



تضعیف نوفه‌های زمین‌غلت در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تجزیه مُد متغیر

مهرداد خلیل طهماسبی^۱، امین روشندل کاهو^{۲*} و علی نجاتی کلاته^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

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

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

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۹؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۹

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

چکیده

واژگان کلیدی

تضعیف نوفه یکی از مراحل مهم پردازش داده‌های لرزه‌ای بازتابی است. عدم تضعیف نوفه در مراحل ابتدایی پردازش می‌تواند بر روی مراحل بعدی پردازش و تفسیر تأثیر مخرب داشته باشد و باعث افت کیفیت مقاطع و تصاویر لرزه‌ای نهایی شود. دسته مهمی از نوفه‌های داده‌های لرزه‌ای، نوفه‌های همدوس هستند؛ که از یک ردلرزه به ردلرزه دیگر دارای روند می‌باشند. یکی از مهم‌ترین نوفه‌های همدوس، نوفه زمین‌غلت است؛ که دارای محدوده فرکانسی پایین، دامنه بالا و سرعت انتشار پایین می‌باشند. روش‌های مختلفی نظیر فیلترهای فرکانسی بالا گذر، میان‌گذر و فیلتر فرکانس-عدد موج (f-k) برای تضعیف آن‌ها به کار می‌رود؛ که هرکدام از آن‌ها معایبی دارند. در این مقاله از روش تجزیه مُد متغیر برای تضعیف نوفه زمین‌غلت استفاده شده است. تجزیه مُد متغیر بر خلاف سایر روش‌های تجزیه مانند روش تجزیه مُد تجربی دارای پایداری بسیار بهتری در مقابل نوفه است. در این روش سیگنال حاوی نوفه به مؤلفه‌های نوسانی به نام مُد، تجزیه می‌شود. هر مُد از حوزه زمان به حوزه زمان-فرکانس انتقال داده می‌شود و سپس فیلتر طراحی شده بر روی آن اعمال می‌گردد و به حوزه زمان برگردانده می‌شود. ردلرزه نوفه‌زدا شده از حاصل جمع مُدهای فیلتر شده به دست می‌آید. روش تضعیف نوفه زمین‌غلت با استفاده از تجزیه مُد متغیر بر روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی اعمال گردید و نتایج آن با نتایج حاصل از روش متداول f-k مقایسه شد. مقایسه نتایج نشان داد که روش مبتنی بر تجزیه مُد متغیر بر خلاف روش متداول f-k بدون آسیب رساندن به سیگنال بازتابی، به خوبی نوفه زمین‌غلت را تضعیف نماید و می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای تضعیف نوفه زمین‌غلت مورد استفاده قرار گیرد.

لرزه‌نگاری بازتابی

تجزیه مُد متغیر

صفحه زمان-فرکانس

امواج زمین‌غلت

۱- مقدمه

آغشته شدن سیگنال بازتابی لرزه‌ای به انواع نوفه در هنگام برداشت داده لرزه‌ای و انجام مراحل مختلف پردازش اجتناب‌ناپذیر است و باعث افت کیفیت سیگنال بازتابی می‌شود. به گونه‌ای که انجام مراحل بعدی پردازش بر روی داده‌های لرزه‌ای ثبت شده نظیر واهمامیخت و آنالیز سرعت بدون انجام فرایند نوفه‌زدایی بسیار دشوار و همراه با خطا است. لذا مرحله تضعیف نوفه همواره از اصلی‌ترین مراحل پردازش داده‌های لرزه‌ای بازتابی به شمار می‌آید. نوفه‌های موجود در داده‌های لرزه‌ای را می‌توان به دو دسته مهم همدوس و ناهمدوس تقسیم‌بندی نمود (شریف و جلدارت، ۱۹۹۵). نوفه زمین‌غلت دسته مهمی از نوفه‌های همدوس داده‌های لرزه‌ای خشکی است؛ که دارای سرعت و فرکانس کمتر و دامنه قوی‌تری نسبت به امواج بازتابی است (ایلماز، ۲۰۰۱). به دلیل پاششی بودن (پویول، ۲۰۰۳)، این دسته از امواج به صورت بادبزی در رکورد چشمه مشترک مشاهده می‌شوند و رویدادهای بازتابی در زمان‌های دوطرفه دورافت صفر کم را در دور افت‌های نزدیک و رویدادهای بازتابی در زمان‌های دوطرفه دورافت صفر زیاد را در دورافت‌های دور می‌پوشانند؛ که باعث افت کیفیت داده‌های لرزه‌ای بازتابی و پوشیده شدن آن‌ها می‌شود (ایکله و آموندسن، ۲۰۰۵؛ چن و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، قبل از هر فرایند پردازشی باید این نوفه‌ها را تضعیف نمود. روش‌های متفاوتی برای تضعیف نوفه زمین‌غلت معرفی شده است. نوفه زمین‌غلت را می‌توان با استفاده از طراحی آرایه‌های مخصوص در حین برداشت داده تضعیف نمود (کردسن و همکاران، ۲۰۰۰). البته با وجود طراحی آرایه‌ها، همچنان مقدار قابل توجهی نوفه زمین‌غلت در داده‌های برداشت شده باقی می‌ماند؛ که باید در مرحله پردازش آن‌ها را تضعیف نمود. با توجه به خصوصیتی که برای نوفه زمین‌غلت بیان شد، می‌توان این نوفه را در حوزه زمان، فرکانس یا زمان-فرکانس تضعیف نمود (ایلماز، ۲۰۰۱؛ ایکله و آموندسن، ۲۰۰۵). حوزه فرکانس-عدد موج متداول‌ترین، حوزه برای تضعیف نوفه زمین‌غلت است. استفاده از فیلتر $f-k$ از جمله روش‌های پرکاربرد تضعیف نوفه زمین‌غلت است (ایلماز، ۲۰۰۱). با توجه به این‌که امواج زمین‌غلت دارای باند فرکانسی تقریباً متفاوتی از داده‌های بازتابی است، لذا به راحتی با استفاده از یک فیلتر باندگذر، می‌توان آن را تضعیف نمود. البته در پاره‌ای از موارد، این نوفه دارای همپوشانی باند فرکانسی با داده لرزه‌ای بازتابی است و لذا استفاده از یک فیلتر ساده فرکانسی باندگذر نمی‌تواند در تضعیف آن مؤثر باشد. امواج زمین‌غلت به دلیل سرعت متفاوت با رویدادهای بازتابی در حوزه $f-k$ در ناحیه‌ای متفاوت از رویدادهای بازتابی قرار می‌گیرند و می‌توان با حذف ناحیه مذکور امواج زمین‌غلت را تضعیف نمود (چن و همکاران، ۲۰۱۵؛ گادالا و فیشر، ۲۰۰۵؛ ایلماز، ۲۰۰۱). بسیاری از روش‌های متداول تضعیف نوفه زمین‌غلت مبتنی بر تبدیل‌های رادون (راسل و همکاران، ۱۹۹۰؛ هو و همکاران، ۲۰۱۶)، $\tau-p$ (تاتهام و

همکاران، ۱۹۸۳) و تبدیل ردلرزه شعاعی (هنلی، ۲۰۰۳) می‌باشند. یکی دیگر از ابزارهای پرکاربرد در تضعیف نوفه زمین‌غلت، استفاده از تجزیه مقادیر تکین (Singular Value Decomposition) است (کندال و همکاران، ۲۰۰۵؛ پورسانی و همکاران، ۲۰۱۰؛ لو، ۲۰۰۶). در اغلب این روش‌ها، خاصیت ناپایا بودن داده‌های لرزه‌ای (ایلماز، ۲۰۰۱) را در نظر نمی‌گرفتند و محتوای فرکانسی موجب چشمه لرزه‌ای را در تمام ردلرزه ثابت فرض می‌کردند. محتوای فرکانسی موجب چشمه لرزه‌ای به دلیل خاصیت ذاتی زمین در حین انتشار درون زمین در حال تغییر است. به منظور بهبود نتایج تضعیف نوفه زمین‌غلت، روش‌هایی مبتنی بر تبدیل‌های زمان-فرکانس که ابزار مناسبی برای تحلیل سیگنال‌های ناپایا می‌باشند (بوآشاش، ۲۰۱۵) معرفی شدند که خاصیت ناپایا بودن داده‌های لرزه‌ای در نظر می‌گرفتند (دیفان و واتس، ۱۹۹۷؛ کورسو و همکاران، ۲۰۰۳؛ کارسلی و بایراک، ۲۰۰۸؛ عسکری و سپاه‌کوهی، ۲۰۰۸؛ نیلمانی و همکاران، ۲۰۰۸؛ بکارا و همکاران، ۲۰۰۹؛ البوت و همکاران، ۲۰۱۰؛ حسینی و همکاران، ۲۰۱۵؛ آلمیدا و همکاران، ۲۰۱۵؛ چن، ۲۰۱۶). در تمام تحقیقات اشاره شده فوق، با استفاده از خواص ذاتی نوفه زمین‌غلت، این نوفه از امواج بازتابی در حوزه زمان-فرکانس تفکیک شده و با حذف آن، ردلرزه یا رکورد چشمه مشترک نوفه‌زدا شده به دست می‌آید. یکی از ابزارهای جدید که برای تحلیل و تجزیه سیگنال‌های ناپایا معرفی شده تجزیه مُد متغیر (Variational Mode Decomposition: VMD) (دراگو میرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴) است؛ که همانند تجزیه مُد تجربی (Empirical Mode Decomposition: EMD) (هوانگ و وو، ۲۰۰۸)، سیگنال را به یکسری توابع مُد ذاتی تجزیه می‌کند. تجزیه مُد متغیر بر خلاف تجزیه مُد تجربی در مقابل نوفه پایدارتر است و تجزیه سیگنال را بر اساس روابط منطقی ریاضی و نه به صورت کیفی و تجربی انجام می‌دهد. لیو و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از تجزیه مُد متغیر توانستند امواج زمین‌غلت را تضعیف نمایند. در این مقاله، ابتدا ردلرزه حاوی نوفه زمین‌غلت با استفاده از تجزیه مُد متغیر بر اساس روش لیو و همکاران (۲۰۱۵)، به توابع مُد ذاتی تجزیه می‌شود و سپس نمایش زمان-فرکانس آن با استفاده از تبدیل هیلبرت توابع مُد ذاتی به دست می‌آید. در مرحله بعد با استفاده از فیلتر طراحی شده در حوزه زمان-فرکانس، مؤلفه‌های مرتبط با نوفه زمین‌غلت تضعیف و با برگردان نمایش زمان-فرکانس فیلتر شده به حوزه زمان، ردلرزه نوفه‌زدا شده به دست می‌آید. در نهایت کارآیی روش پیشنهادی با روش متداول $f-k$ در داده مصنوعی و واقعی مقایسه می‌گردد و مزایا و معایب آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- تجزیه مُد متغیر (VMD) و نمایش زمان-فرکانس

تجزیه مد تجربی (EMD) روشی تجربی برای تجزیه یک سیگنال به

هستند؛ به عبارت دیگر، طیف هر یک از توابع مد ذاتی باید حول یک فرکانس مرکزی متمرکز باشد. در عین حال، سیگنال اولیه باید از توابع مد ذاتی حاصل از تجزیه مد متغیر قابل بازیابی باشد. برای یک سیگنال مانند $x(t)$ محاسبه توابع مد ذاتی $u_k(t)$ با فرکانس مرکزی ω_k از طریق حل یک مسئله بهینه‌سازی به صورت رابطه (۱) انجام می‌پذیرد (آنیس و همکاران، ۲۰۱۵):

$$\min_{u_k, \omega_k} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_k u_k(t) = x(t)$$

دراگومیرتسکی و زوسو (۲۰۱۴) برای در نظر گرفتن شرط بازسازی از دو تابع جزای درجه دو (quadratic penalty term) و افزایشنده لاگرانژی (Lagrangian multipliers) به صورت همزمان استفاده کردند. به طور خلاصه الگوریتم روش تجزیه مد متغیر برای یک سیگنال مانند سیگنال $x(t)$ به صورت شکل ۱ است (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴؛ موهانتی و همکاران، ۲۰۱۴).

تعدادی متناهی از توابع نوسانی که دارای تبدیل هیلبرت خوش رفتار هستند، است (هوانگ و همکاران، ۱۹۹۸). این توابع نوسانی توابع مد ذاتی (Intrinsic Mode Functions (IMF)) نامیده می‌شوند. به دلیل توانایی تجزیه مد تجربی در نشان دادن تغییرات زمان کوتاه برحسب فرکانس که از طریق آنالیز طیفی فوری قابل دسترسی نیست، می‌توان از آن برای آنالیز سیگنال‌های غیرخطی و ناپایا استفاده نمود؛ اما توابع مد ذاتی حاصل از تجزیه مد تجربی مبتنی بر فرضیه باند محدود فرکانسی نمی‌باشند (موهانتی و همکاران، ۲۰۱۴). به همین دلیل امکان جداسازی دو مؤلفه مجزا با باند فرکانسی نزدیک به هم در روش تجزیه مد تجربی وجود ندارد. همچنین این روش برای محاسبه توابع مد ذاتی به صورت بازگشتی عمل می‌کند؛ به عبارت دیگر هر کدام از توابع مد ذاتی به صورت جداگانه محاسبه می‌شوند؛ که باعث کاهش کارایی روش تجزیه مد تجربی می‌گردد. همچنین روش تجزیه مد تجربی در مواجهه با نوفه پایداری چندانی ندارد. برای رفع مشکلات مذکور، روش تجزیه مد متغیر ارائه شد (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴). الگوریتم روش تجزیه مد متغیر به گونه‌ای است که توابع مد ذاتی به صورت همزمان محاسبه می‌شوند و به همین دلیل از کارایی بهتری نسبت به تجزیه مد تجربی برخوردارند. در واقع هدف از تجزیه مد متغیر، تجزیه یک سیگنال حقیقی به مدهایی است که دارای خاصیت تنکی در طیف فرکانسی

```

Initialize  $\hat{u}_k^1, \omega_k^1, \hat{\lambda}^1, n \leftarrow 0$ 
repeat
   $n \leftarrow n + 1$ 
  for  $k = 1 : K$  do
    Update  $\hat{u}_k$  for all  $\omega \geq 0$ :
      
$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) \leftarrow \frac{\hat{x}(\omega) - \sum_{i < k} \hat{u}_i^{n+1}(\omega) - \sum_{i > k} \hat{u}_i^n(\omega) + \frac{\hat{\lambda}^n(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k^n)^2}$$

    Update  $\omega_k$ :
      
$$\omega_k^{n+1} \leftarrow \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}$$

  end for
  Dual ascent for all  $\omega \geq 0$ 
  
$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left( \hat{x}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right)$$

  
$$\frac{\sum_k \|\hat{u}_k^{n+1}(\omega) - \hat{u}_k^n(\omega)\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n(\omega)\|_2^2} < \varepsilon$$

until convergence:

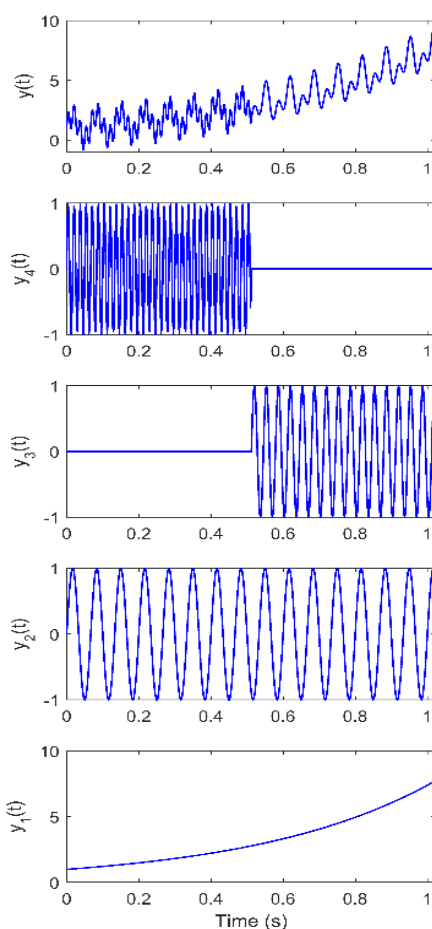
```

شکل ۱: الگوریتم محاسبه توابع مد ذاتی و فرکانس مرکزی آن‌ها با استفاده از حل مسئله بهینه‌سازی رابطه (۱).

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) + y_4(t)$$

$$\begin{cases} y_1(t) = e^t, & t \in [0, 1.022] \\ y_2(t) = \sin(30\pi t), & t \in [0, 1.022] \\ y_3(t) = \begin{cases} 0 & t \in [0, 0.51] \\ \sin(60\pi t) & t \in [0.51, 1.022] \end{cases} \\ y_4(t) = \begin{cases} \sin(120\pi t) & t \in [0, 0.51] \\ 0 & t \in [0.51, 1.022] \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

که $\bullet$ نشان‌دهنده تبدیل فوریه، α پارامتر تعادل برای بازسازی درست سیگنال، λ افزاینده لاگرانژی به منظور اعمال شرط بازسازی، τ گام زمانی در مرحله صعود دوگانه (Dual ascent)، K تعداد توابع مد ذاتی و ε مقدار خطای قابل قبول برای شرط توقف است. به منظور بررسی کارایی روش تجزیه مد متغیر در تجزیه یک سیگنال به توابع مد ذاتی، یک سیگنال مصنوعی به صورت حاصل جمع چهار سیگنال با محتوای فرکانسی متفاوت مطابق رابطه (۲) تولید گردید که در شکل ۲ سیگنال‌های اولیه و سیگنال حاصل از جمع آن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲: سیگنال مصنوعی $y(t)$ تولید شده از چهار مؤلفه $y_1(t)$ ، $y_2(t)$ ، $y_3(t)$ و $y_4(t)$.

زمان-فرکانس حاصل از اعمال روش هیلبرت-هوانگ (هوانگ و وو، ۲۰۰۸؛ هوانگ، ۲۰۱۴) از دقت و قدرت تفکیک بیشتری برخوردار باشد. در روش هیلبرت-هوانگ، نمایش زمان-فرکانس با استفاده از جانمایی دامنه و فاز حاصل از تبدیل هیلبرت در هر لحظه زمانی با توجه به فرکانس لحظه‌ای مربوطه، به دست می‌آید. در شکل ۴ نمایش زمان-فرکانس حاصل از اعمال روش هیلبرت-هوانگ بر روی توابع مد ذاتی هر دو روش نشان داده شده است. همان‌طور که

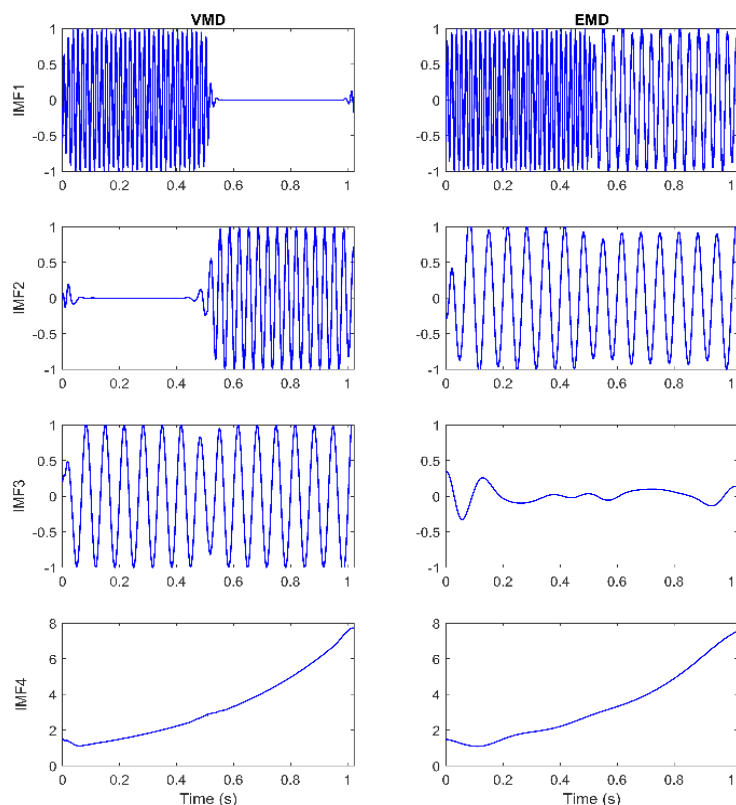
در ادامه الگوریتم تجزیه مد متغیر و تجزیه مد تجربی بر روی سیگنال مصنوعی $y(t)$ اعمال و توابع مد ذاتی آن محاسبه گردید که در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش تجزیه مد متغیر بر خلاف روش تجزیه مد تجربی تفکیک مؤلفه‌های فرکانسی مختلف را بهتر انجام داده و نتایج به مؤلفه‌های اصلی سازنده سیگنال مصنوعی نزدیک‌تر است؛ بنابراین، می‌توان انتظار داشت که نمایش

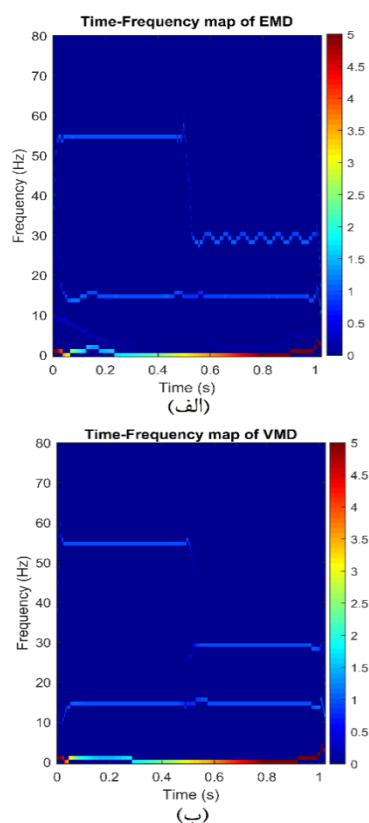
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۲، ۱۳۹۶.

توجه به رابطه (۲) و مؤلفه‌های سازنده سیگنال $y(t)$ منطقی‌تر است.

مشاهده می‌شود، نمایش زمان-فرکانس حاصل از تجزیه مد متغیر با



شکل ۳: توابع مد ذاتی برای سیگنال $y(t)$ با استفاده از دو روش تجزیه مد متغیر (ستون چپ) و تجزیه مد تجربی (ستون راست).



شکل ۴: نمایش زمان-فرکانس به دست آمده از اعمال الگوریتم هیلبرت-هوانگ بر روی (الف) توابع مد ذاتی حاصل از تجزیه مد تجربی و (ب)

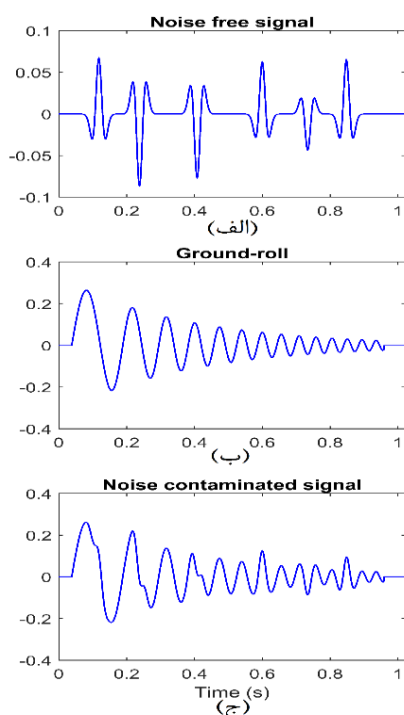
۳- روش تحقیق

استفاده از نمایش زمان-فرکانس و فیلترهای طراحی شده در این حوزه یک ابزار مناسب برای تضعیف نوفه زمین‌غلت است (عسکری و سیاه‌کوهی، ۲۰۰۸). در این مقاله، بر اساس مشخصات نوفه زمین‌غلت و تفاوت‌های بنیادین آن با سیگنال لرزه‌ای بازتابی، فیلتری طراحی شده که در حوزه زمان-فرکانس، ناحیه مربوط به نوفه زمین‌غلت را تضعیف می‌نماید و سیگنال نوفه‌زدا شده با تبدیل معکوس زمان-فرکانس در حوزه زمان بازیابی می‌شود. در این مقاله، فیلتر مطابق رابطه (۳) طراحی می‌شود و بر روی طیف زمان-فرکانس سیگنال که از تجزیه مد متغیر به دست آمده؛ اعمال می‌گردد. این فیلتر به گونه‌ای طراحی می‌شود که بر اساس فرکانس لحظه‌ای و پهنای باند فرکانسی لحظه‌ای، محدوده مربوط به سیگنال بازتابی را در طیف زمان-فرکانس سیگنال آغشته به نوفه شناسایی و سایر قسمت‌ها را تضعیف می‌نماید (لیو و همکاران، ۲۰۱۵).

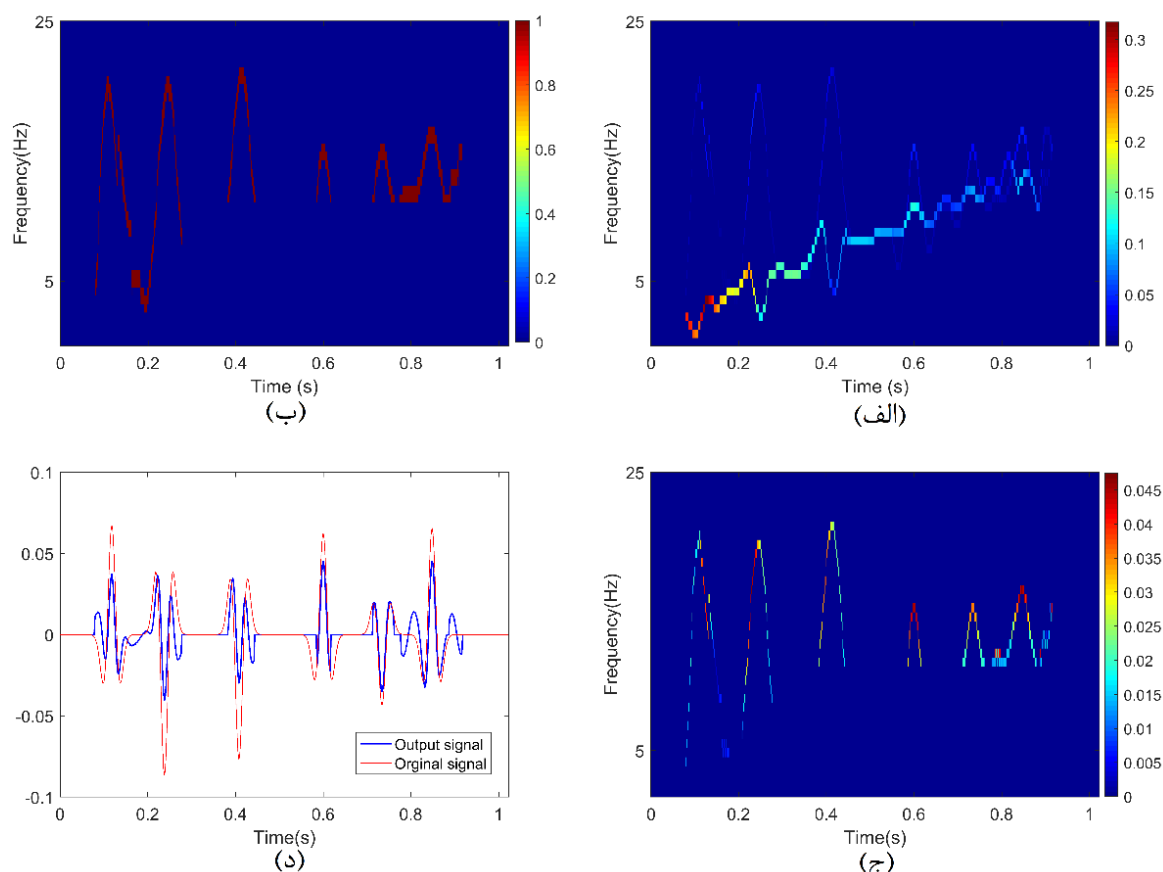
$$H(t, f) = \begin{cases} 1 & f \in \left[f_i(t) - \frac{b_i(t)}{2}, f_i(t) + \frac{b_i(t)}{2} \right] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

به منظور درک بهتر روش و فیلتر طراحی شده، یک ردلرزه مصنوعی حاصل از یک سری بازتاب دلخواه و موجک ریکر (Ricker) با فرکانس غالب ۲۰ هرتز تولید گردید و با نوفه زمین‌غلت مصنوعی (سیگنال چیرپ (chirp) صعودی از فرکانس ۵ هرتز تا ۲۵ هرتز با دامنه کاهشی) آغشته شد؛ که در شکل ۵ نشان داده شده است.

به منظور تضعیف نوفه زمین‌غلت در ردلرزه شکل (۵-ج)، ابتدا ردلرزه مذکور توسط روش تجزیه مد متغیر به مؤلفه‌های سازنده‌اش تجزیه می‌شود و در مرحله بعد طیف زمان-فرکانس آن تولید می‌شود؛ که در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. فیلتر طراحی شده مطابق رابطه (۳) در شکل (۶-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فیلتر مذکور در مناطقی از صفحه زمان-فرکانس که انرژی سیگنال‌های بازتابی قرار دارند، دارای مقدار یک و در سایر مناطق دارای مقدار صفر است. چنانچه فیلتر مذکور بر روی طیف زمان-فرکانس سیگنال آغشته به نوفه اعمال گردد، طیف حاصل فقط دارای انرژی‌های بازتابی خواهد بود؛ که در شکل (۶-ج) نشان داده شده است. حال می‌توان با برگردان طیف زمان-فرکانس فیلتر شده به حوزه زمان، ردلرزه نوفه‌زدا شده را به دست آورد؛ که در شکل (۶-د) به همراه ردلرزه اولیه بدون نوفه زمین‌غلت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی تا حد زیادی توانسته نوفه زمین‌غلت را از ردلرزه آغشته به نوفه تضعیف نماید. با این وجود، بخشی از دامنه سیگنال به دلیل همپوشانی باند فرکانسی میان نوفه و سیگنال بازتابی، هنگام اعمال فیلتر تضعیف می‌شود. برای رفع این مشکل می‌توان از سایر خصوصیات نوفه زمین‌غلت استفاده نمود؛ تا جدایش فقط به واسطه فرکانس نباشد و یا از حوزه‌های دیگری به غیر از زمان-مکان مانند ردلرزه شعاعی استفاده نمود؛ که باند فرکانسی نوفه و سیگنال همپوشانی کمتری داشته باشند.



شکل ۵: (الف) ردلرزه مصنوعی بدون نوفه زمین‌غلت، (ب) نوفه زمین‌غلت و (ج) ردلرزه آغشته به نوفه زمین‌غلت.



شکل ۶: (الف) طیف زمان-فرکانس سیگنال آغشته به نوفه زمین‌غلت نشان داده شده در شکل ۵- (ج)، (ب) طیف زمان-فرکانس فیلتر طراحی شده مطابق رابطه (۳)، (ج) طیف زمان-فرکانس فیلتر شده و (د) ردلرزه نوفه‌زدا شده (قرمز) در مقایسه با ردلرزه اولیه بدون نوفه زمین‌غلت (آبی).

که تأثیر نوفه زمین‌غلت را نشان می‌دهد. روش پیشنهادی به صورت ردلرزه به ردلرزه بر روی ردلرزه‌های رکورد چشمه مشترک به منظور تضعیف نوفه زمین‌غلت اعمال گردید و نتایج مربوط به آن در شکل ۹- (الف) نشان داده شده است. به منظور مقایسه بهتر، طیف $f-k$ مربوط به رکورد فیلتر شده و همچنین طیف دامنه دو ردلرزه شماره ۸ و ۳۵ نیز در شکل ۹ رسم شده‌اند؛ که مقایسه میان آن‌ها و داده خام اولیه، حاکی از موفقیت روش پیشنهادی در تضعیف نوفه زمین‌غلت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طیف $f-k$ دیگر اثر چندانی از مؤلفه‌های با سرعت و شیب کم وجود ندارد و همچنین طیف دامنه ردلرزه شماره ۸ دیگر مؤلفه‌های فرکانس پایین و با دامنه بزرگ قابل توجهی وجود ندارد. البته به دلیل اعمال فرایند تقویت دامنه خودکار (AGC)، تغییرات جزئی در طیف دامنه ردلرزه شماره ۳۵ نیز مشاهده می‌شود.

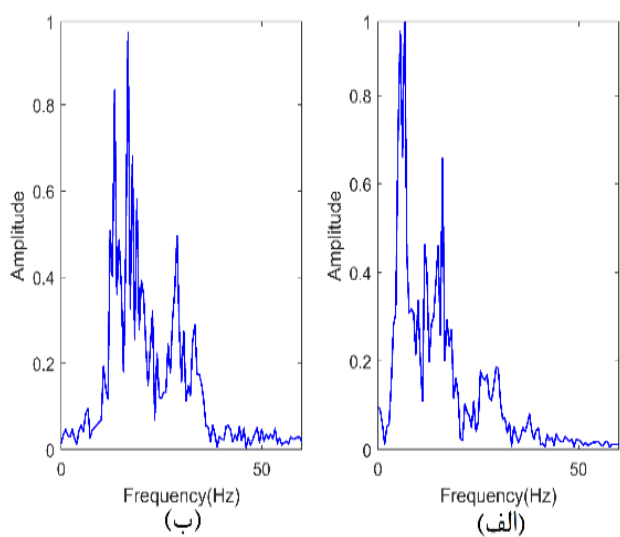
به منظور مقایسه روش پیشنهادی در این مقاله، نتایج آن با یک روش متداول تضعیف نوفه زمین‌غلت که فیلتر $f-k$ است، مقایسه شد. در شکل ۱۰ نتایج مربوط به فیلتر $f-k$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این روش علاوه بر تضعیف نوفه

۴- اعمال روش بر روی داده‌های واقعی

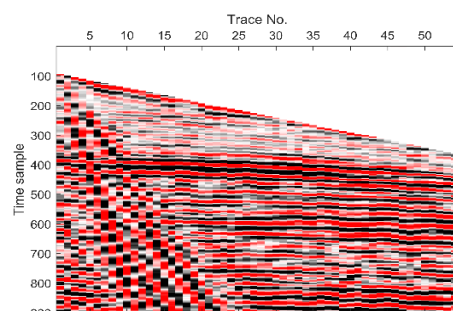
به منظور بررسی کارایی الگوریتم معرفی شده برای تضعیف نوفه‌های همدوس زمین‌غلت، روش مورد نظر روی داده‌های صحرایی اعمال می‌شود.

داده‌های مذکور نظر قسمتی از داده‌های صحرایی (رکورد چشمه مشترک) ارائه شده به عنوان مثال به همراه نرم‌افزار VISTA است؛ که شامل ۵۴ ردلرزه با فاصله ۲۵ متر جدایش و گام نمونه‌برداری ۰/۰۰۲ ثانیه است؛ که در شکل ۷- (الف) نشان داده شده است. در شکل ۷- (ب) طیف $f-k$ مربوط به رکورد چشمه مشترک مذکور نشان داده شده؛ که موقعیت نوفه زمین‌غلت در طیف $f-k$ با مثلث‌های سفیدرنگ در شکل مذکور نشان داده شده است. در رکورد مذکور امواج رسید مستقیم، حذف شده‌اند. همچنین دو ردلرزه شماره ۸ (آغشته به نوفه زمین‌غلت) و ۳۵ (بدون نوفه زمین‌غلت) انتخاب شده و طیف دامنه آن‌ها محاسبه شده؛ که در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طیف دامنه مربوط به ردلرزه شماره ۸ دارای مؤلفه‌هایی با فرکانس کم و دامنه بزرگ است؛

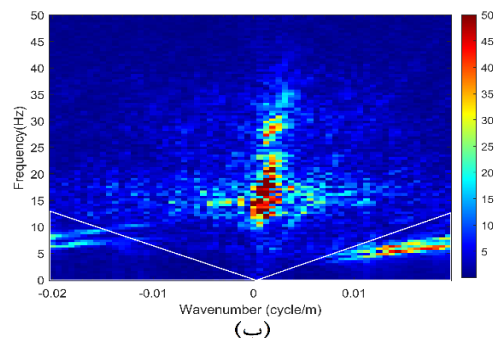
خلیل طهماسبی و همکاران، تضعیف نوفه‌های زمین‌غلت در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تجزیه مد متغیر، صفحات ۱۸۸-۱۷۷.
زمین‌غلت به سیگنال‌های بازتابی نیز آسیب وارد شده که این موضوع در روش پیشنهادی در این مقاله وجود ندارد.



شکل ۸: (الف) طیف دامنه ردلرزه شماره ۸ و (ب) طیف دامنه ردلرزه شماره ۳۵.

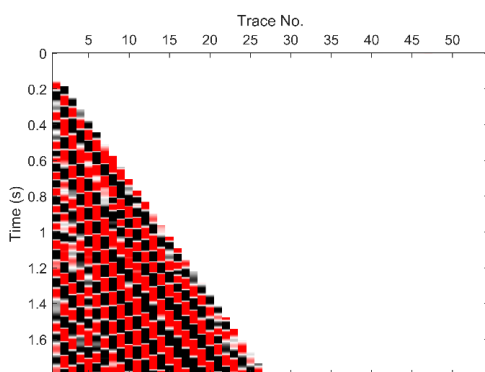


(الف)

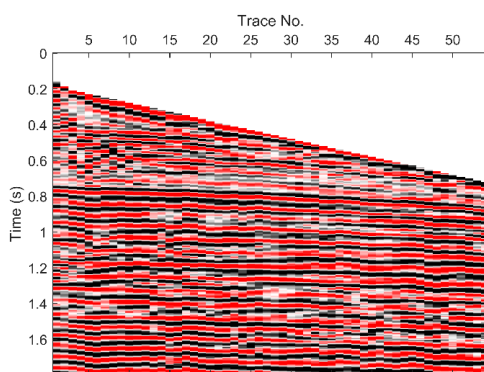


(ب)

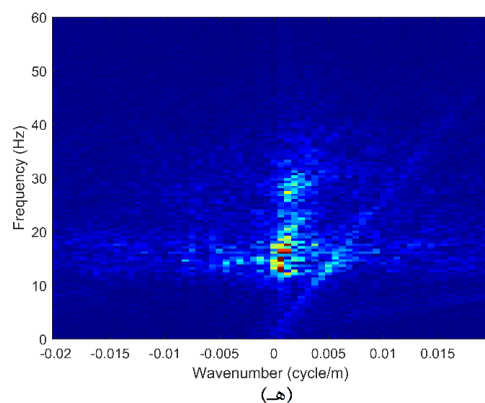
شکل ۷: (الف) رکورد چشمه مشترک واقعی و (ب) طیف f-k مربوط به آن.



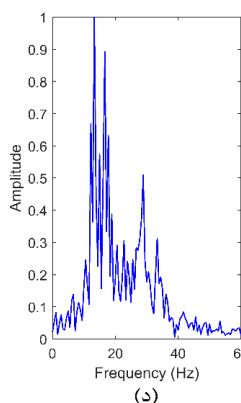
(ب)



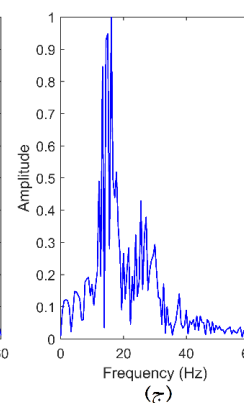
(الف)



(هـ)

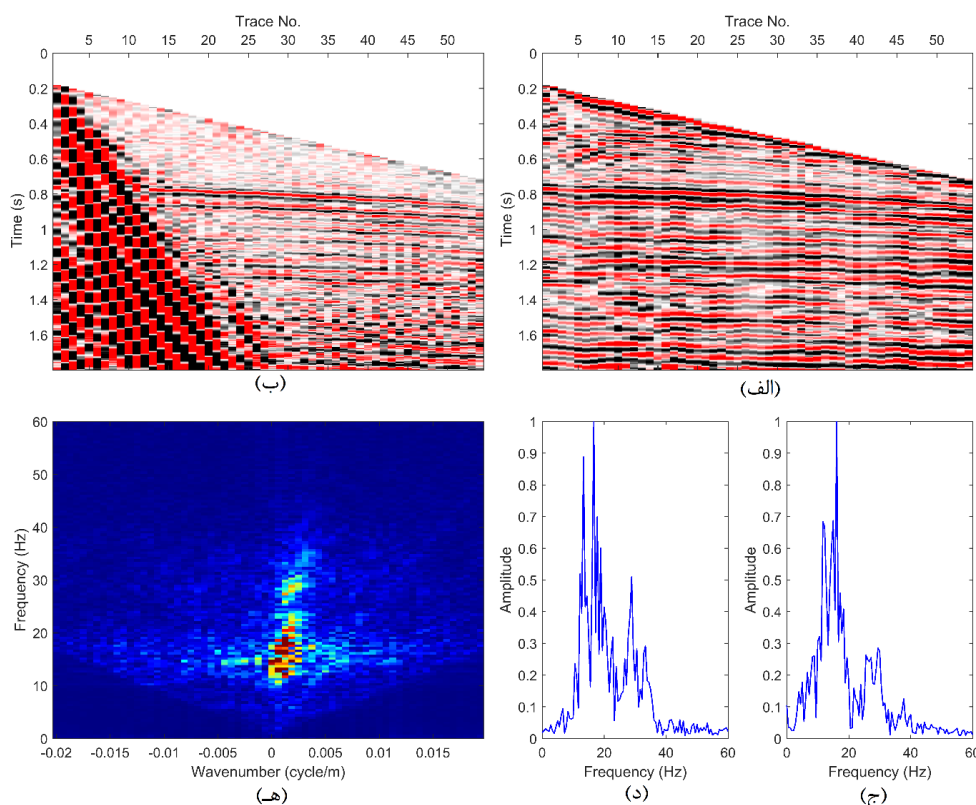


(د)



(ج)

شکل ۹: (الف) رکورد چشمه مشترک فیلتر شده با روش تجزیه مد متغیر، (ب) نوفه زمین‌غلت تضعیف شده از رکورد چشمه مشترک، طیف دامنه (ج).



شکل ۱۰: (الف) رکورد چشمه مشترک فیلتر شده با روش $f-k$ ، (ب) نوفه زمین‌غلت تضعیف شده از رکورد چشمه مشترک، طیف دامنه (ج) ردلرزه شماره ۸ و (د) ردلرزه شماره ۳۵ و (ه) طیف $f-k$ مربوط به رکورد چشمه مشترک فیلتر شده.

2015, Performance comparison of variational mode decomposition over empirical wavelet transform for the classification of power quality disturbances using support vector machine, *Procedia Computer Science*, 46, 372-380.

Askari, R. and Siahkoobi, H.R., 2008, Ground roll attenuation using the S and X-F-K transforms, *Geophysical Prospecting*, 56 (1), 105-114.

Bekara, M. and van der Baan, M., 2009, Random and coherent noise attenuation by empirical mode decomposition, *Geophysics*, 74 (5), V89-V98.

Boashash, B., 2015, Time-Frequency signal analysis and processing, A Comprehensive reference, Elsevier Science.

Chen, W., 2016, Sparsity-enabled ground-roll noise suppression using tunable Q Factor wavelet transform, 86th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, pp. 4674-4678.

Chen, Y., Jiao, S., Ma, J., Chen, H., Zhou, Y. and Gan, S., 2015, Ground-Roll noise attenuation using a simple and effective approach based on local band-limited orthogonalization, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12 (11), 2316-2320.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا دو روش تجزیه مد تجربی و تجزیه مد متغیر با هم مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تجزیه مد متغیر عملکرد بهتری نسبت به تجزیه مد تجربی در تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های سازنده دارد و هر مؤلفه به دست آمده از روش تجزیه مد متغیر علاوه بر تنک بودن حول یک فرکانس مرکزی مجزا متمرکز شده است. سپس از تجزیه مد متغیر برای محاسبه طیف زمان-فرکانس با قدرت تفکیک بالا استفاده شد. در نهایت برای تضعیف نوفه زمین‌غلت از یک فیلتر که در حوزه زمان-فرکانس طراحی می‌شود، استفاده گردید. نتیجه حاصل با نتایج روش متداول فیلتر $f-k$ مقایسه گردید که نشان داد روش پیشنهادی بر خلاف روش فیلتر $f-k$ با حداقل آسیب به سیگنال بازتابی، نوفه زمین‌غلت را تضعیف نموده است.

۶- منابع

Almeida, L.J., Manenti, R.R. and Porsani, M.J., 2015, Coherent noise attenuation using the wavelet transform on radial basis, 83th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, Aneesh, C., Kumar, S., Hisham, P. and Soman, K.,

- Ikelle, L.T. and Amundsen, L., 2005, Introduction to petroleum seismology, Society of Exploration Geophysicists.
- Karsli, H. and Bayrak, Y., 2008, Ground-Roll attenuation based on wiener filtering and benefits of time-frequency imaging, *The Leading Edge*, 27 (2), 206-209.
- Kendall, R., Jin, S., Ronen, S. and De Meersman, K., 2005, An SVD-Polarization filter for ground roll attenuation on multicomponent data: EAGE/SEG Research Workshop-Multicomponent Seismic-Past, Present and Future.
- Liu, W., Cao, S. and He, Y., 2015, Ground roll attenuation using variational mode decomposition, 77th EAGE Conference and Exhibition.
- Lu, W., 2006, Adaptive Noise attenuation of seismic images based on singular value decomposition and texture direction detection, *Journal of Geophysics and Engineering*, 3 (1), 28.
- Mohanty, S., Gupta, K.K. and Raju, K.S., 2014, Comparative Study Between VMD and EMD in Bearing Fault Diagnosis, 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), pp. 1-6.
- Neelamani, R., Baumstein, A.I., Gillard, D.G., Hadidi, M.T. and Soroka, W.L., 2008, Coherent and Random noise attenuation using the curvelet transform, *The Leading Edge*, 27 (2), 240-248.
- Porsani, M.J., Silva, M.G., Melo, P.E. and Ursin, B., 2010, SVD Filtering applied to ground-roll attenuation, *Journal of Geophysics and Engineering*, 7 (3), 284.
- Pujol, J., 2003, *Elastic Wave propagation and generation in seismology*, Cambridge University Press.
- Russell, B., Hampson, D. and Chun, J., 1990, Noise Elimination and the radon transform, Part 1, *The Leading Edge*, 9 (10), 18-23.
- Sheriff, R.E. and Geldart, L.P., 1995, *Exploration seismology*, Cambridge University Press.
- Tatham, R.H., Keeney, J.W. and Nojonen, I., 1983, Application of the Tau-P transform (Slant-Stack) in Processing seismic reflection data, *Exploration Geophysics*, 14 (3/4), 163-172.
- Yilmaz, Ö., 2001, *Seismic Data analysis*, Society of Exploration geophysicists.
- Cordson, A., Galbraith, M., Peirce, J. and Hardage, B.A., 2000, *Planning land 3-D Seismic surveys*, Society of Exploration Geophysicists.
- Corso, G., Kuhn, P., Lucena, L. and Thomé, Z., 2003, Seismic Ground roll time-frequency filtering using the gaussian wavelet transform: *Physica A, Statistical Mechanics and its Applications*, 318 (3), 551-561.
- Deighan, A.J. and Watts, D.R., 1997, Ground-Roll suppression using the wavelet transform, *Geophysics*, 62 (6), 1896-1903.
- Dragomiretskiy, K. and Zosso, D., 2014, Variational Mode decomposition, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 62 (3), 531-544.
- Elboth, T., Vik Presterud, I. and Hermansen, D., 2010, Time-Frequency seismic data De-Noising, *Geophysical Prospecting*, 58 (3), 441-453.
- Gadallah, M.R. and Fisher, R.L., 2005, *Applied Seismology: A Comprehensive guide to seismic theory and application*, PennWell.
- Henley, D.C., 2003, Coherent Noise attenuation in the radial trace domain, *Geophysics*, 68 (4), 1408-1416.
- Hosseini, S.A., Javaherian, A., Hassani, H., Torabi, S. and Sadri, M., 2015, Shearlet Transform in aliased ground roll attenuation and Its comparison with Fk filtering and curvelet transform, *Journal of Geophysics and Engineering*, 12 (3), 351.
- Hu, Y., Wang, L., Cheng, F., Luo, Y., Shen, C. and Mi, B., 2016, Ground-roll noise extraction and suppression using high-resolution linear radon transform, *Journal of Applied Geophysics*, 128, 8-17.
- Huang, N.E., 2014, *Hilbert-huang transform and its applications*. World Scientific, Vol. 16.
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C. and Liu, H.H. 1998, The Empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, pp. 903-995.
- Huang, N.E. and Wu, Z., 2008, A Review on hilbert-huang transform: method and its applications to geophysical studies, *Reviews of Geophysics*, 46 (2).



Ground-roll noise suppression by time-frequency filtering based on variational mode decomposition

Mehrdad Khalil Tahmasebi¹, Amin Roshandel Kahoo^{2*} and Ali Nejati Kalateh³

1- M.Sc. Student, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 9 December 2016; Accepted: 9 March 2017

Corresponding author: roshandel@shahroodut.ac.ir

Keywords

Reflection Seismic
Variational Mode Decomposition
Time-Frequency Map
Ground-Roll Waves

Extended Abstract

Summary

Seismic imaging is highly dependent on the quality of seismic data. Structural and stratigraphic interpretation of seismic sections that contain the least amount of noise is much easier. Reflection seismic data are often associated with noise. Coherent noise is a major category of noise that accompanies seismic data, and has the same trend in different seismic traces of the data. Ground roll is one of

the main coherent noises that has a low frequency, high amplitude and low velocity. Various methods, such as frequency filters and frequency-wavenumber filter, have been used for ground-roll attenuation. Different advantages and disadvantages are mentioned for each of the methods. In this paper, we have used time – frequency transform and variational mode decomposition to attenuate the ground-roll.

Introduction

Generally, seismic noises are divided into two categories: coherent and incoherent. Coherent noise attenuation has always been a serious challenge for seismic data processors. Ground-roll is the main type of coherent noise in seismic data and is characterized by dispersive wave, low frequency, high amplitude relative to other events of interest in land seismic surveys, and propagates along and near the surface of the earth and obscures useful information in seismic exploration. The ground-roll noise often masks the shallow reflections at near offset and deep reflections at far offset and must be attenuated before the succeeding processing procedure. Therefore, ground-roll removal is an essential part of land seismic data processing.

There have been many researches about eliminating ground-roll noise published in literature, and many authors have introduced various methods for handling the ground-roll noise problem. A most straightforward and commonly used method for suppressing the ground-roll noise is band-pass filtering. In many cases, ground-roll has significant amplitudes only at frequencies lower than the signal. In such cases, a simple frequency band-pass filter will provide suitable noise removal. In the case of the frequency overlap of primary reflections and ground-roll, the band-pass frequency filter either fails to attenuate all the ground-roll noise or removes much useful reflection energy. Dip filtering also known as f-k filtering, which is based on the 2D Fourier transform, is another commonly used technique to attenuate ground-roll. In the 2D Fourier transform of a seismic pre-stack gather, there is no a clear separation border between signal and noise region, consequently it leads to signal distortion. Radon, tau-p, and radial trace transforms have also been applied to ground-roll removal. Another widely used method to remove ground-roll noise from seismic data is singular value decomposition (SVD)-based method. Nevertheless, all of the above-mentioned approaches disagree with seismic data natural behavior because of stationary signal assumptions.

Several methods have been introduced that consider the non-stationary nature of seismic data. The time-frequency denoising algorithm is an effective method for handling noise problems. A high resolution time-frequency map can be very helpful in unwanted energy filtering in time-frequency domain. In this paper, we have used variational mode decomposition method to create a high resolution time-frequency map of seismic trace and ground-roll attenuation.

Methodology and Approaches

The goal of variational mode decomposition method is to decompose a real input signal, $x(t)$, into a number of modes

that have specific sparsity properties while each being band-limited about a center frequency, ω_k , and reproducing the input. Each intrinsic mode function, $u_k(t)$, can be calculated by solving an optimization problem as:

$$\min_{u_k, \omega_k} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_k u_k(t) = x(t)$$

Time-frequency filter has been widely used to attenuate the ground roll components. Based on the time-frequency map obtained from the variational mode decomposition of seismic data and instantaneous frequency, $f_i(t)$, and instantaneous bandwidth, $b_i(t)$, of seismic data, an effective time-frequency filter can be designed based on the difference between seismic signals and ground roll in time-frequency map as:

$$H(t, f) = \begin{cases} 1 & f \in \left[f_i(t) - \frac{b_i(t)}{2}, f_i(t) + \frac{b_i(t)}{2} \right] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

The de-noised seismic trace can be obtained by applying the above time-frequency filter on time-frequency map of seismic trace and transfer back the filtered time-frequency map to time domain.

Results and Conclusions

The proposed algorithm has been tested on a real seismic shot gather and the results have been compared to the results of applying frequency–wavenumber method on the seismic data. The obtained results show that the proposed method attenuates the ground-roll effectively while minimal harm to the reflected signal incurs. Hence, it can be an excellent alternative technique to attenuate the ground-roll noise.
