



تحلیل زمان بسامد داده‌های لرزه‌ای با استفاده از روش تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه بازچینی شده در زمان برای آشکارسازی سایه کم بسامد

محمود شیرازی^{۱*}، امین روشندل کاهو^۲، محمد رداد^۳ و گنگ روو^۴

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

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

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

۴- استادیار؛ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه جینان، چین

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۴؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۰۵

* نویسنده مسئول مکاتبات: m.shirazil@shahroodut.ac.ir

چکیده

شناسایی سایه کم- بسامد از این نظر که در ارتباط با مخازن گازی هستند، بسیار اهمیت دارد. این سایه‌های کم- بسامد که ناشی از میرایی گاز بر روی امواج لرزه‌ای هستند، باعث می‌شوند تا بسامدهای پایین در زیر مخازن گازی نسبت به بسامدهای بالا دامنه قوی‌تری داشته باشند. لذا در صورتی که دقت زمانی مناسبی در شناسایی این نشانگر در نظر گرفته شود، مخزن گازی و به تبع آن موقعیت آن با دقت قابل توجهی شناسایی خواهد شد. یکی از روش‌های شناسایی سایه‌های کم- بسامد، تبدیل‌های زمان- بسامد هستند. لذا آن دسته از تبدیل‌های زمان- بسامدی که دارای قدرت تفکیک زمانی و بسامدی مطلوبی هستند، می‌توانند در شناسایی سایه‌های کم- بسامد نقش شایانی داشته باشند. در این مقاله، از روشی با عنوان تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه بازچینی‌شده در زمان (*TMSSST*) استفاده می‌شود که نسبت به تبدیل‌های زمان- بسامد متداول از قبیل *STFT*، *RM*، *SST* و *MSST* از قدرت تفکیک زمانی و بسامدی بالاتری بهره می‌برد. لذا با اعمال تبدیل ذکرشده بر روی یک داده مصنوعی و یک داده واقعی، این مهم به نمایش گذاشته شده است. به‌عنوان یک کاربرد لرزه‌ای، مقاطع تک- بسامد حاصل از یک میدان هیدروکربنی در محیط متلب تهیه و ناهنجاری‌های سایه کم- بسامد با استفاده از این روش زمان- بسامد با قدرت تفکیک بالا شناسایی شدند. علاوه بر این، در این مقاله از پارامتر رنی که به طور مستقیم با تُنکی در ارتباط بوده و جهت ارزیابی تمرکز انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده شده است. عدد بدست آمده برای پارامتر رنی با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله، دلیل دیگری در راستای اثبات عملکرد قابل توجه این روش در بدست آوردن نمایش زمان- بسامد با قدرت تفکیک زمانی و بسامدی بالا به طور همزمان می‌باشد.

واژگان کلیدی

تحلیل زمان- بسامد
تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه
بازچینی‌شده در زمان
مقطع تک بسامد
سایه کم- بسامد

۱- مقدمه

زمان و بسامد انجام می‌دهد. مطالعات مختلفی جهت افزایش قدرت تفکیک پذیری با استفاده از روش *SST*، صورت پذیرفته است که می‌توان به (Z. Huang et al., 2015)، (S. Wang et al., 2013)، (Tu et al., 2020)، (Wu & Zhou, 2011)، (Thakur & Wu, 2011)، (Gholtashi et al., 2015) و (2018) اشاره نمود. یکی از تفاوت‌های بارز بین این دو روش در بازسازی کامل سیگنال توسط روش *SST* می‌باشد، درحالی که روش *RM* قادر به بازبازی سیگنال به طور کامل نمی‌باشد. روش بازچینی (*RM*) و تبدیل فشرده‌سازی همزمان (*SST*) دارای الگوریتم مشابه هستند و از آنجا که جهت افزایش تفکیک پذیری و بهبود تمرکز انرژی در صفحه زمان-بسامد معرفی شده‌اند، نسبت به رفع مشکل عدم قطعیت هایزنبرگ قدم برداشته و از جمله روش‌های پس پردازش در نظر گرفته می‌شوند (Tary et al., 2018).

در ادامه، روش‌های متعددی در راستای بازچینی ضرایب زمان-بسامد و فشرده‌سازی همزمان معرفی گردیدند که می‌توان به تبدیل *Synchroextracting* (Yu et al., 2017)، تبدیل فشرده‌سازی همزمان دمودول شده (Yu, 2018)، تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه^۱ (*MSST*) (Yu et al., 2018)، تبدیل فشرده‌سازی همزمان مرتبه بالا (Wang et al., 2019)، تبدیل فشرده‌سازی همزمان ماکزیمم محلی (*LMSST*) (Yu et al., 2019)، تبدیل فشرده‌سازی همزمان بازچینی در زمان (*TSST*) (Cao et al., 2020)، تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه بازچینی شده در زمان^۲ (*TMSST*) (Yu et al., 2020) اشاره کرد.

در راستای کاربرد روش‌های زمان-بسامد در شناسایی سایه کم-بسامد می‌توان به استفاده از روش تبدیل موجک تجربی که هدف اصلی آن استخراج مدهای متمایز از طریق ساخت موجک‌های تطبیقی می‌باشد، برای شناسایی سایه کم-بسامد مرتبط با گاز اشاره کرد (Shirazi et al., 2018). روش تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه که قادر به بازبازی سیگنال به صورت کامل می‌باشد، در تفسیر داده‌های لرزه‌ای جهت شناسایی سایه کم-بسامد مورد استفاده قرار گرفته و با ترکیب با تبدیل *S* تعمیم‌یافته در شناسایی مخازن گازی مورد استفاده قرار گرفته است (X. Chen, Chen, Li, et al., 2020).

روش‌های تبدیل *Synchroextracting* و تبدیل موجک تجربی (*EWT*) به‌عنوان دو روش آنالیز زمان-بسامد بهبودیافته جهت شناسایی هیدروکربن مورد استفاده قرار گرفتند (H. Chen et al., 2017). روش تبدیل *Synchroextracting* با مرتبه بالا نیز برای شناسایی مخازن هیدروکربنی مورد استفاده قرار گرفت (X. Chen, Chen, Fang, et al., 2020). روش تبدیل فشرده‌سازی همزمان ماکزیمم محلی (*LMSST*) نیز جهت شناسایی سایه کم-بسامد از روی داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده

استخراج اطلاعات مرتبط با سیگنال‌های لرزه‌ای امری ضروری و مهم در پردازش و تفسیر آن‌ها تلقی می‌شود. دو روش مرسوم برای نمایش یک رد لرزه استفاده از دو حوزه زمان و بسامد می‌باشد. در واقع داشتن همه این ویژگی‌ها به طور همزمان غیرممکن می‌باشد. در نتیجه، توسعه ابزاری که قادر به نمایش هر دو جنبه سیگنال به طور همزمان باشد مهم به نظر می‌رسد. لذا این مهم با عنوان تحلیل زمان-بسامد شناخته می‌شود و در هنگام بررسی یک سیگنال ناپایا که محتوای بسامدی آن با زمان تغییر می‌کند، بسیار مفید است.

روش‌های متعددی از جمله تبدیل فوریه زمان-کوتاه (*STFT*) (Gabor, 1946) تبدیل *S* (*ST*) (Stockwell et al., 1996) و توزیع ویگنر ویل (*WVD*) (Martin & Flandrin, 1985) مبتنی بر تبدیل فوریه، تبدیل‌های موجک پیوسته و گسسته بر مبنای تحلیل موجک (Mallat, 1999) و روش‌های تجزیه مُد تجربی (*EMD*) (N. E. Huang & Wu, 2008) و تجزیه مُد متغیر (*VMD*) (Dragomiretskiy & Zosso, 2013) مبتنی بر داده وجود دارند که جهت تجزیه طیفی توسعه یافته‌اند.

تمامی روش‌هایی که جهت تجزیه طیفی معرفی و توسعه یافته‌اند در جهت افزایش تفکیک‌پذیری صفحه زمان-بسامد قدم برداشته‌اند. لذا روش تبدیل فوریه زمان-کوتاه *STFT* که با تغییر طول پنجره جهت افزایش تفکیک‌پذیری معرفی شده بود، نتوانست تفکیک‌پذیری ایده‌آل را ارائه دهد. به عنوان یکی دیگر از راهکارهای افزایش تفکیک‌پذیری روش-های زمان-بسامد، روش بازچینی (*RM*) توسط اوگر و فلاندرین (Auger & Flandrin, 1995) معرفی شد. در این روش انرژی پخش شده در صفحه زمان-بسامد به مختصات واقعی آن انتقال پیدا کرده و فرآیند بازچینی صورت می‌پذیرد. جهت غلبه بر محدودیت روش تبدیل فوریه زمان-کوتاه، تبدیل *S* با ارائه یک پنجره گاوسی که پهنای آن با بسامد رابطه عکس دارد، جهت بهبود تفکیک‌پذیری نسبت به روش *STFT* توسط استاک ول و همکاران (Stockwell et al., 1996) معرفی گردید. وجود تفکیک‌پذیری پایین در بسامدهای پائین و تفکیک‌پذیری بسامدی پائین در بسامدهای بالا از جمله ضعف‌های تبدیل *S* بود که منجر به معرفی و توسعه روش-های دیگری همچون تبدیل *S* تعمیم‌یافته (*GST*) گردید (Pinnegar & Mansinha, 2003). علاوه بر این، رداد و همکاران یکی دیگر از روش‌هایی که جهت بهبود و افزایش تفکیک‌پذیری در تبدیل *S* می‌توانست کارا باشد را معرفی کردند. آنها با استفاده از معیارهای تمرکز انرژی و فرآیندهای بهینه‌سازی توانستند بهترین پهنای پنجره را برای هر مولفه بسامدی پیدا کنند (Radad et al., 2015).

همزمان با روش بازچینی، تبدیل فشرده‌سازی همزمان (*SST*) توسط دابیشز و مائس (Daubechies & Maes, 2017) معرفی گردید. این روش بر مبنای فاز توسعه یافته است و فرآیند بازچینی را در هر دو راستای

^۱ Multi-Synchrosqueezing Transform

^۲ Time-reassigned Multi-Synchrosqueezing Transform

$$ITFA(\alpha, \omega) = \sum_{k=1}^n \alpha_k(t) e^{i\varphi_k(t)} \delta(\omega - \varphi'_k(t)) \quad (3)$$

که $\delta(\cdot)$ بیان‌کننده تابع دلتا دیراک می‌باشد (Yu et al., 2018).

۱-۲- از تبدیل فوریه زمان-کوتاه (STFT) تا تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه (MSST)

تبدیل فوریه زمان-کوتاه که برگرفته از تبدیل فوریه سیگنال پنجره-ای شده $x(t)g(\tau-t)$ بوده و در محدوده $\tau \in [t - \Delta_t, t + \Delta_t]$ جایگزیده می‌باشد، به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$STFT_x^g(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau-t)x(\tau)e^{-i\omega(\tau-t)}d\tau \quad (4)$$

که در آن $g(t)$ بیانگر مقدار واقعی پنجره با $\text{supp}\{g\} \in [-\Delta_t, \Delta_t]$ می‌باشد. اگر سیگنال $x(t)$ هارمونیک در نظر گرفته شود، بنابراین، تبدیل فوریه زمان-کوتاه سیگنال $x(t)$ به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$STFT_x^g(t, \omega) = \sum_{k=1}^n a_k(t)e^{i\varphi_k(t)}\hat{g}(\omega - \varphi'(t)) \quad (5)$$

که $\hat{g}(\omega)$ تبدیل فوریه پنجره $g(t)$ با $\text{supp}\{\hat{g}\} \in [-\Delta_\omega, \Delta_\omega]$ می‌باشد.

با توجه به ویژگی‌های تبدیل فوریه و اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، هیچ تابع غیرصفری وجود ندارد که به طور همزمان در زمان و بسامد فشرده باشد (Yu et al., 2018). بنابراین، با توجه به تبدیل فوریه زمان-کوتاه، ذکر این نکته حائز اهمیت است که جایگزیده شدن یک سیگنال به صورت همزمان در زمان و بسامد امکان‌پذیر نمی‌باشد (Auger et al., 2013) و نمایش زمان- بسامد آن از حالت ایده آل به دور می‌باشد.

روش‌های متعددی برای به حداقل رساندن انرژی هدر رفته حول بسامد لحظه‌ای و تأخیر گروه^۱ با جابجاکردن ضرایب نمایش زمان- بسامد به موقعیت واقعی آن‌ها جهت بهبود قدرت تفکیک صفحات زمان- بسامد معرفی شده‌اند (Yu et al., 2018; Auger & Flandrin, 1995; Daubechies et al., 2011). سه روش پس‌پردازش با هدف فشرده-سازی ضرایب زمان- بسامد اخیراً معرفی شده‌اند. این روش‌ها شامل روش بازچینی، تبدیل فشرده‌سازی همزمان و تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه هستند. هر کدام از این روش‌ها از عملگرهای مختلفی جهت بازچینی ضرایب استفاده می‌کنند.

روش بازچینی (RM) که ضرایب را در دو جهت بسامد و زمان بازچینی می‌کند، از طریق جابجایی اطلاعات $|STFT_x^g(t, \omega)|$ از مختصات موجود (t, ω) به یک مختصات جدید $(\hat{t}(t, \omega), \hat{\omega}(t, \omega))$ به صورت رابطه (پ-۱) تعریف می‌شود که $\hat{t}(t, \omega)$ و $\hat{\omega}(t, \omega)$ بسامد لحظه‌ای و تأخیر گروه تخمین‌زده شده می‌باشند. $STFT_x^{dg}(t, \omega)$

قرار گرفت (Mahdavi et al., 2021).

تحقیق‌های متعددی در راستای استفاده از تبدیل‌های زمان- بسامد جهت شناسایی مخازن گازی صورت گرفته است که می‌توان به (Fang et al., 2021)، (Hamidi et al., 2011)، (Sinha et al., 2005) و (Sun et al., 2002) اشاره کرد.

همانطور که گفته شد، شناسایی سایه‌های کم- بسامد مبتنی بر تفکیک بسامدهای بالا از پایین و مقایسه دامنه آن‌ها می‌باشد. بنابراین در صورت استفاده از تبدیل زمان- بسامدی که قدرت تفکیک بسامدی خوبی نداشته باشد، احتمال ترکیب شدن بسامدهای بالا و پائین افزایش یافته و در نتیجه سایه کم- بسامد به خوبی قابل شناسایی نخواهد بود. همچنین موقعیت زمانی سایه‌های کم- بسامد برای تعیین موقعیت مکانی مخزن گازی دارای اهمیت می‌باشد. بنابراین، هرچه قدر تبدیل زمان- بسامد بکار برده شده دارای قدرت تفکیک زمانی بالاتری باشد، سایه کم- بسامد با دقت بالاتری شناسایی می‌شود و می‌توان موقعیت مخزن گازی را با دقت بالاتری تخمین زد. در تمام مطالعاتی که تاکنون انجام شده است، بیشتر از تبدیل‌های زمان- بسامدی استفاده شده است که یا فشرده‌سازی را تنها در راستای بسامد انجام می‌دهند (مانند تبدیل‌های SST و MSST)، یا فشرده‌سازی را در دو راستای زمان- بسامد انجام داده اما دارای مشکل عدم بازگشت‌پذیری سیگنال به طور کامل می‌باشند که می‌توان به روش RM اشاره نمود و یا دارای مشکل زمان محاسبه بوده که می‌توان به روش LMSST اشاره نمود. لذا در این مقاله، به تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه بازچینی شده در زمان (TMSST) پرداخته می‌شود که هم دارای مزایای موجود در روش LMSST می‌باشد و هم علاوه بر فشرده‌سازی در هر دو راستای زمان و بسامد، دارای زمان محاسبه بسیار پایین می‌باشد. در این مقاله ابتدا به توصیف و بررسی تئوری روش‌های RM، STFT، MSST، SST و TMSST پرداخته شده است و در ادامه به ارائه نتایج حاصل از اعمال روش‌های مذکور بر روی سیگنال‌های مصنوعی غیر لرزه-ای و لرزه‌ای پرداخته شده است.

۲- تئوری

یک سیگنال ناپایا چندمولفه‌ای به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته می‌شود:

$$x(t) = \sum_{k=1}^n a_k(t)e^{i\varphi_k(t)} \quad (1)$$

که $a_k(t)$ دامنه لحظه‌ای و $\varphi_k(t)$ به عنوان فاز لحظه‌ای تعریف می‌شود. آنالیز زمان- بسامد ایده‌آل (ITFA) که در آن بسامد لحظه‌ای به صورت رابطه (۲) برگرفته از تبدیل هیلبرت تعریف می‌شود، به صورت رابطه (۳) در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{\varphi}_k(t) = \frac{d\varphi_k(t)}{dt} \quad (2)$$

^۱ Group Delay (GD)

$STFT_x^{tg}(t, \omega)$ به ترتیب تبدیل فوریه زمان-کوتاه سیگنال $x(t)$ با استفاده از $\frac{d}{dt}g(t)$ و پنجره $tg(t)$ می باشند (Yu et al., 2018). همانطور که مشاهده می شود، در این روش جابجایی تنها بر روی دامنه ضرایب اتفاق می افتد و بازیابی سیگنال با استفاده از این روش امکان پذیر نمی باشد. جهت غلبه بر مشکل عدم بازیابی سیگنال با استفاده از روش بازچینی، روش تبدیل فشرده سازی همزمان (SST) معرفی شده است که علاوه بر اطلاعات دامنه از اطلاعات فاز سیگنال نیز استفاده می کند (Daubechies & Maes, 2017).

فشرده سازی انرژی های پخش شده به بسامد لحظه ای واقعی در راستای بسامد توسط روش SST از طریق رابطه (۷) امکان پذیر می باشد (Yu et al., 2018).

$$SST(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} STFT_x^g(t, \nu) \delta(\omega - \omega(t, \nu)) d\nu$$

$$\omega(t, \omega) = \omega - \Im \left\{ \frac{STFT_x^{dg}(t, \omega)}{STFT_x^g(t, \omega)} \right\} \quad (7)$$

که $\omega(t, \omega)$ بسامد لحظه ای تخمین زده شده می باشد. شرایط حاکم بر جدایش مولفه های بسامد بدون ایجاد جملات متقاطع در نمایش زمان- بسامد بدین صورت می باشد که دو مُد پیوسته به اندازه کافی از یکدیگر جدا می باشند و برای آن داریم:

$$\varphi'_k(t) - \varphi'_{k-1}(t) > 2\Delta\omega$$

سیگنال های با تغییرات شدید زمانی همچون سیگنال های لرزه ای به طور تقریبی به عنوان سیگنال چیرپ خطی در یک طول دوره زمانی کوتاه اگر $|a'(t)| \leq \epsilon$ و $|\varphi'''(t)| \leq \epsilon$ باشد برای تمام نمونه های زمانی در نظر گرفته می شود (Z. Huang et al., 2015). مطابق با بسط تیلور دامنه لحظه ای و فاز لحظه ای، سیگنال ناپایا چندمؤلفه ای به صورت رابطه (۸) نوشته می شود (Pinnegar & Mansinha, 2003):

$$x(t) = \sum_{k=1}^n a_k(\tau) e^{i[\varphi_k(\tau) + \varphi'_k(\tau)(t-\tau) + 0.5\varphi''_k(\tau)(t-\tau)^2]} \quad (8)$$

یو و همکاران (Yu et al. 2018) رابطه (پ-۲) را برای تخمین دقیق بسامد لحظه ای پیشنهاد کردند. با استفاده از این رابطه با عنوان تخمین بسامد لحظه ای در اپراتور SST، تبدیل فشرده سازی همزمان چندگانه (MSST) با تکرار برابر ۲ بدست آورده می شود که معادل محاسبه مجدد عملگر SST بر روی نمایش زمان- بسامد به صورت رابطه (پ-۳) می باشد. در آن رابطه $SST^{[i]}$ بیانگر i امین محاسبه با تکرار بر روی نمایش زمان- بسامد با استفاده از روش SST می باشد.

واضح است که $SST^{[1]}$ برابر با روش SST مرسوم نشان داده شده در رابطه (۷) می باشد. تخمین دقیق تر بسامد لحظه ای در رابطه (پ-۳) انتظار می رود که منجر به نمایش زمان- بسامد متمرکزتر با استفاده از رابطه (۹) گردد:

$$MSST^{[N]}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} STFT_x^{tg}(t, \nu) \delta(\omega - \hat{\omega}_k^{[N]}(t, \omega)) d\nu \quad (9)$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} SST^{[N-1]}(t, \nu) \delta(\omega - \hat{\omega}_k(t, \nu)) d\nu$$

$$\hat{\omega}_k^{[N]}(t, \omega) = \varphi'_k(t) + \left(\frac{\varphi''_k(t)^\tau}{1 + \varphi''_k(t)^\tau} \right)^N (\omega - \varphi'_k(t)) \quad (10)$$

روش های بازچینی، تبدیل فشرده سازی همزمان و تبدیل فشرده سازی همزمان چندگانه هر کدام دارای معایبی هستند. در حالی که روش بازچینی می تواند نمایش زمان- بسامد با قدرت تفکیک بالا را در زمان و بسامد فراهم آورد، این مزیت به تنهایی برای کاربردهای عملی کافی نبوده و عدم بازیابی سیگنال با استفاده از این روش یک کاستی مهم برای آن محسوب می شود. با این وجود، روش تبدیل فشرده سازی همزمان با توانایی بازیابی سیگنال به طور کامل کاستی روش بازچینی را برطرف کرد اما خود عملکرد مناسبی را برای سیگنال های هارمونیک ندارد. روش تبدیل فشرده سازی همزمان چندگانه که بازچینی ضرایب را تنها در راستای بسامد انجام می دهد، توانایی بازیابی سیگنال را به صورت کامل دارا می باشد. اما وجود نقاط غیربازچینی شده^۱ در آن محدودیت بزرگی را ایجاد کرده و این روش را در مواجهه با داده های بزرگ همچون داده های لرزه ای بازتابی با مشکل مواجه می کند.

۲-۲- تبدیل فشرده سازی همزمان چندگانه بازچینی شده در زمان (TMSST)

یک سیگنال با تغییرات شدید بسامدی به اندازه کافی کوچک در نظر گرفته می شود اگر $|a'(t)| \leq \epsilon$ و $|\varphi'''(t)| \leq \epsilon$ باشد. بنابراین، یک سیگنال ناپایا چندمؤلفه ای به صورت رابطه (پ-۴) معرفی می شود (Yu et al., 2021):

با در نظر گرفتن یک پنجره گوسی به صورت رابطه (پ-۵)، تخمین تأخیر گروه دوبعدی به صورت رابطه (پ-۶) خواهد بود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که مطابق رابطه (پ-۶) $\frac{\varphi''(\omega)}{\sigma^2 + \varphi''(\omega)}(t + \hat{\varphi}(\omega))$ نمی تواند تخمین دقیقی برای تأخیر گروه سیگنال باشد (Yu et al., 2021). از آنجا که $-\hat{\varphi}(\omega)$ یک نقطه ثابت از $\hat{t}(t, \omega)$ می باشد، بنابراین جهت کاهش خطا مابین $-\hat{\varphi}(\omega)$ و $\hat{t}(t, \omega)$ ، اولین تکرار به صورت رابطه (پ-۷) بیان می شود (Yu et al., 2021).

رابطه (پ-۷) یک تخمین تأخیر گروه جدید دوبعدی را ایجاد می کند که به صورت $\hat{t}(\hat{t}(t, \omega), \omega)$ بیان می شود. بنابراین، تکرار دوم و همچنین

^۱ Non-reassigned Points

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۲، ۱۴۰۱.

پارامتر رنی برای همه روش‌های بکار گرفته شده، محاسبه شده و در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، مقدار پایین این پارامتر برای روش *TMSST* دلالت بر قدرت تفکیک بالای آن نسبت به روش‌های دیگر دارد.

تولید گروه تأخیر دوبعدی در تکرار N ام، موجبات تشکیل رابطه‌های (پ-۸) و (پ-۹) را فراهم می‌آورد (Yu et al., 2021). بنابراین، رابطه‌هایی به صورت رابطه (پ-۱۰) بیان می‌شود. لذا رابطه (پ-۱۰) اثبات می‌کند که می‌تواند از تکرارهای نقطه ثابت چندگانه^۱ بهره‌گیرد.

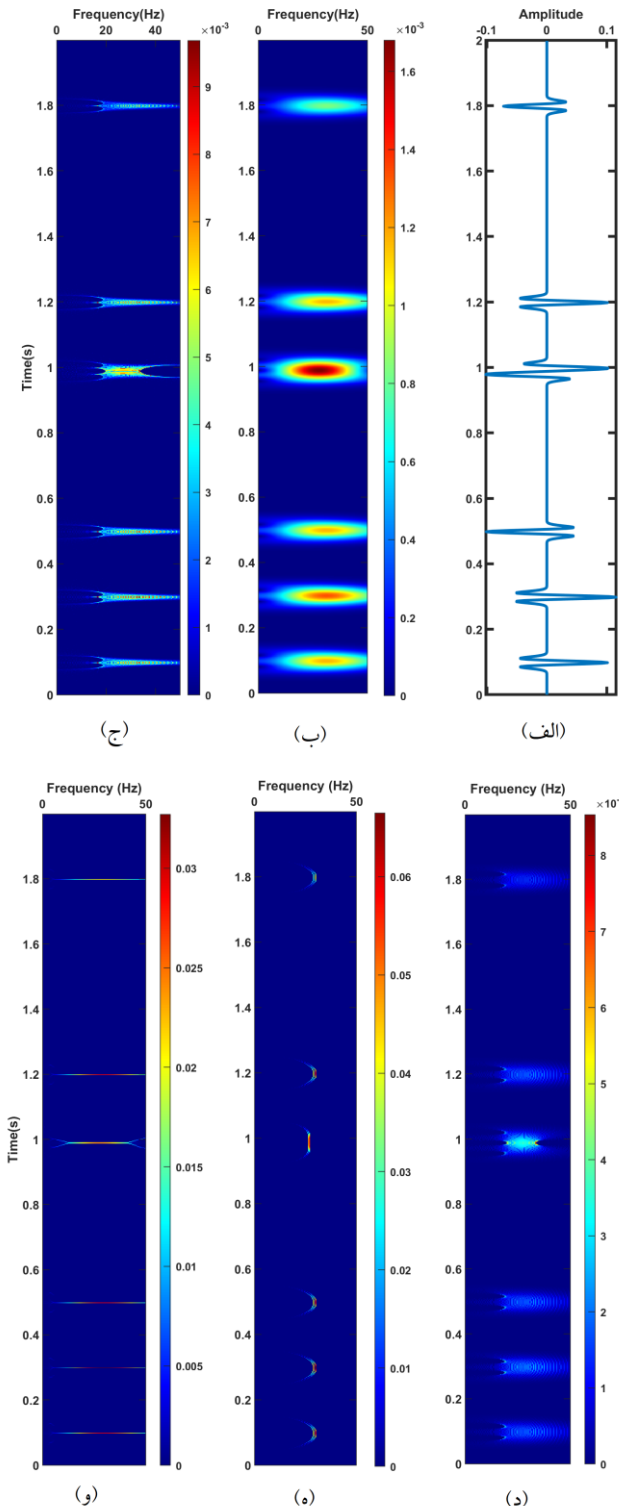
۳- پیاده‌سازی بر روی داده لرزه‌ای مصنوعی

به منظور بررسی عملکرد تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه بازچینی شده در زمان، این روش برای بدست آوردن نمایش زمان-بسامد حاصل از یک داده لرزه‌ای مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. یک سیگنال مصنوعی لرزه‌ای که شامل ۷ بازتابنده در زمان‌های ۰.۱، ۰.۳، ۰.۵، ۱، ۱.۲، ۱.۸ و ۲ ثانیه با دامنه بین ۱ و -۱ می‌باشد با هم‌امیخت در یک موجک ریکر با بسامد ۳۰ هرتز در محیط متلب تولید شده است (شکل ۱). بسامد نمونه‌برداری این ردلرزه مصنوعی برابر ۲ میلی‌ثانیه می‌باشد. نمایش زمان-بسامد حاصل از اعمال روش‌های *STFT*، *SST*، *RM* و *TMSST* در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، واضح است که روش تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه بازچینی شده در زمان (شکل ۱- و) قادر به تولید نمایش زمان-بسامد با قدرت تفکیک بالاتر نسبت به بقیه روش‌های زمان-بسامد بوده و توانسته است تمام مؤلفه‌ها بالاخص دوبرتابنده کنار یکدیگر در زمان ۱ ثانیه را از یکدیگر با قدرت تفکیک بالا تمییز دهد. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۱- ه نشان داده شده است، روش *MSST* در محدوده زمانی ۱ ثانیه، قادر به شناسایی بازتابنده‌های نزدیک به هم که بیانگر لایه نازک می‌باشند نبوده است. همان‌طور که در شکل ۲- ب نیز نشان داده شده است، پخش‌شدگی انرژی حول بسامد لحظه‌ای و *GD* در نمایش زمان-بسامد حاصل از روش تبدیل فوریه زمان-کوتاه مشهود می‌باشد که دلیلی بر اثبات وجود عدم قطعیت هایزنبرگ و فاصله گرفتن نمایش از نمایش زمان-بسامد ایده‌آل می‌باشد. نمایش حاصل از دو روش *SST* و *RM* نیز همان‌طور که در شکل ۱- ج و ۱- د نشان داده شده است، دارای قدرت تفکیک پایین‌تر در شناسایی مؤلفه‌های سیگنال می‌باشند.

در این مقاله از پارامتری به نام پارامتر رنی^۲ استفاده شده است که به طور مستقیم با تُنکی^۳ در نمایش زمان-بسامد (*TFR*) در ارتباط بوده و جهت ارزیابی تمرکز انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پارامتر که به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود، مقدار پایین آن بیانگر قدرت تفکیک بالا یا تُنکی بالا در نمایش زمان-بسامد می‌باشد (Ren et al., 2007).

$$R^\alpha = \frac{1}{1-\alpha} \log_2 \frac{\iint TFR(t, \omega)^\alpha dt d\omega}{\iint TFR(t, \omega) dt d\omega} \quad (11)$$

که مرتبه معمولاً به صورت $\alpha = 3$ در نظر گرفته می‌شود.



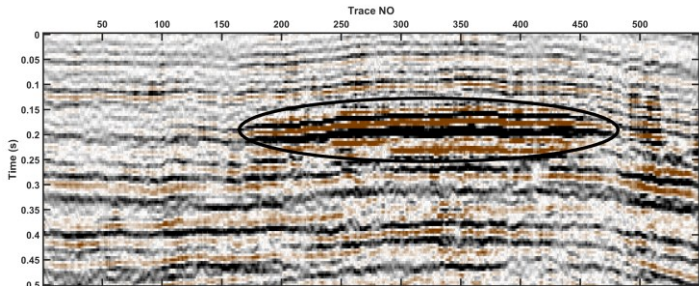
شکل ۱: الف) رد لرزه مصنوعی و نمایش زمان-بسامد آن با استفاده از ب) *STFT*، ج) *RM*، د) *SST*، ه) *MSST* و و) *TMSST*

^۱ Multiple fixed-point iterations

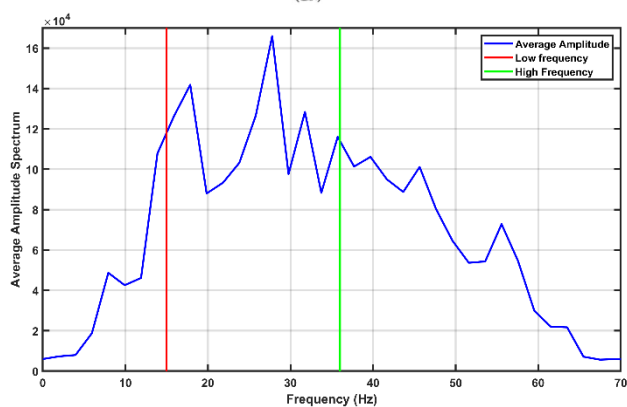
^۲ Rényi parameter

^۳ Sparsity

شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر می باشد لایه گازدار در این منطقه در ارتباط با افق ماسه سنگی غار از مؤلفه های سازند آسماری می باشد (روشندل و نجاتی، ۱۳۹۱). تجزیه طیفی با استفاده از روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش های زمان-بسامد مرسوم بر روی این داده لرزه ای اعمال گردید. از آنجا که محدوده بسامدی داده بین ۱۵ تا ۷۵ هرتز می باشد، برای بدست آوردن مقاطع تک-بسامد، دو بسامد ۱۵ و ۳۵ هرتز انتخاب گردید. ناهنجاری های با کم-بسامد (۱۵ هرتز) با دامنه زیاد با استفاده از روش پیشنهادی (*TMSST*) و روش های زمان-بسامد مرسوم بدست آورده شد (شکل ۳). ناهنجاری های با بسامد بالا (۳۵ هرتز) با بدست آوردن نشانگر تک-بسامد با استفاده از روش پیشنهادی (*TMSST*) و مقایسه آن با روش های مرسوم بدست آورده شده و در شکل ۴ نشان داده شده اند. همانطور که در شکل ۳ و ۴ (ه) نشان داده شده است، روش فشرده سازی همزمان چندگانه بازچینی شده در زمان توانسته است محدوده آنومالی سایه کم-بسامد را با قدرت تفکیک بالاتر و تمرکز انرژی بالاتر نسبت به بقیه روش ها به نمایش گذاشته و حضور گاز در این محدوده را تأیید نماید. جهت تأیید این موضوع، مقطع تفاضلی حاصل از تفاضل دو مقطع تک-بسامد با بسامدهای پایین و بالا بدست آورده شده و در شکل ۵ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳: الف) بخش مخزنی داده واقعی مربوط به یک خط چشمه در یکی از میدان های گازی جنوب غربی ایران (بیضی مشکی رنگ محل حضور گاز حاصل از داده های چاه را نشان می دهد) به همراه ب) طیف دامنه میانگین آن.

جدول ۱: پارامتر رنی محاسبه شده برای پنج روش زمان-بسامد نشان داده شده در شکل ۱.

روش زمان-بسامد	مقدار پارامتر رنی
<i>STFT</i>	۱۵,۰۷۸۴
<i>RM</i>	۱۱,۲۲۲۰
<i>SST</i>	۱۴,۷۰۹۰
<i>MSST</i>	۹,۱۶۸۸
<i>TMSST</i>	۸,۹۶۴۳

۴- سایه کم-بسامد و نشانگر تک-بسامد

استفاده از تجزیه طیفی در شناسایی و آشکارسازی سایه کم-بسامد ناشی از حضور گاز از جمله کاربردهای نمایش زمان-بسامد می باشد (Chabyshova & Goloshubin, 2014). یک توضیح و برداشت احتمالی این است که این امواج، امواج برشی تبدیل شده محلی هستند که عمدتاً به صورت امواج P حرکت می کنند و بنابراین کمی بعد از رویداد اولیه واقعی به گیرنده می رسند (Castagna et al., 2003). سایه کم-بسامد ناحیه ای است که در داده های لرزه ای با بسامدهای غیرعادی پایین مشخص می شوند که در زیر مخازن گازی رخ می دهد. می توان با مقایسه برش های بسامدی مختلف، سایه های با بسامد پایین لرزه ای را شناسایی کرد. وجود ناهنجاری های کم-بسامد در برش های بسامد پایین بجای برش های بسامد متوسط به بالا، نشانگر سایه کم-بسامد است. در نتیجه، استفاده از ابزاری جهت آشکارسازی این نواحی بر روی داده ای لرزه ای، امری مهم و ضروری به نظر می رسد. یکی از این ابزارها استفاده از نشانگر تک-بسامد می باشد که بررسی آن در بسامدهای مختلف از جمله روش-های رایج محسوب می شود (Castagna et al., 2003; Liu et al., 2011; Sinha et al., 2005; Mahdavi et al., 2021). روش نشانگر تک-بسامد با انتقال یک مجموعه از داده های لرزه ای دوبعدی به حوزه زمان-بسامد و ایجاد یک حجم سه بعدی حاصل می شود که بعد سوم آن بسامد است (رداد، ۱۳۹۸). بعد از اینکه در راستای محور بسامد برش صورت می پذیرد، مقطعی دوبعدی حاصل خواهد شد که به مقطع تک-بسامد لرزه ای معروف است. به همین منظور، مقاطع تک-بسامد بدست آورده شده از یکسری داده لرزه ای واقعی با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله و مقایسه آن با روش های زمان-بسامد مرسوم در بخش بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۵- پیاده سازی بر روی داده لرزه ای واقعی

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در این مقاله بر روی داده واقعی، بخشی از یک داده لرزه ای مربوط به یکی از میدانی گازی جنوب ایران مورد استفاده قرار گرفت. فاصله نمونه برداری زمانی برای این داده لرزه ای ۴ میلی ثانیه می باشد. این داده به همراه طیف دامنه آن در

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۲، ۱۴۰۱.

بسامد می‌باشد. علاوه بر این، بازتابنده‌های گنجانده شده در کنار هم در زمان ۱ ثانیه در داده‌های مصنوعی که نشان‌دهنده یک لایه نازک می‌باشد، توسط این روش به خوبی شناسایی و تفکیک گردید. در ادامه، روش پیشنهادی بر روی یک داده واقعی دوبعدی با هدف شناسایی سایه کم- بسامد نیز اعمال شد و از آنجا که داشتن دقت زمانی جهت شناسایی این نشانگر اهمیت دارد، استفاده از این تبدیل زمان- بسامد موجب شناسایی دقیق مخزن گازی و موقعیت آن گردید که همخوانی بیشتری با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه دارد. از جمله تحقیقاتی که می‌تواند موجب بهبود عملکرد روش پیشنهادی در این مقاله شود و در آینده مورد استفاده قرار گیرد، ترکیب و توسعه آن با تبدیل S تمم‌یافته می‌باشد که باید با پیدا کردن یک الگوریتم مناسب جهت تخمین بسامد لحظه‌ای همراه باشد که در نهایت منجر به ارائه یک تبدیل زمان- بسامد جدید با قدرت تفکیک بالا می‌شود. نتیجه حاصل از این الگوریتم می‌تواند جهت تخمین فاکتور کیفیت (Q) و شناسایی کانال در داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

۷- پیوست

$$RM(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |STFT_x^g(\eta, \nu)| \delta(t - \hat{t}(\eta, \nu)) \delta(\omega - \hat{\omega}(\eta, \nu)) d\eta d\nu$$

$$\hat{\omega}(t, \omega) = \omega - \Im \left\{ \frac{STFT_x^{dg}(t, \omega)}{STFT_x^g(t, \omega)} \right\}$$

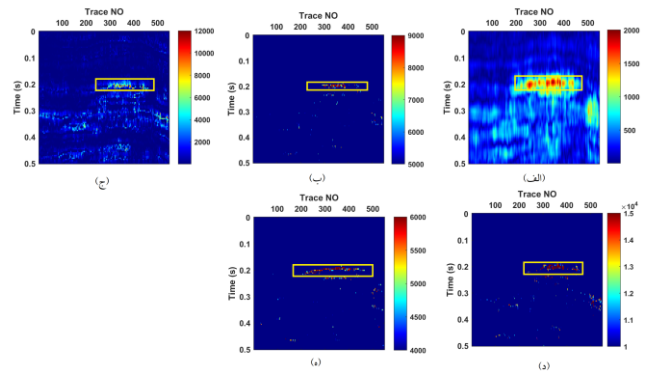
$$\hat{t}(t, \omega) = t + R \left\{ \frac{STFT_x^{ig}(t, \omega)}{STFT_x^g(t, \omega)} \right\} \quad (1-ب)$$

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_k(t, \hat{\omega}_k(t, \omega)) \\ = \varphi'_k(t) + \frac{\varphi''_k(t)^2}{1 + \varphi''_k(t)^2} (\hat{\omega}_k(t, \omega) - \varphi'_k(t)) \\ = \varphi'_k(t) + \left(\frac{\varphi''_k(t)^2}{1 + \varphi''_k(t)^2} \right)^2 (\omega - \varphi'_k(t)) \end{aligned} \quad (2-ب)$$

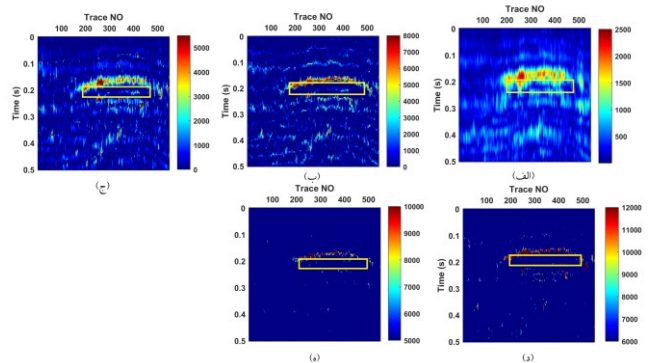
$$\begin{aligned} SST^{[2]}(t, \omega) \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} STFT_x^g(t, \nu) \delta(\omega - \hat{\omega}_k(t, \omega)) d\nu = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} SST^{[1]}(t, \nu) \delta(\omega - \hat{\omega}_k(t, \nu)) d\nu \end{aligned} \quad (3-ب)$$

$$\hat{f}(\xi) = a(\omega) e^{i(\varphi(\omega) + \varphi'(\omega)(\xi - \omega) + 0.5\varphi''(\omega)(\xi - \omega)^2)} \quad (4-ب)$$

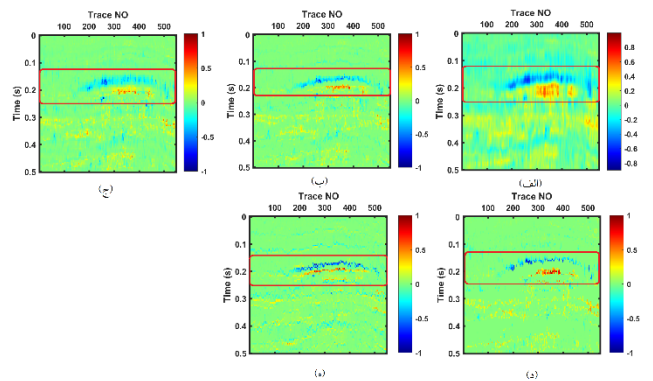
$$\hat{g}(\omega) = \sqrt{2\sigma\pi} e^{-0.5\sigma\omega^2} \quad (5-ب)$$



شکل ۳: مقاطع تک- بسامد ۱۵ هرتزی حاصل از تحلیل زمان- بسامد مقطع لرزه‌ای نشان داده شده در شکل ۳ با استفاده از الف) STFT (ب) RM (ج) SST (د) MSST (ه) و TMSST. کادرهای مستطیلی زرد رنگ در شکل‌ها موقعیت احتمالی ناهنجاری‌های سایه کم- بسامد را نشان می‌دهند.



شکل ۴: مقاطع تک- بسامد ۳۵ هرتزی حاصل از تحلیل زمان- بسامد مقطع لرزه‌ای نشان داده شده در شکل ۳ با استفاده از الف) STFT (ب) RM (ج) SST (د) MSST (ه) و TMSST. کادرهای مستطیلی زرد رنگ در شکل‌ها موقعیت احتمالی ناهنجاری‌های سایه کم- بسامد را نشان می‌دهند.



شکل ۵: مقاطع تک- بسامد تفاضلی حاصل از الف) STFT (ب) RM (ج) SST (د) MSST (ه) و TMSST. مستطیل‌های قرمز رنگ در شکل‌ها موقعیت احتمالی ناهنجاری‌های سایه کم- بسامد را نشان می‌دهند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد از روش تبدیل فشرده‌سازی همزمان چندگانه بازچینی‌شده در زمان جهت آنالیز داده‌های لرزه‌ای استفاده شود. در ابتدا، این روش بر روی یک داده لرزه‌ای مصنوعی اعمال و موجب بهبود پارامتر رنی شد که نشان‌دهنده قدرت تفکیک بالای این تبدیل زمان-

frequency shadows associated with hydrocarbons. The Leading Edge, 22(2), 120-127.

Chabyshova, E., & Goloshubin, G. (2014). Seismic modeling of low-frequency "shadows" beneath gas reservoirs. Geophysics, 79(6), D417-D423.

Chen, H., Kang, J., Chen, Y., Xu, D., & Hu, Y. (2017). An improved time-frequency analysis method for hydrocarbon detection based on EWT and SET. Energies, 10(8), 1090.

Chen, X., Chen, H., Fang, Y., & Hu, Y. (2020). High-Order Synchroextracting Time-Frequency Analysis and Its Application in Seismic Hydrocarbon Reservoir Identification. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.

Chen, X., Chen, H., Li, R., Hu, Y., & Fang, Y. (2020). Multisynchrosqueezing Generalized S-Transform and Its Application in Tight Sandstone Gas Reservoir Identification. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.

Daubechies, I., Lu, J., & Wu, H.-T. (2011). Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool. Applied and Computational Harmonic Analysis, 30(2), 243-261.

Daubechies, I., & Maes, S. (2017). A nonlinear squeezing of the continuous wavelet transform based on auditory nerve models. In Wavelets in medicine and biology (pp. 527-546). Routledge.

Dragomiretskiy, K., & Zosso, D. (2013). Variational mode decomposition. IEEE Transactions on Signal Processing, 62(3), 531-544.

Fang, Y., Hu, Y., Li, M., Chen, H., Chen, X., & Li, J. (2021). Second-Order Horizontal Multi-Synchrosqueezing Transform for Hydrocarbon Reservoir Identification. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 19, 1-5.

Gabor, D. (1946). Theory of communication. Part 1: The analysis of information. Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering, 93(26), 429-441.

Gholtashi, S., Nazari Siahshar, M. A., RoshandelKahoo, A., Marvi, H., & Ahmadifard, A. (2015). Synchrosqueezing-based transform and its application in seismic data analysis. Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, 4(4), 1-14.

Hamidi, M., Hosseini, S. K., & Sadeghi, H. (2011). SUCCESSFUL APPLICATION S-TRANSFORM TIME-FREQUENCY METHOD IN HYDROCARBON RESERVOIRS AND LOW

$$\hat{t}(t, \omega) = -\varphi'(\omega) + \frac{\varphi''(\omega)^2}{\sigma^2 + \varphi''(\omega)^2} (t + \varphi'(\omega)) \quad (6-ب)$$

$$\hat{t}(\hat{t}(t, \omega), \omega) = -\varphi'(\omega) + \left(\frac{\varphi''(\omega)^2}{\sigma^2 + \varphi''(\omega)^2}\right)^2 (t + \varphi'(\omega)) \quad (7-ب)$$

$$\hat{t}(\hat{t}(\hat{t}(t, \omega), \omega), \omega) = -\varphi'(\omega) + \left(\frac{\varphi''(\omega)^2}{\sigma^2 + \varphi''(\omega)^2}\right)^3 (t + \varphi'(\omega)) \quad (8-ب)$$

$$\hat{t}^{[N]}(t, \omega) = -\varphi'(\omega) + \left(\frac{\varphi''(\omega)^2}{\sigma^2 + \varphi''(\omega)^2}\right)^N (t + \varphi'(\omega)) \quad (9-ب)$$

$$TMSST^{[N]}(u, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(t, \omega) \delta(u - \hat{t}^{[N]}(t, \omega)) dt \quad (10-ب)$$

۸- منابع

رداد، م، ۱۳۹۸، تحلیل زمان- بسامد داده‌های لرزه‌ای با روش تبدیل S بازچینی‌شده برای آشکارسازی سایه کم- بسامد، نشریه پژوهش-های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۲، صفحات ۲۸۳-۲۹۳.

روشندل، ا، نجاتی، ع، ۱۳۹۱، تجزیه طیفی با قدرت تفکیک زیاد و کاربرد آن در آشکارسازی سایه‌های کم ناشی از مخازن گازی، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۶، شماره ۱، صفحه ۶۱-۶۸.

Auger, F., & Flandrin, P. (1995). Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method. IEEE Transactions on Signal Processing, 43(5), 1068-1089.

Auger, F., Flandrin, P., Lin, Y.-T., McLaughlin, S., Meignen, S., Oberlin, T., & Wu, H.-T. (2013). Time-frequency reassignment and synchrosqueezing: An overview. IEEE Signal Processing Magazine, 30(6), 32-41.

Cao, H., Wang, X., He, D., & Chen, X. (2020). An improvement of time-reassigned synchrosqueezing transform algorithm and its application in mechanical fault diagnosis. Measurement, 155, 107538.

Castagna, J. P., Sun, S., & Siegfried, R. W. (2003). Instantaneous spectral analysis: Detection of low-

- Sun, S., Castagna, J. P., & Siegfried, R. W. (2002). Examples of wavelet transform time-frequency analysis in direct hydrocarbon detection. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2002 (pp. 457–460). Society of Exploration Geophysicists.
- Tary, J. B., Herrera, R. H., & van der Baan, M. (2018). Analysis of time-varying signals using continuous wavelet and synchrosqueezed transforms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2126), 20170254.
- Thakur, G., & Wu, H.-T. (2011). Synchrosqueezing-based recovery of instantaneous frequency from nonuniform samples. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 43(5), 2078–2095.
- Tu, X., Zhang, Q., He, Z., Hu, Y., Abbas, S., & Li, F. (2020). Generalized Horizontal Synchrosqueezing Transform: Algorithm and Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Wang, Q., Gao, J., & Liu, N. (2019). Second-order synchrosqueezing wave packet transform and its application for characterizing seismic geological structures. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(5), 760–764.
- Wang, S., Chen, X., Cai, G., Chen, B., Li, X., & He, Z. (2013). Matching demodulation transform and synchrosqueezing in time-frequency analysis. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 62(1), 69–84.
- Wu, G., & Zhou, Y. (2018). Seismic data analysis using synchrosqueezing short time Fourier transform. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(4), 1663–1672.
- Yu, G. (2018). Demodulated synchrosqueezing transform. 2018 Chinese Automation Congress (CAC), 3468–3471.
- Yu, G., Lin, T., Wang, Z., & Li, Y. (2020). Time-reassigned multisynchrosqueezing transform for bearing fault diagnosis of rotating machinery. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(2), 1486–1496.
- Yu, G., Lin, T., Wang, Z., & Li, Y. (2021). Time-Reassigned Multisynchrosqueezing Transform for Bearing Fault Diagnosis of Rotating Machinery. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(2). <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2970571>
- Yu, G., Wang, Z., & Zhao, P. (2018). Multisynchrosqueezing transform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(7), 5441–5455.
- FREQUENCY SHADOWS DETECTION. Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium, 1–4.
- Huang, N. E., & Wu, Z. (2008). A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Reviews of Geophysics*, 46(2).
- Huang, Z., Zhang, J., Zhao, T., & Sun, Y. (2015). Synchrosqueezing S-transform and its application in seismic spectral decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(2), 817–825.
- Liu, G., Fomel, S., & Chen, X. (2011). Time-frequency analysis of seismic data using local attributes. *Geophysics*, 76(6), P23–P34.
- Mahdavi, A., Kahoo, A. R., Radad, M., & Monfared, M. S. (2021). Application of the local maximum synchrosqueezing transform for seismic data. *Digital Signal Processing*, 110, 102934.
- Mallat, S. (1999). *A wavelet tour of signal processing*. Elsevier.
- Martin, W., & Flandrin, P. (1985). Wigner-Ville spectral analysis of nonstationary processes. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 33(6), 1461–1470.
- Pinnegar, C. R., & Mansinha, L. (2003). The S-transform with windows of arbitrary and varying shape. *Geophysics*, 68(1), 381–385.
- Radad, M., Gholami, A., & Siahkoochi, 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(3), 403–412.
- Ren, H., Goloshubin, G., & Hilterman, F. (2007). Spectra crossplot. *Leading Edge (Tulsa, OK)*, 26(12). <https://doi.org/10.1190/1.2821943>
- Shirazi, M., Kahoo, A. R., & Chen, Y. (2018). Detection of Low-frequency Shadows Associated with Gas Using High-resolution Empirical Wavelet Transform. 80th EAGE Conference and Exhibition 2018, 2018(1), 1–5.
- Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D., & Castagna, J. P. (2005). Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform. *Geophysics*, 70(6), P19–P25.
- Stockwell, R. G., Mansinha, L., & Lowe, R. P. (1996). Localization of the complex spectrum: the S transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44(4), 998–1001.

شیرازی و همکاران، تحلیل زمان-بسامد داده های لرزه ای با استفاده از روش تبدیل فشرده سازی همزمان چندگانه، صفحات ۱۶۱-۱۷۲.

Yu, G., Wang, Z., Zhao, P., & Li, Z. (2019). Local maximum synchrosqueezing transform: an energy-concentrated time-frequency analysis tool. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 117, 537-552.

Yu, G., Yu, M., & Xu, C. (2017). Synchroextracting transform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(10), 8042-8054.



Time-frequency analysis of seismic data by time-reassigned multi-synchrosqueezing transform to detect low frequency shadows

Mahmoud Shirazi^{1*}, Amin Roshandel Kahoo², Mohammad Radad³ and Gang Yu⁴

- 1- Ph.D. student, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology.
2- Associate professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology.
3- Assistant Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology
4- Assistant Professor, School of Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan, China.

Received: 15 September 2022; Accepted: 24 February 2023

Corresponding author: m.shirazi@shahroodut.ac.ir

Keywords

Time-frequency analysis
Time-reassigned multi-synchrosqueezing transform
ISO frequency attribute
Low frequency shadows

Extended Abstract

Summary

Identification of low-frequency shadows is very important in the sense that they are related to gas reservoirs. These low-frequency shadows, produced by gas attenuation on seismic waves, cause the low frequencies under the gas reservoirs to have stronger amplitudes compared to the amplitudes of the high frequencies. Therefore, if proper time accuracy is considered in the identification of this indicator, the gas reservoir, and consequently, its position

will be identified with considerable accuracy. One of the methods of identifying low-frequency shadows is time-frequency transforms. Therefore, those time-frequency transforms that have good time and frequency resolution, can be of great help in identifying low-frequency shadows. In this research, a method called time-reassigned multi-synchrosqueezing transform (TMSST) is used that acts better than common time-frequency transforms such as short-time Fourier transform (STFT), reassignment method (RM), synchrosqueezing transform (SST) and multi-synchrosqueezing transform (MSST) in terms of time and frequency resolution. Therefore, by applying this transform on a synthetic dataset and a real dataset, its performance has been demonstrated. As a seismic application, single-frequency sections obtained from a hydrocarbon field were prepared in MATLAB environment and low-frequency shadow anomalies were detected using this time-frequency method with high resolution. In addition, in this study, the Rennie parameter, which is directly related to the sparsity, has been used to evaluate the energy concentration. The number obtained for the Rennie parameter using the method proposed in this paper is another reason for proving the remarkable performance of this method in obtaining time-frequency representation with high time and high frequency resolution at the same time.

Introduction

Different processes generate low-frequency seismic anomalies beneath gas reservoirs. In some instances, hydrocarbon-rich zones of such reservoirs might be considered as low-frequency domain anomalies that display no discernible time delay relative to reservoir reflections.

Seismic imaging is the last step in the processing chain of seismic data analysis and is typically the result of the two phases of processing and interpretation. Both processing and interpretation can benefit from the use of seismic traces. Therefore, it is crucial and necessary to be able to view signals and extract signal-related data. Time and frequency domains are two typical techniques of displaying a seismic trace. Actually, it is impossible to enjoy all these benefits simultaneously. As a result, it seems critical to create a tool that can show these two components of the signal at the same time. The analysis of a non-stationary signal, whose frequency content varies over time, benefits greatly from this representation that is referred to time-frequency representation (TFR).

Methodology and Approaches

The STFT of the signal $x(t)$ which is derived from the Fourier transform of the windowed signal $g(\tau - t)x(\tau)$ should be localized in $\tau \in [t - \Delta_t, t + \Delta_t]$. Therefore, we have:

$$STFT_x^g(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau - t)x(\tau)e^{-i\omega(\tau-t)}d\tau$$

where $g(t)$ is a real value window with $\text{supp}\{g\} \in [-\Delta_t, \Delta_t]$.

The RM technique that reassigns the coefficients both in time and frequency is obtained by moving data of the term $|STFT_x^g(t, \omega)|$ from the current coordinate (t, ω) to a new coordinate $(\hat{t}(t, \omega), \hat{\omega}(t, \omega))$ as (Chabyshova and Goloshubin, 2014):

$$RM(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |STFT_x^g(\eta, \nu)|\delta(t - \hat{t}(\eta, \nu))\delta(\omega - \hat{\omega}(\eta, \nu))d\eta d\nu$$

$$\hat{\omega}(t, \omega) = \omega - \Im \left\{ \frac{STFT_x^{dg}(t, \omega)}{STFT_x^g(t, \omega)} \right\}$$

$$\hat{t}(t, \omega) = t + \Re \left\{ \frac{STFT_x^{tg}(t, \omega)}{STFT_x^g(t, \omega)} \right\}$$

where, $\hat{\omega}(t, \omega)$ and $\hat{t}(t, \omega)$ are the estimated IF and GD.

To address the inadequacy in the RM technique for signal recovery, the SST method also uses the phase information of the signal in addition to amplitude information. Squeezing the blurry energies into the related true IF trajectory across the frequency direction done by the SST method can be expressed as (Yu et al, 2018):

$$SST(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} STFT_x^g(t, \nu)\delta(\omega - \omega_0(t, \nu))d\nu$$

$$\omega_0(t, \omega) = \omega - \Im \left\{ \frac{STFT_x^{dg}(t, \omega)}{STFT_x^g(t, \omega)} \right\}$$

where, $\omega_0(t, \omega)$ is the estimated IF.

A more accurate estimation of IF using the MSST method to lead to a more concentrated TFR can be expressed by:

$$SST^{[N]}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} STFT_x^g(t, \nu)\delta(\omega - \hat{\omega}_k^N(t, \omega))d\nu = \int_{-\infty}^{+\infty} SST^{[N-1]}(t, \nu)\delta(\omega - \hat{\omega}_k(t, \nu))d\nu$$

$$\hat{\omega}_k^N(t, \omega) = \varphi'_k(t) + \left(\frac{\varphi''_k(t)^2}{1 + \varphi''_k(t)^2} \right)^N (\omega - \varphi'_k(t))$$

Finally, for a strong frequency varying signal, the two-dimensional group delay estimate and the final expression of the TMSST, which is based on the multiple fixed-point iterations, can be written as (Yu et al, 2020):

$$\hat{t}(t, \omega) = -\dot{\varphi}(\omega) + \frac{\varphi''(\omega)^2}{\sigma^2 + \varphi''(\omega)^2} (t + \dot{\varphi}(\omega))$$

$$T_s^{[N]}(u, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(t, \omega)\delta(u - \hat{t}^{[N]}(t, \omega))dt$$

Results and Conclusions

In this paper, we have introduced a novel seismic time-frequency approach using time-reassigned multi-synchrosqueezing transform (TMSST). The TMSST method is a fixed-point iterative technique that can be used on signals with large frequency variations. It can also address the limitation of the MSST method to produce blurry time-frequency representation and reassign the TF coefficients across time direction. The TMSST method can be adaptive in analyzing seismic data. The TMSST method has a substantially higher time-frequency resolution than other current

time-frequency analysis (TFA) methods and can thus be considered as a robust and promising tool for seismic data interpretation. We have also illustrated the strength of the TMSST method over traditional TFA methods by applying these methods on both synthetic and real seismic data.
