در مورد تضعیف انرژی در محدوده و زیر مخزن اشاره شد، برای بررسی سایه‌های کم-فرکانس مقاطع تک-فرکانسی ۱۵ هرتزی (شکل‌های ۵(الف) و ۵(ب)) نیز مهیا شد. مقاطع فرکانسی بالاتر از فرکانس غالب نیز تهیه شد؛ که فرکانس ۴۵ هرتز (شکل‌های ۵(ه) و ۵(و)) به این منظور انتخاب گردید. با پایش مقاطع تک-فرکانس مشاهده می‌شود که در مقاطع تک-فرکانس ۱۵ هرتزی، یک بی‌هنجاری نسبتاً قوی، مشخص شده با مستطیل زرد رنگ، وجود دارد؛ که در مقاطع تک-فرکانس ۳۰ هرتزی اثر خیلی کمی دارد و در مقاطع تک-فرکانس ۴۵ هرتزی بطور کامل اثر آن از بین رفته است. بر مبنای سینها و همکاران (Sinha et al., 2005) و کاستاگنا و همکاران (Castagna et al., 2003) و تعداد دیگری از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان احتمالاً این ناهنجاری‌ها را به عنوان اثری از وجود گاز در این محدوده و سایه کم-فرکانس زیر مخزن گازی تفسیر کرد. این رخداد هم در نتیجه حاصل از تبدیل S (شکل ۵(الف)) و هم نتیجه حاصل از تبدیل S بازچینی شده (شکل ۵(ب)) وجود دارد؛ اما مشاهده می‌شود که تمرکز این ناهنجاری‌ها و البته تفکیک‌پذیری زمانی آنها در تبدیل S بازچینی شده بسیار بالاتر است. نشان دیگری از تفکیک‌پذیری زمانی بهتر تبدیل S بازچینی شده نسبت به نسخه استاندارد آن را می‌توان از مقایسه مقاطع تک-فرکانس ۳۰ هرتزی دریافت؛ جایی که تمرکز زمانی مرز لایه‌ها و جدایش بین مرزها در نتیجه حاصل از تبدیل S بازچینی شده بسیار بهتر صورت گرفته است.



۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد که عملکرد تبدیل S بازچینی شده در تحلیل داده‌های لرزه‌ای جهت استخراج نشانگرهای لرزه‌ای کاربردی در تفسیر با هدف آشکارسازی سایه‌های کم-فرکانس بررسی شود. بازچینی قادر است که انرژی زمان-فرکانس پخش شده در صفحه زمان-فرکانس را به موقعیت واقعی آنها منتقل کند و از این طریق یک نمایش زمان-فرکانس با تفکیک پذیری بالا تدارک ببیند. به عبارت بهتر می‌توان گفت تخمین دقیق‌تری از فرکانس لحظه‌ای در صفحه زمان-فرکانس سیگنال حاصل خواهد شد. آزمایش روش بر روی سیگنال‌های مصنوعی غیر لرزه‌ای و لرزه‌ای گویای این موضوع بود. کاربرد تبدیل S بازچینی شده بر روی مقطع لرزه‌ای با هدف آشکارسازی ناهنجاری‌های سایه کم-فرکانس نشان داد که می‌توان با این روش به تمرکز و تفکیک پذیری بهتری از ناهنجاری از طریق حصول نشانگرهای لرزه‌ای از تحلیل زمان-فرکانس داده‌های لرزه‌ای نسبت به تبدیل S استاندارد دست یافت.

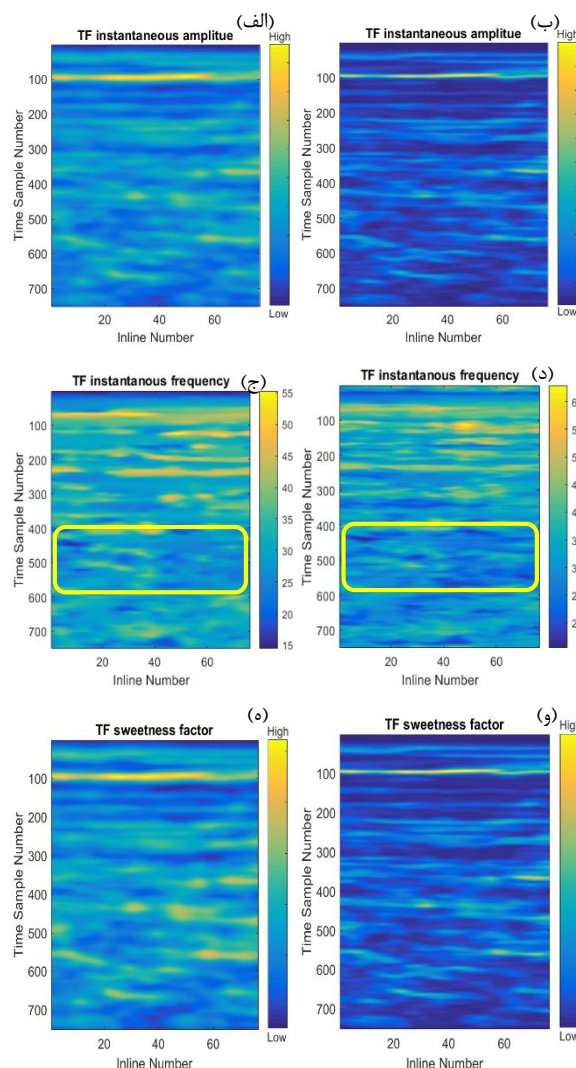
جدول ۱. روش‌ها و اصطلاحات و شکل مخفف آنها

short time Fourier transform (STFT)	تبدیل فوریه زمان-کوتاه
wavelet transform (WT)	تبدیل موجک
Wigner-Ville distribution (WVD)	توزیع ویگنر-ویل
empirical mode decomposition (EMD)	تجزیه مد تجربی
S-transform (ST)	تبدیل S
generalized S-transform (GST)	تبدیل S تعمیم یافته
reassigning method (RM)	روش بازچینی
synchrosqueezing transform (SST)	تبدیل فشرده‌ساز همزمان
reassigned S-transform (RST)	تبدیل S بازچینی شده
synchrosqueezed S-transform (SSST)	تبدیل S فشرده شده همزمان

۶- منابع

- Auger, F., Chassande-Mottin, E., and Flandrin, P., 2012, Making reassignment adjustable: The Levenberg-Marquardt approach: 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Japan.
- Auger, F., Flandrin, P., Lin, Y., McLaughlin, S., Meignen, S., Oberlin, T., and Wu, H., 2013, Time-Frequency Reassignment and Synchrosqueezing- An overview: IEEE Signal Processing Magazine, 32-41.
- Auger, F., and Flandrin, P., 1995, Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method: IEEE Transactions on Signal Processing, 43, 1068–1089.
- Barnes, A. E., 1992, Another look at NMO stretch: Geophysics, 57, 749-751.
- Castagna, J. P., Sun, S. and Seigfried, R. W., 2003, Instantaneous spectral analysis: Detection of low-

محدوده مشخص شده، دیده می‌شود. در مقاطع فاکتور شیرینی (شکل‌های ۴ و ۵) و ۶ نیز تا حدودی ناحیه ناهنجار با مقادیر بالای مورد انتظار مشخص شده است. مقایسه مقاطع حاصل از دو روش تبدیل S استاندارد و تبدیل S بازچینی شده عملکرد موفق تبدیل S بازچینی شده در تهیه مقاطع با تفکیک پذیری زمانی و مکانی بهتر را نشان می‌دهد. در مقطع نشانگر دامنه لحظه‌ای جدایش بهتر مرز لایه‌ها و تفکیک پذیری زمانی، در مقطع نشانگر فرکانس لحظه‌ای غالب مات شدگی کمتر و تفکیک پذیری مکانی و زمانی بهتر در محل ناهنجاری و در مقطع نشانگر فاکتور شیرینی تفکیک پذیری زمانی و مکانی در محل ناهنجاری و همچنین جدایش بهتر مرز لایه‌ها در کل مقطع، نشان دهنده عملکرد بهتر تبدیل S بازچینی شده نسبت به تبدیل S استاندارد است.



شکل ۴. مقاطع نشانگر دامنه لحظه‌ای، فرکانس لحظه‌ای غالب و فاکتور شیرینی که از تحلیل زمان-فرکانس مقطع لرزه‌ای نشان داده شده در شکل ۴(الف) با روش‌های تبدیل S استاندارد (الف)، (ب) و (ج) و تبدیل S بازچینی شده (د)، (ه) و (و) حاصل شده است. مستطیل‌های زرد رنگ در شکل‌ها موقعیت احتمالی ناهنجاری سایه کم-فرکانس را نشان می‌دهند.

- Three Parameters S Transform: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 15, 142-146.
- Mallat, S., 1999, A wavelet tour of signal processing: 2nd ed., Academic Press, San Diego, California.
- Margrave, G. F., Lamoureux, M. P., and Henley, D. C., 2011, Gabor deconvolution: estimating reflectivity by nonstationary deconvolution of seismic data: Geophysics, 76, W15-W30.
- Martin, W. and Flandrin, P., 1985, Wigner-Ville spectral analysis of nonstationary processes: IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process, 33, 1461-1470.
- Mousavi, S. M., Langston, C.A., 2017, Automatic noise-removal/signal-removal based on general-cross-validation thresholding in synchrosqueezed domains, and its application on earthquake data: Geophysics, 82, 1-58.
- Oberlin, T., and Meignen, S., and Perrier, V., 2014, The Fourier-based synchrosqueezing transform: In Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Italy.
- Pham D. H., and Meignen S., 2017, High-Order Synchrosqueezing Transform for Multicomponent Signals Analysis-With an Application to Gravitational-Wave Signal: IEEE Trans. Signal Processing, 65, 3168-3178.
- Pinnegar, R. C. and Mansinha, L., 2003, The S-transform with windows of arbitrary and varying shape: Geophysics, 68, 381-385.
- Rutherford, S. R. and Williams, R. H., 1989, Amplitude-versus-offset variations in gas sands: Geophysics, 54, 680-688.
- Radad, M., Gholami, A., and Siahkoobi, H. R., 2015, S-transform with maximum energy concentration and its application to detect gas bearing zones and low-frequency shadows, Journal of the Earth and Space Physics, 41, 403-412.
- Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D., and Castagna, J. P., 2005, Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform: Geophysics, 70, P19-P25.
- Stockwell, R. G., Mansinha, L. and Lowe, R., 1996, Localization of the complex spectrum: The S-transform: IEEE Transaction on Signal Processing, 44, 998-1001.
- Taner, M. T. and Sheriff, R. E., 1977, Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination: in C. E. frequency shadows associated with hydrocarbons: The Leading Edge, 22, 120-127.
- Chen H., Lu, L., Xu, D., Kang, J., and Chen, X., 2017, The Synchrosqueezing Algorithm Based on Generalized S-transform for High-Precision Time-Frequency Analysis: Applied Sciences. 7, 769.
- Daubechies, I., and Lu, J., and Wu, H., 2011, Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool: Applied and Computational Harmonic Analysis, 30, 243-261.
- Daubechies I., and Maes, S., 1996, A nonlinear squeezing of the continuous wavelet transform based on auditory nerve models: in Wavelets in Medicine and Biology, Eds. A. Aldroubi and M. Unser, CRC Press, 527-546.
- Dilay, A. and Eastwood, J., 1995, Spectral analysis applied to seismic monitoring of thermal recovery: The Leading Edge, 1117-1222.
- Fourer, D., Auger, F., and Hu, J., 2015, Reassigning and synchrosqueezing the Stockwell Transform: Complementary proofs: <hal-01467244>.
- Gabor, D., 1946, Theory of communication: J. Inst. Elect. Eng., 93, 429-457.
- Hart, B. S., 2008, Channel detection in 3-D seismic data using sweetness: AAPG Bulletin, 92, 733-742.
- Hlawatsch F., and Boudreaux-Bartels, G. F., 1992, Linear and quadratic time frequency signal representations: IEEE Signal Processing Magazine, 9, 21-67.
- Herrera, R. H., and Han, J. J., and van der Baan, M., 2014, Applications of the synchrosqueezing transform in seismic time-frequency analysis: Geophysics, 79, V55-V64.
- Huang, N.E. and Wu, Z., 2008, A review on Hilbert- Huang transform: Method and its applications to geophysical studies: Reviews of geophysics, 46.
- Huang, Z. L., and Zhang, J. Z., Zhao, T., and Sun, Y., 2016, Synchrosqueezing S-Transform and Its Application in Seismic Spectral Decomposition: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54, 817-825.
- Liu, Y., and Fomel, S., 2010. Local time-frequency transform and its application to ground-roll noise attenuation. SEG Annual Meeting, USA.
- Liu, G., Fomel, S., and Chen, X., 2011, Time-frequency analysis of seismic data using local attributes: Geophysics 76, P23-P34.
- Liu, N., Gao, J., Zhang, B., Li, F., and Wang, Q., 2018, Time-Frequency Analysis of Seismic Data Using a

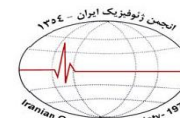
Yang, H. Z., and Ying, L. X., 2014, Synchrosqueezed Curvelet Transform for two-dimensional Mode Decomposition: Siam Journal on Mathematical Analysis, 46, 2052–2083.

Zhong-Lai, H., Jian-Zhong, Z., and Zhi-Hui, Z, 2017, A second-order synchrosqueezing S-transform and its application in seismic spectral decomposition: Chinese Journal of Geophysics, 60, 627-639.

Payton, Ed., Seismic stratigraphy-Applications to hydrocarbon exploration: AAPG Memoir 26, 301-327.

Tary, J.B., Herrera, R.H. and van der Baan, M., 2018. Analysis of time-varying signals using continuous wavelet and synchrosqueezed transforms. Phil. Trans. R. Soc. A, 376, 20170254.

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.



Time-frequency analysis of seismic data by reassigned S-transform to detect low frequency shadows

Mohammad Radad

School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 16 October 2018; Accepted: 9 December 2018

Corresponding author: mradad@shahroodut.ac.ir

Keywords

Time-frequency analysis
S-transform
Reassignment
Seismic attribute
Low frequency shadow

Summary

Assessing a time-frequency representation of signal with an acceptable time-frequency resolution, and for specific purposes in different applied studies, has always been a challenge for signal processing researchers. In case of seismic data, using a time-frequency representation with high resolution will yield a higher precision in processing and interpretational applications of time-frequency analysis of data. In the most of time-frequency analysis methods, a form of smoothing is used for generating time-frequency map, which it causes energy dissipation in time-frequency plane and decreasing the resolution. Reassignment is an efficient technique for compensating this issue and

increasing the resolution. It can provide a high time-frequency resolution through moving and concentrating the energy distribution in the time-frequency plane to true location. Reassignment has been applied to various time-frequency analysis methods and its performance has been presented in different researches. In this paper, the reassigned S-transform as a new development on S-transform to provide higher time and frequency resolution is utilized to extract some seismic attributes. The performance of the method in providing an acceptable time-frequency resolution is shown by testing on synthetic non-stationary chirp and seismic signals. As a seismic application, the reassigned S-transform is utilized in studying low frequency shadows through time-frequency analysis of seismic data set acquired on a hydrocarbon reservoir. For this purpose, some time-frequency attributes including single-frequency, instantaneous amplitude, instantaneous dominant frequency and sweetness factor are extracted by this method. The results show that the reassigned S-transform can provide much higher energy concentration rather than standard S-transform, and the events and anomalies can be interpreted with more precision due to their better time and space resolution in attribute sections.

Introduction

The time-frequency analysis methods are among the most common signal and image processing techniques in different applied fields of electric engineering, mechanical engineering, geoscience, etc. Time-frequency methods are employed in seismic data processing and interpretation applications for denoising, attenuation estimation, deconvolution, hydrocarbon detection, channels and faults visualization and so on.

There are several time-frequency analysis methods. One of the main reasons of developing new time-frequency methods is to reach higher time-frequency resolution. The reassignment is one of the successful approaches in this field. The mission of reassignment method (RM) is to move the energy distribution of the time-frequency plane to true location. Through this way, a precise distribution of instantaneous frequency has been provided for any time sample. Reassigning is also carried out in time direction. The RM has been applied in several time-frequency methods such as wavelet transform, Wigner-Ville distribution, Gabor transform and S-transform. In this paper, the reassigned S-transform has been studied in seismic data time-frequency analysis. The method has been utilized for detection of low frequency shadows in a seismic dataset to locate probable gas reservoir.

Methodology and Approaches

Auger et al. (2013) state that the RM can be applied on any time-frequency energy distribution in which a form of

smoothing is applied in generating it, as seen in S transform. Therefore, Fourer et al. (2015) have introduced the reassigned S-transform. As mentioned above, the mission of the RM is to move the distributed energy in time-frequency plane to true coordinates. Then, it is needed to determine the true center coordinates of energy distribution, known as reassigning operators. Concerning the S-transform, the operators are computed as (Fourer et al., 2015):

$$\hat{t}(t, \omega) = t - \operatorname{Re} \left(\frac{ST_x^{Tg}(t, \omega)}{ST_x(t, \omega)} \right)$$
$$\hat{\omega}(t, \omega) = \omega + \operatorname{Im} \left(\frac{ST_x^{Dg}(t, \omega)}{ST_x(t, \omega)} \right)$$

where $Tg(t) = tg(t)$, $Dg(t) = \frac{dg(t)}{dt}$ and Re and Im represent the real and imaginary parts of the arguments inside the parentheses. Then, the reassigned representation of S-transform is determined as:

$$RST_x(t, \omega) = \iint_{R^2} \left| ST_x^g(t, \nu) \right|^2 \delta(t - \hat{t}(\tau, \nu)) \delta(\omega - \hat{\omega}(\tau, \nu)) d\tau d\nu.$$

where δ represents Dirac function. However, in this paper, the reassigning process is implemented using the Levenberg-Marquardt approach, developed by Auger et al. (2012), in which a damping parameter could adjust the time-frequency concentration.

Results and Conclusions

In this paper, the performance of reassigned S-transform has been studied by its application on synthetic chirp signal and seismic trace. The results show that the method is capable of providing a well-concentrated time-frequency maps. As an application in real seismic data, the method has been utilized for studying the low frequency shadows related to probable gas bearing zones. This approach extracts some attributes including single frequency, instantaneous amplitude, instantaneous dominant frequency and sweetness factor, through time-frequency analysis of the data. The results show that the reassigned S-transform can provide higher time and space resolution, and thus, the events and anomalies can be interpreted more precise compared to standard S-transform results.
