



استفاده از تبدیل Curvelet در تضعیف نوفه‌های زمین غلت در داده‌های لرزه‌ای

ابراهیم زارع^۱، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران

بهاره بوستانی^۲، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر
عبدالرحیم جواهریان^۳، استاد دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

یکی از مراحل پردازش داده‌های لرزه‌ای، تضعیف انواع نوفه‌ها از رکوردهای لرزه‌نگاری است. برای این منظور می‌توان داده‌های حوزه‌ی زمان را به حوزه‌ی دیگری منتقل نمود که در آن جدایش میان سیگنال و نوفه حاصل شود. بدین ترتیب می‌توان نوفه را تضعیف نمود به طوری که آسیب کمتری به سیگنال وارد شود. در این راستا تبدیل‌های زمان-فرکانسی مانند تبدیل گابور و تبدیل موجک تعریف شده‌اند. یکی از تبدیل‌های چندمقیاسی مناسب برای این منظور تبدیل curvelet است. تبدیل curvelet علاوه بر مقیاس و موقعیت، اندیس جهت نیز دارد. بنابراین با توجه به ویژگی‌های فرکانسی و جهتی متفاوت رکوردهای لرزه‌گاری مانند بازتابنده‌ها و امواج زمین غلت، در حوزه‌ی curvelet جدایش نسبتاً خوبی میان آنها حاصل می‌شود. با صفر نمودن ضرایب curvelet در مقیاس‌ها و جهت‌هایی که زمین غلت در آنها حضور دارد، می‌توان تا حد مطلوبی این نوفه‌ها را تضعیف نمود. در حوزه‌ی curvelet در مقیاس‌های پایین دقت تفکیک جهتی بالاست، بنابراین امواج زمین غلت فقط در چند جهت نزدیک به ۹۰ درجه به طور متقارن حضور دارند. در مقیاس‌های بالا ممکن است در برخی جهات هم زمین غلت و هم بازتابنده‌ها حضور داشته باشند و حذف آنها تا حدی سبب تضعیف بازتابنده‌ها می‌شود. بنابراین با به کارگیری طرح‌واره بهینه‌سازی Bayesian می‌توان تا حدودی نتایج را بهبود بخشید. در این مقاله کد نوشته شده در MATLAB بر داده‌های مصنوعی و واقعی اعمال و نتایج حاصل از تضعیف زمین غلت به نمایش گذاشته شده است. داده‌ی مصنوعی در این مقاله یک رکوردهای مشترک است که امواج زمین غلت در آن با استفاده از نرم‌افزار هرمن و بازتاب‌ها با کد MATLAB تولید شده‌اند. داده‌ی واقعی رکوردهای شماره ۱۷۵۸ کوه دارا است که در آن امواج زمین غلت کاملاً بازتاب‌ها را پوشانده‌اند. در داده‌های مصنوعی و واقعی با اعمال کد نوشته شده در MATLAB بخش زیادی از امواج زمین غلت تضعیف شده‌اند. بهتر است قبل از اعمال فیلتر curvelet بر رکوردهای AGC اعمال و پس از آن برداشته شود. در غیر این صورت پس از اعمال فیلتر در مقطع، نوفه‌های ضربدری شکل مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نوفه زمین غلت، تبدیل چندمقیاسی، تبدیل چندجهتی، تبدیل curvelet، الگوریتم بهینه‌سازی Bayesian

مقدمه

همکاران دو الگوریتم تبدیل فوری به سریع با فواصل نامساوی و پیچش را برای تبدیل curvelet نوع دوم ارائه نمودند [۵]. در این مقاله از تبدیل curvelet نوع دوم بر اساس الگوریتم پیچش استفاده شده است. محققین در تضعیف امواج زمین غلت با استفاده از تبدیل curvelet از روش‌های Bayesian استفاده نموده‌اند [۷، ۸، ۹]. همچنین برای تضعیف امواج زمین غلت می‌توان به نتایج مطالعات ژنگ و همکاران [۱۰، ۱۱] و نقی‌زاده و ساچی [۱۲] اشاره نمود. داده‌ی مصنوعی مورد آزمایش در این مقاله یک رکوردهای مشترک است که امواج زمین غلت در آن با استفاده از نرم‌افزار هرمن تولید شده‌اند [۱۳]. داده‌ی واقعی یک رکوردهای مشترک مربوط به منطقه‌ی کوه دارا است که در آن‌ها امواج زمین غلت بسیار پراکنده هستند.

۱- تبدیل curvelet

curvelet در فضای دو بعدی، شکلی از موج است که در یک جهت مانند یک ridge هموار است و در جهت عمود بر آن نوسان می‌کند. ابعاد

تبدیل موجک به دلیل مقیاس‌گذاری همسانگرد برای پدیده‌های یک بعدی مانند ناپیوستگی نقطه‌ای در یک سیگنال، عملکرد مناسبی دارد. تبدیل موجک یک بعدی با اعمال بر سطرها و ستون‌های یک ماتریس دو بعدی به دو بعد تعمیم داده می‌شود [۱]. تبدیل موجک دو بعدی، جزئیات داده لرزه‌ای را در فرکانس‌های مختلف تنها در سه جهت افقی، قائم و قطری نشان می‌دهد. در پاسخ به حساسیت جهتی ضعیف تبدیل موجک دو بعدی، تبدیل‌های چندمقیاسی و چندجهتی تعریف شدند. تبدیل ridgelet [۲] برای پدیده‌های خطی دو بعدی مناسب است. برای پدیده‌های منحنی شکل می‌توان منحنی مورد نظر را به اجزاء خطی کوچک‌تری تقسیم کرد و سپس هر جزء را تحلیل ridgelet نمود. این اساس تبدیل curvelet نوع اول می‌باشد [۳]. اما به دلیل الگوریتم پیچیده، تبدیل curvelet نوع دوم توسط کندس و داناها معرفی شد [۴]. این روش در واقع تبدیل فوری دو بعدی یک داده دو بعدی را به مقیاس‌ها و جهت‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌کند. کندس و

مقیاس‌ها و جهت‌های مختلف تقسیم می‌شود. تفاوت آن با تبدیل پیوسته، در تقسیم‌بندی صفحه‌ی فوریه با استفاده از مربع‌های هم مرکز به جای دایره‌های هم مرکز و ماتریس برش به جای ماتریس دوران می‌باشد. مانند تبدیل پیوسته curvelets در مقیاس 2^{-j} جهت θ_j و موقعیت $\mathbf{b} = (k_1, 2^{-j}, k_2, 2^{-j})$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Phi_{j,l,k}(x) = 2^{j/2} \phi_j(S_{\theta_l}^{-1}(x - S_{\theta_l}^{-1}\mathbf{b})) \quad (3)$$

و ضریب curvelet گسسته از ضرب داخلی این curvelet در تابع مورد نظر حاصل می‌شود:

$$C(j, l, k) = \int f(\omega) \overline{U_j(S_{\theta_l}^{-1}\omega)} e^{i(S_{\theta_l}^{-1}\mathbf{b}\omega)} d\omega \quad (4)$$

سمت راست انتگرال فوق بدون اپراتور U_j تبدیل فوریه تابع f می‌باشد، بنابراین اپراتور U_j در واقع پنجره‌های تعریف شده‌ای برای curvelet frame است که فوریه‌ی تابع f را فیلتر می‌کند [۵].

تبدیل curvelet در تضعیف امواج زمین‌غلت

برای تضعیف نوفه زمین‌غلت با استفاده از تبدیل curvelet می‌توان ابتدا بر داده‌ی مورد نظر AGC اعمال و سپس تبدیل curvelet مستقیم را اعمال نمود که در این مقاله نیز چنین عمل شده است. امواج زمین‌غلت بنابر سرعت کم در جهت‌های حول ۹۰ درجه از حوزی curvelet در هر مقیاس حضور دارند و ضرایب این زیرباندها صفر قرار داده می‌شود. در مرحله‌ی بعد تبدیل curvelet معکوس بر داده اعمال و نتیجه از داده‌ی اولیه کم می‌شود. بنابراین پیشگویی از داده‌ی تضعیف نوفه شده و امواج زمین‌غلت حاصل می‌شود. با استفاده از نتایج مرحله‌ی قبل و به کارگیری الگوریتم Bayesian در حوزی curvelet داده‌ی تضعیف نوفه شده و امواج زمین‌غلت تضعیف شده بهینه می‌شوند. در نهایت از داده‌ی تضعیف نوفه شده و زمین‌غلت تضعیف شده، اثر AGC برداشته می‌شود.

۳- بحث

تبدیل curvelet یک تبدیل چند مقیاسی و چند جهتی است. در حوزی curvelet می‌توان باندهای فرکانسی متفاوت داده لرزه‌ای را جدا نمود، همچنین در هر زیرباند فرکانسی پدیده‌های دارای جهت‌های مختلف نیز از هم مجزا می‌شوند. امواج زمین‌غلت در مقیاس‌های پایین در دو جهت نزدیک به ۹۰ درجه به طور کاملاً مجزا از بازتاب‌ها حضور دارند، اما در مقیاس‌های بالا به وضوح امواج زمین‌غلت دیده نمی‌شوند [۱۲]. در این مقاله از تبدیل curvelet گسسته نوع دوم سریع با استفاده از روش پیش‌چشمه^۱ برای تضعیف نوفه‌های زمین‌غلت استفاده شده است. کد نوشته شده در MATLAB بر داده‌های مصنوعی و واقعی اعمال و نتایج آن نشان داده شده است. در شکل ۲-الف رکورد چشمه مشترک مصنوعی با گسترش چشمه در یک طرف، شامل چند بازتابنده و امواج شکست مرزی تولید شده با استفاده از کد MATLAB نشان داده شده است. امواج زمین‌غلت با استفاده از نرم‌افزار هرمن شبیه‌سازی و به

آن در زمان و فرکانس از قانون مقیاس‌گذاری سهمی (ناهمسانگرد) تبعیت می‌کند، به طوری که عرض آن برابر با توان دوم طول آن است. curvelet در زمان و فرکانس بسیار متمرکز است یعنی جز در بازه‌ی بسیار کوچک، در بقیه نقاط مقدار صفر دارد. بنابراین ویژگی‌ها به راحتی قابل انطباق بر پدیده‌های موجود در مقاطع لرزه‌نگاری مانند بازتاب‌ها و غیره می‌باشند. curvelet از قانون تحلیل‌های هارمونیک تبعیت می‌کند، یعنی می‌توان تابع دلخواه $f(x_1, x_2)$ را به صورت مجموعه‌ای از curveletها بسط داد که بسیار شبیه بسط یک تابع در پایه‌ای اورتونرمال است.

شکل موج $\Phi_j(x)$ که در آن $x = (x_1, x_2)$ می‌باشد به عنوان curvelet مادر در نظر گرفته می‌شود و سایر curveletها در مقیاس 2^{-j} از اتساع، دوران و انتقال این curvelet مادر حاصل می‌شوند. دوران با زاویه‌ی θ_l می‌باشد به طوری که $\theta_l = 2\pi l, l = 0, 1, \dots$ و انتقال با پارامتر $k = (k_1, k_2) \in Z^2$ انجام می‌شود. رابطه‌ی زیر یک curvelet را در مقیاس 2^{-j} جهت θ_l و موقعیت $\mathbf{b} = (k_1, 2^{-j}, k_2, 2^{-j})$ نشان می‌دهد [۵].

$$\Phi_{j,l,k}(x) = \phi_j(R_{\theta_l}(x - \mathbf{x}_k^{(j,l)})) \quad (1)$$

که در آن R_{θ} دوران به اندازه‌ی θ رادیان است و R_{θ}^{-1} ترانزاده‌ی آن است.

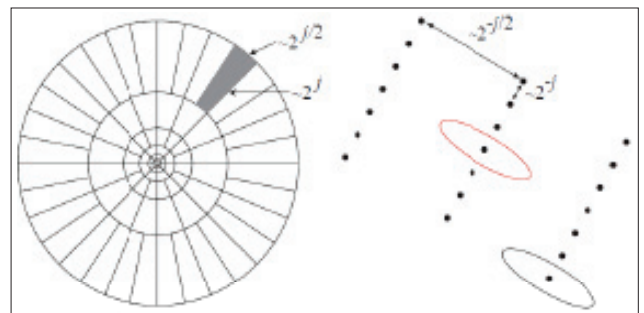
$$R_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$R_{\theta}^{-1} = R_{\theta}^T = R_{-\theta}$$

از ضرب یک curvelet $(\Phi_{j,l,k})$ در یک تابع $f \in L^2(R^2)$ ضریب curvelet حاصل می‌شود [۵].

$$C(j, l, k) = (f, \Phi_{j,l,k}) = \int_{R^2} f(x) \overline{\Phi_{j,l,k}(x)} dx \quad (2)$$

شکل ۱ curvelet frame پیوسته را نمایش می‌دهد. در تبدیل گسسته باز هم فضای فوریه‌ی دو بعدی به گوهایی در

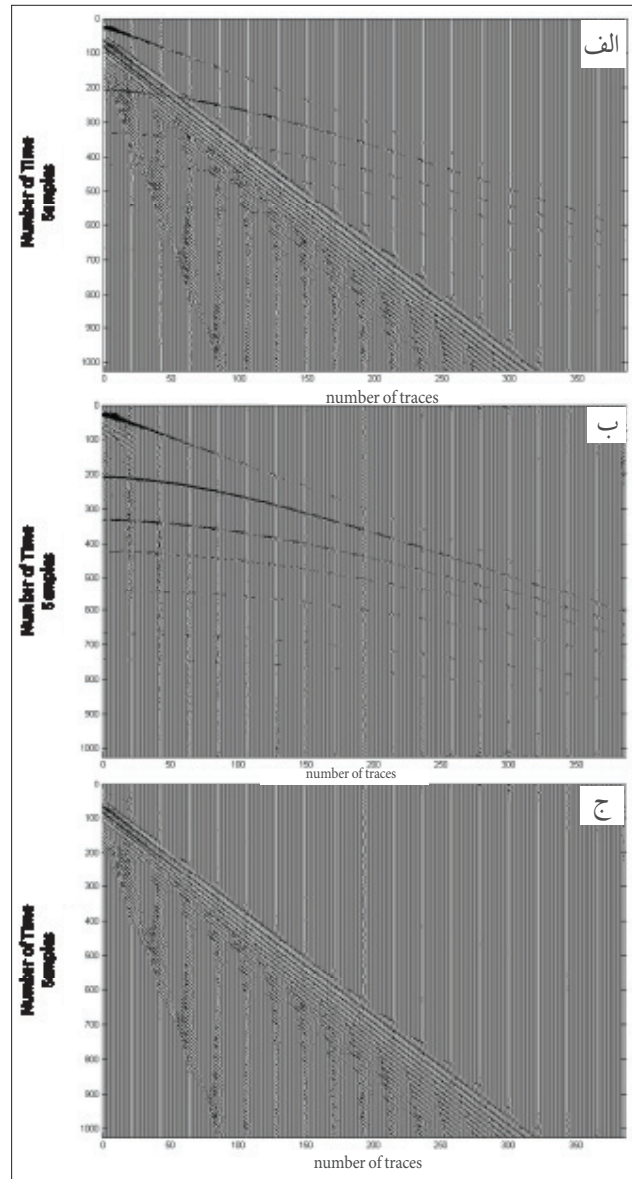
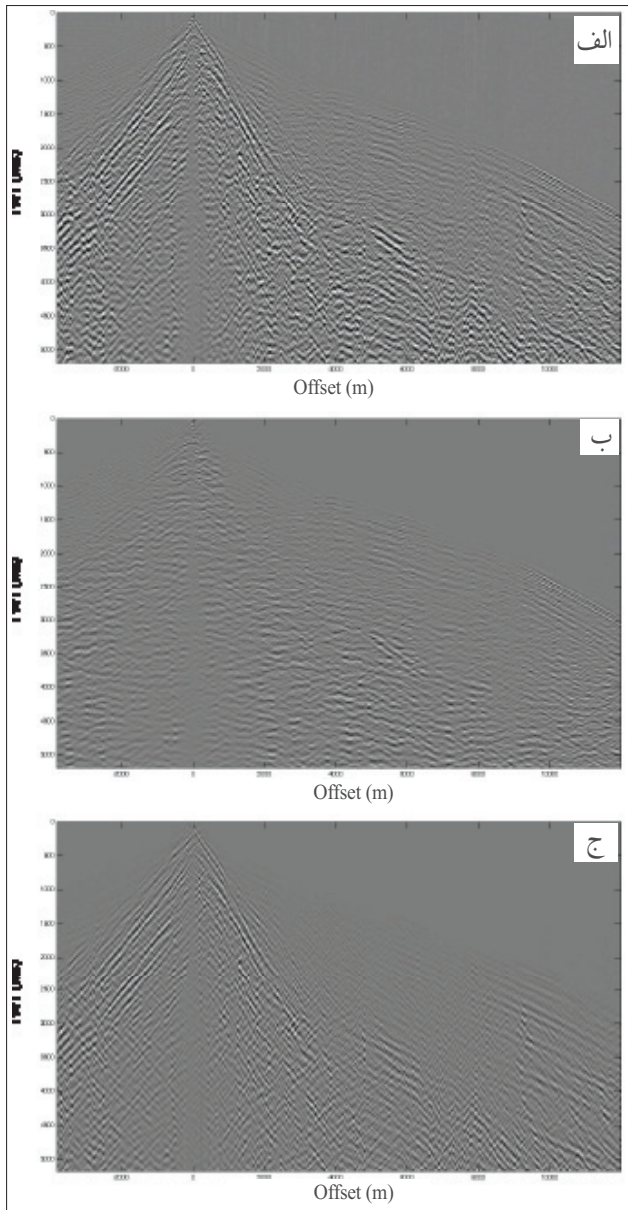


شکل سمت چپ curvelet frame در حوزی فوریه را نمایش می‌دهد. بخش گوه‌ای شکل که پر رنگ شده است نمایانگر محدوده‌ی فرکانسی یک curvelet با مقیاس و جهت خاص می‌باشد. در شکل سمت راست شبکه‌ی کارتیزین حاصل از انتقال همین curvelet در فضای غیر فوریه مشاهده می‌شود [۵]



که در شکل ۲-ج ملاحظه می‌شود تبدیل curvelet بخش زیادی از امواج زمین‌غلت را تضعیف نموده است بدون اینکه آسیبی به بازتابنده‌ها وارد شود. در شکل ۳-الف رکورد لرزه‌نگاری ۱۷۵۸ مربوط به کوه دارا پس از اعمال True Amplitude Recovery و Static correction نشان داده شده است. در این رکورد فاصله گیرنده‌ها از یکدیگر ۲۵ متر و فاصله

رکورد اضافه شده است. در این داده فاصله گیرنده‌ها از یکدیگر ۱۲/۵ متر و فاصله اولین گیرنده تا چشمه ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است و تعداد گیرنده‌ها نیز ۳۸۵ عدد می‌باشد. فاصله نمونه‌برداری زمانی داده‌ها ۴ میلی‌ثانیه است و چشمه در عمق ۱۴ متری قرار دارد. مدل زمین مورد استفاده در نرم‌افزار هرمن [۱۳] برای تولید امواج زمین‌غلت در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور



۳ (الف) رکورد لرزه‌نگاری چشمه مشترک ۱۷۵۸ کوه دارا پس از اعمال True amplitude recovery, AGC و Static correction. در این رکورد فاصله گیرنده‌ها از یکدیگر ۲۵ متر و فاصله نمونه‌برداری زمانی داده‌ها ۴ میلی‌ثانیه است. (ب) رکورد پس از حذف ضرایب curvelet در جهت‌های حضور زمین‌غلت در هر مقیاس و به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی Bayesian و (ج) زمین‌غلت تضعیف شده از رکورد، همان‌طور که ملاحظه می‌شود به دلیل ویژگی‌های جهت‌تبدیل curvelet به بازتاب تقریباً آسیبی وارد نشده است.



۲ (الف) رکورد لرزه‌نگاری چشمه مشترک مصنوعی که در آن امواج زمین‌غلت با استفاده از نرم‌افزار هرمن [۱۳] و بازتاب‌ها با کد MATLAB تولید شده‌اند. در این رکورد فاصله گیرنده‌ها از یکدیگر ۱۲/۵ متر و فاصله اولین گیرنده تا چشمه ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است و تعداد گیرنده‌ها نیز ۳۸۵ عدد می‌باشد. فاصله نمونه‌برداری زمانی داده‌ها ۴ میلی‌ثانیه است و چشمه در عمق ۱۴ متری قرار دارد. (ب) رکورد پس از حذف ضرایب curvelet در جهت‌های حضور زمین‌غلت در هر مقیاس و به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی Bayesian و (ج) زمین‌غلت تضعیف شده از رکورد



بهبود می‌یابد که این نتایج در شکل‌های ۳-ب و ۳-ج نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

از بررسی تضعیف نوفه‌های زمین‌غلت در داده‌ی واقعی نتایج زیر حاصل شد:

۱- در حوزه‌ی curvelet در مقیاس‌های پایین دقت تفکیک جهتی بالاست، بنابراین امواج زمین‌غلت فقط در چند جهت نزدیک به ۹۰ درجه به طور متقارن حضور دارند و با حذف آنها آسبایی به بازتابنده‌ها وارد نمی‌شود. در مقیاس‌های بالا ممکن است در برخی جهات هم زمین‌غلت و هم بازتابنده‌ها حضور داشته باشند و حذف آنها تا حدی سبب تضعیف بازتابنده‌ها می‌شود، بنابراین باید یک حالت بهینه انتخاب شود.

۲- از آنجائی که پایه‌ی تبدیل curvelet نوع دوم فوری‌ی دو بعدی است، بدون اعمال AGC و اعمال فیلتر نوفه‌هایی ضربدری شکل در مقطع به وجود می‌آید.

۳- برای پیشگویی داده‌ی تضعیف نوفه شده و امواج زمین‌غلت می‌توان از هر روش دیگری که برای تضعیف زمین‌غلت وجود دارد استفاده نمود، اما هر چه پیشگویی اولیه دقیق‌تر باشد نتیجه‌ی بهتری خواهیم داشت. بنابراین در این مرحله نیز از تبدیل curvelet استفاده شده است.

نمونه‌برداری زمانی داده‌ها ۴ میلی‌ثانیه است. پس از اعمال AGC ضرایب curvelet در جهت‌هایی از حوزه‌ی curvelet که امواج زمین‌غلت حضور دارند صفر قرار داده شده‌اند. به این ترتیب پیشگویی برای داده‌ی تضعیف نوفه شده و از تفاضل آن از داده‌ی اولیه پیشگویی برای زمین‌غلت تضعیف شده در الگوریتم بهینه‌سازی Bayesian قرار می‌گیرند و نتایج تا حدوی

۱ | مدل زمین مورد استفاده در نرم‌افزار هرمن برای ساخت داده‌ی مصنوعی شامل امواج زمین‌غلت

مدل با دو لایه هوازده نازک به ضخامت ۳ و ۱۰ متر

| ضخامت (km) | سرعت موج P (km/s) | سرعت موج S (km/s) | چگالی (gr/cc) |
|------------|-------------------|-------------------|---------------|
| ۰/۰۰۳ | ۰/۷ | ۰/۲۵ | ۱/۴ |
| ۰/۰۱ | ۱/۹ | ۱/۱ | ۱/۸ |
| ۰/۹ | ۲/۲ | ۱/۲ | ۲ |
| ۰/۶ | ۲/۴ | ۱/۴ | ۲/۲ |
| ۰/۵ | ۲/۷ | ۱/۵ | ۲/۴ |
| ۰/۷ | ۲/۹ | ۱/۶ | ۲/۵ |
| ۰/۹ | ۳/۴ | ۲ | ۲/۷ |
| ۰/۶ | ۳/۸ | ۲/۲ | ۲/۹ |
| Half space | ۴/۱ | ۲/۴ | ۳/۲ |

پانویس‌ها

¹ bahar_boustani@aut.ac.ir

² Wrapping based second generation FDCT

منابع

- [1] Longa, P., 2006, An optimized architecture for 2D discrete wavelet transform on FPGAs using distributed arithmetic, Project report, University of Ottawa.
- [2] Candes, E.J., 1998, Ridgelets: theory and applications, PhD thesis, Department of statistics, Stanford University.
- [3] Candes, E.J., and Donoho, D.L., 1999, Curvelets: a surprisingly effective no adaptive representation for objects with edges: Technical Report, 1999-28, Department of Statistics, Stanford University.
- [4] Candes, E.J., and Donoho, D.L., 2002, New tight frames of curve lets and optimal representation of objects with singularities: Technical Report, Department of Statistics, Stanford University.
- [5] Candes, E.J., Demanet, L., Donoho, D.L., and Ying, L., 2005, Fast discrete curvelet transform, SIAM Multistage Modeling and Simulation, 5, 861-899.
- [6] Curve lab 2.1.2, <http://www.curvelet.org/> curve lab/.
- [7] Yarham, C., Trad, D., and Herrmann, F.J., 2004, Curvelet processing and imaging: adaptive ground roll removal: CSEG National Convention, Great Exploration-Canada and Beyond, 1-4.
- [8] Yarham, C., Boeniger, U., and Herrmann, F.J., 2006, Curvelet-based ground roll removal: Ann. Internat. Mtg: SEG, New Orleans, 2777-2782.
- [9] Yarham, C., and Herrmann, F.J., 2008, Bayesian ground roll separation by curvelet domain sparsity promotion: Ann. Internat. Mtg: SEG, Las Vegas, 2576-2580.
- [10] Zheng, J., Yin, X., and Zhang, G., 1997, Multiscale and multiaspect method of removal surface-wave based on the second generation curvelet transform: Ann. Internat. Mtg: SEG, Houston, 3183-3187.
- [11] Zhang, Zh.Y., Zhang, X.D., Yu, H.Y., and Pan, X.H., 2010, Noise suppression based on a fast discrete curvelet transform: Journal of Geophysics and Engineering, 7, 105-112.
- [12] Naghizadeh, M., and Sacchi, M., 2011, Ground roll elimination by scale and direction guided curvelet transform: 73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, Vienna, Austria, 23-26 May.
- [13] Herrmann, R. B., 2006, Computer program in seismology an overview of synthetic seismogram computation, Version 3.30.
- [۱۴] بوستانی، ب، ۱۳۹۰، تضعیف نوفه‌های تصادفی و زمین‌غلت در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تبدیل curvelet، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی نفت-اکتشاف، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.