



تفکیک و بهبود جبهه موج با استفاده از تبدیل رادون خطی تنک

شهریار خاص احمدی^{۱*} و علی غلامی^۲

۱- کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۲۰؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۳۱

* نویسنده مسئول مکاتبات: sh.khasahmadi@ut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

همواره جدایش رخدادها از یکدیگر و همچنین جدایش نوفه از سیگنال یکی از اهداف مهم پردازش داده‌های لرزه‌ای بوده و تبدیل رادون یکی از ابزارهای مورد استفاده بدین منظور است. انواع مختلفی را می‌توان برای این تبدیل برشمرد؛ که از این بین در این مقاله به تبدیل رادون خطی به عنوان ابزاری مناسب در شناسایی و جداسازی امواج تخت پرداخته می‌شود. مهم‌ترین نکته در جداسازی امواج نوفه از سیگنال، بالا بودن قدرت تفکیک در حوزه رادون است؛ اما تبدیل رادون مرسوم به دلایلی از جمله بازه محدود دچار وضوح کم و تفکیک‌پذیری ضعیف است. در این مقاله از منظم‌ساز نرم ۱ در حل مسئله رادون به عنوان یک مسئله وارون در به دست آوردن یک مدل تنک استفاده خواهد شد. سپس کاربرد این روش در تفکیک امواج بالا و پایین‌رونده در داده‌های نیم‌رخ لرزه‌ای قائم، حذف نوفه‌های تداخلی لرزه‌ای از داده‌های چشمه مشترک دریایی و در نهایت بهبود کیفیت داده‌های دورلرز با استفاده از داده‌های مصنوعی و واقعی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تبدیل رادون
تنکی
تفکیک‌پذیری بالا
جدایش امواج
نسبت سیگنال به نوفه

۱- مقدمه

تبدیل رادون از ابزارهای پردازش داده‌های لرزه‌ای است؛ که در سال‌های اخیر کاربردهای زیادی پیدا کرده است. این تبدیل با انتگرال‌گیری بر روی مسیرهای خطی، سهموی و یا هذلولی، داده‌های لرزه‌ای را از حوزه مکان-زمان به حوزه زمان-پارامتر پرتو تصویر می‌کند. اساس استفاده از این تبدیل تفکیک‌پذیری رخدادها از یکدیگر در این حوزه و افزایش کیفیت سیگنال پس از اعمال عکس تبدیل است؛ که این امر نیازمند حوزه رادونی با وضوح بالاست؛ اما تبدیل رادون مرسوم به دو دلیل عمده چنین حوزه رادونی را به دست نمی‌دهد. عملکرد این تبدیل برخلاف سایر تبدیل‌های مورد استفاده از قبیل تبدیل فوریه و یا تبدیل موجک متعامد نبوده و در نتیجه تصویر به حوزه مدل و برگرداندن آن به حوزه داده بدون از دست دادن دامنه امکان‌پذیر نیست. از طرفی، محدود بودن طول خط برداشت، گسسته بودن داده‌برداری، عدم وجود داده در برخی از گیرنده‌ها، گسسته بودن سرعت و زمان از جمله عواملی هستند که باعث وجود اثرات مصنوعی ناشی از دورافت‌های دور و نزدیک و همچنین دگرنامی می‌شوند و قدرت تفکیک حوزه رادون را کاهش می‌دهند (Trad et. al, 2003). در این مقاله به افزایش قدرت تفکیک و وضوح تبدیل رادون خطی به عنوان ابزاری جهت شناسایی و جداسازی جبهه موج‌های تخت پرداخته می‌شود.

تبدیل رادون خطی دامنه‌ها را در راستای یک خط با یکدیگر جمع می‌کند و بنابراین جبهه موج‌هایی با خاصیت خطی، مانند رکوردهای نیمرخ لرزه‌ای قائم، امواج سطحی مستقیم، امواج شکست مرزی و... در حوزه رادون خطی ایده‌آل به یک نقطه همگرا می‌شوند؛ اما همان‌طور که اشاره شد، تبدیل رادون مرسوم قدرت تفکیک و وضوح کمی دارد. به منظور بالا بردن وضوح حوزه رادون تاکنون روش‌های مختلفی ارائه شده است. نخستین بار Thorson and Claerbout (1985) با استفاده از منظم‌سازی در حوزه مکان-زمان یک تبدیل رادون با وضوح بالا را معرفی کردند. Sacchi and Ulrych (1995) با استفاده از تجزیه چلسکی موفق به دست آوردن تبدیل رادون تنگ در حوزه فرکانس شدند. Cary (1998) از روشی مشابه و با مقید کردن تنگی در راستاهای انحنا و زمان حوزه رادون تفکیک بالا را ارائه کرد. Sacchi and Porsani (1999) از گرادبان مزدوج در حوزه فرکانس به منظور حل سریع و تنگ تبدیل رادون سهموی بهره جستند. هرمن و همکاران (Herrmann et. al. (2000 نیز با به دست آوردن وزن‌های وابسته به فرکانس برای مدل، یک تبدیل رادون بدون دگرنامی را پیشنهاد کردند. محققان دیگری هم روش‌هایی را به منظور بهبود کیفیت حوزه رادون به کار برده‌اند (Wang and Ng, 2009) (Ng and Perz, 2004).

می‌توان مسئله رادون را یک مسئله وارون در نظر گرفت؛ که به دنبال مدل رادونی است که یک تابع هزینه را کمینه می‌کند. با توجه به نوع تابع هزینه می‌توان جمله مربوط به اختلاف داده مشاهده شده

و بازسازی شده و همچنین یک جمله منظم‌ساز مربوط به مدل را در آن تعریف کرد. به منظور به دست آوردن مدلی با کمترین ضرایب غیرصفر، منظم‌ساز نرم یک برای مدل مناسب خواهد بود؛ که در این مقاله از عملگر تقریب نرم یک و یک الگوریتم رفت و برگشت تکراری جهت حل مسئله رادون خطی به صورت تنگ استفاده خواهد شد.

کاربردهای مختلفی را می‌توان برای تبدیل رادون خطی برشمرد. از جمله این کاربردها، جداسازی جبهه موج‌های خطی از یکدیگر یا از سایر جبهه موج‌ها است. به عنوان مثال می‌توان به جداسازی امواج بالارونده و پایین‌رونده در داده‌های نیمرخ لرزه‌ای قائم (Hu and McMechan, 1987) (Moon et. al., 1986) و یا جداسازی نوفه‌های لرزه‌ای تداخلی که خود را به شکل رخدادهای خطی در داده‌های دریایی نشان می‌دهند؛ اشاره کرد (Elboth and Haouam, 2015).

در این مقاله ابتدا به تعریف مسئله تبدیل رادون خطی به عنوان یک مسئله وارون پرداخته می‌شود. سپس حل آن به صورت تنگ به منظور بالا بردن قدرت تفکیک حوزه رادون با استفاده از عملگرهای تقریب و یک الگوریتم رفت و برگشت تکراری بررسی می‌شود. در نهایت کاربرد تبدیل رادون خطی به دست آمده با وضوح بالا در جداسازی امواج بالا و پایین‌رونده در داده‌های نیمرخ لرزه‌ای قائم، جداسازی نوفه‌های تداخلی لرزه‌ای از داده‌های دریایی و همچنین بالا بردن نسبت سیگنال به نوفه در داده‌های دورلرز زمین‌لرزه با استفاده از داده‌های مصنوعی و واقعی نشان داده خواهد شد.

۲- تبدیل رادون خطی

تبدیل رادون خطی یک انتگرال‌گیری بر مسیرهای مستقیم است؛ که هر رخداد را با توجه به زمان رفت و برگشت در دورافت صفر و کندی که معرف شیب جبهه موج تخت مربوطه در حوزه مکان-زمان است، در زمان و کندی متناظرش در حوزه رادون به یک نقطه همگرا می‌کند. می‌توان رابطه‌های پیشرو و الحاقی آن را به صورت زیر نوشت (Sacchi, 2002):

$$v(p, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(h, t = \tau + hp) dh \quad (1)$$

$$\tilde{d}(h, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} v(p, \tau = t - hp) dp \quad (2)$$

که h دورافت، t زمان، τ زمان رفت و برگشت در دورافت صفر، p کندی، $d(h, t)$ داده و $v(p, \tau)$ حوزه رادون است؛ که پس از بازنویسی در حوزه فرکانس خواهد شد:

$$V(p, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} D(h, \omega) e^{j\omega ph} dh \quad (3)$$

$$D(h, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} V(p, \omega) e^{-j\omega ph} dp \quad (4)$$

نیست و کمینه کردن رابطه بالا ساده نخواهد بود. در این صورت

می‌توان از عملگر تقریب تابع $\|\cdot\|_1$ به منظور به دست آوردن جواب مورد نظر استفاده کرد (Combettes and Wajs, 2005).

اگر $prox_f$ بیانگر عملگر تقریب تابع f باشد و توابع $\|\cdot\|_1$ و $\|\cdot\|_2^2$

به صورت $f_1 = \|\cdot\|_1$ و $f_2 = \|\cdot\|_2^2$ تعریف شوند، با توجه به خاصیت نقطه ثابت می‌توان رابطه تکرار زیر را به منظور دستیابی به جواب داشت:

$$x_{n+1} = prox_{\gamma f_2}(x_n - \gamma_n \nabla f_1(x_n)) \quad (8)$$

که γ_n طول گام در مرحله n ام است. حال با توجه به توابع

f_1 و f_2 و رابطه (۷)، می‌توان رابطه (۸) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$m_{n+1} = prox_{f_2}(m_n + \gamma_n L^T (D - Lm_n)) \quad (9)$$

عملگر تقریب منظم‌ساز نرم ۱، آستانه‌گذاری نرم خواهد بود (Gholami and Hosseini, 2011). با توجه به روابط مطرح شده، می‌توان الگوریتم زیر را جهت حل مسئله و به دست آوردن مدل تنک تبدیل رادون خطی استفاده کرد (جدول ۱):

جدول ۱: الگوریتم رفت و برگشت تکراری جهت حل رابطه (۷).

While not converge do

$$u_{n+1} = m_n + \gamma_n L^T (D - Lm_n)$$

$$m_{n+1} = prox(u_{n+1}) = Soft - threshold(u_{n+1})$$

end

در شکل ۱-الف چند رخداد خطی با فرکانس‌های قالب متفاوت نشان داده شده است. در قسمت (ب) حوزه رادون آن به وسیله رابطه (۳) محاسبه شده است. همان‌طور که مشخص است اثرات مصنوعی ناشی از دورافت‌های دور و نزدیک به صورت پخش انرژی‌های افقی و اریب خود را نشان داده‌اند. در قسمت (ج) حوزه رادون تنک به دست آمده از الگوریتم معرفی شده آورده شده است. در این حالت تنها در زمان و کندی مربوط به هر رخداد تمرکز انرژی دیده می‌شود.

جداسازی رخدادهای خطی از یکدیگر به میزان تفکیک‌پذیری ضرایب در حوزه رادون بستگی دارد. به منظور بررسی کارایی روش معرفی شده در به دست آوردن حوزه رادون با وضوح بالا و جداسازی رخدادها از یکدیگر، با استفاده از یک مدل رادون که ضرایب آن در شیب‌های نزدیک به هم قرار گرفته‌اند (شکل ۲-الف)، رخدادهای متناظر در حوزه مکان-زمان به دست آمده‌اند (شکل ۲-ب).

همان‌طور که مشخص است، می‌توان تبدیل رادون را در حوزه فرکانس برای هر تک فرکانس به صورت جداگانه به دست آورد؛ که منجر به حل سریع‌تر آن خواهد شد. حل مستقیم رابطه‌های (۱) و (۳) به منظور به دست آوردن حوزه رادون، جوابی را به دست خواهد داد؛ که علاوه بر تمرکز انرژی در زمان و کندی متناظر با هر رخداد، دچار یک پخش‌شدگی افقی انرژی ناشی از دورافت‌های نزدیک و یک پخش‌شدگی اریب انرژی ناشی از دورافت‌های دور و همچنین اثرات مصنوعی ناشی از دگرنامی را نیز به همراه خواهد داشت و در نتیجه از وضوح و قدرت تفکیک کافی برخوردار نخواهد بود (Kabir and Marfurt, 1999). مسئله تبدیل رادون را می‌توان به صورت ماتریسی به شکل $D(f) = L(f)m(f)$ بازنویسی کرد که L عملگر پیشرو تبدیل رادون و L^T عملگر الحاقی آن خواهد بود (Sacchi, 2002):

$$L_{i,k} = e^{-j\omega h_i p_k} = \begin{bmatrix} e^{-j\omega h_1 p_1} & \dots & e^{-j\omega h_1 p_{np}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega h_{nh} p_1} & \dots & e^{-j\omega h_{nh} p_{np}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

محاسبه ضرایب رادون m از روی داده D مستلزم حل یک مسئله معکوس بد وضع است. به منظور پیدا کردن ضرایب مدل رادون باید یک تابع هزینه تعریف شود؛ که در صورت وجود نوفه گوسی می‌توان آن را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\hat{m} := \arg \min_m \|Lm - D\|_2^2 + \lambda R(m) \quad (6)$$

جمله اول این تابع، کنترل‌کننده میزان اختلاف داده باسازی شده از مدل رادون به دست آمده و داده مشاهده شده است. جمله دوم، بیان‌کننده قیدی است که بر روی ضرایب مدل اعمال می‌شود. در صورت انتخاب $\|\cdot\|_2^2$ به عنوان قید منظم‌ساز بر روی ضرایب مدل، جواب کمترین مربعات به دست خواهد آمد؛ که اگرچه اختلاف داده باسازی شده و مشاهده شده را به حداقل می‌رساند؛ اما به دلیل یکسان بودن ضریب میرایی در محاسبه تمامی ضرایب مدل، منجر به میرایی دامنه در حوزه رادون خواهد شد و قدرت تفکیک را بالا نخواهد برد (Sacchi and Ulrych, 1995). به منظور به دست آوردن یک حوزه رادون با کمترین ضرایب غیر صفر و با وضوح بالا، مدل تنک رادون، قید اعمال شده بر روی بردار مدل، منظم‌ساز نرم ۱ خواهد بود.

۱-۲- حل تنک تبدیل رادون

با استفاده از منظم‌ساز نرم یک به منظور دستیابی به حوزه رادونی با وضوح بالا و با توجه به رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$\hat{m} := \arg \min_m \|Lm - D\|_2^2 + \lambda \|m\|_1 \quad (7)$$

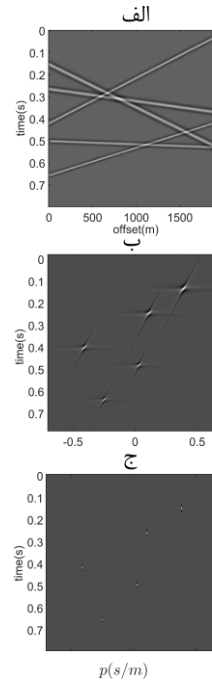
$\|\cdot\|_1^2$ یک تابع محدب و مشتق‌پذیر اما تابع $\|\cdot\|_1$ مشتق‌پذیر

۳- جداسازی امواج بالارونده و پایین‌رونده

امروزه در بسیاری از چاه‌ها برداشت‌های نیم‌رخ لرزه‌ای قائم (VSP) به منظور شناسایی محیط زیر سطح در حال انجام است. قرار دادن گیرنده‌ها در عمق تا حد زیادی بر مشکلات رایج در برداشت‌های لرزه‌ای سطحی مانند میرایی موج در لایه‌های هوازده و یا وجود نوفه‌های همدوست و غیر همدوست غلبه می‌کند؛ اما مشکلی که در داده‌های نیم‌رخ لرزه‌ای قائم وجود دارد تداخل و همپوشانی امواج بالا و پایین‌رونده است. هر کدام از جبهه موج‌های پایین و بالارونده حاوی اطلاعات زیرسطحی است؛ اما باید از یکدیگر جدا شوند. جداسازی این امواج از یکدیگر از گام‌های مهم پردازش این‌گونه داده‌هاست؛ که می‌تواند در مراحل بعدی تفسیر نیز به کار رود (Aki and Richards, 2002).

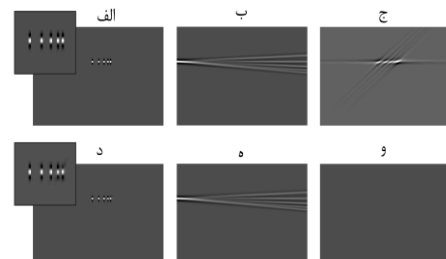
روش‌های مختلفی به منظور جدا کردن امواج VSP از یکدیگر به کار رفته‌اند (Aminzadeh, 1984) (Simaan and Love, 1984) (Stewart, 1985) (Gao et al., 2014) (1986) که شاید از این بین فیلتر مدیان تبدیل رادون بدین منظور استفاده می‌شود. پیش‌تر نیز به کاربرد این تبدیل در جداسازی امواج VSP اشاره شده است (Moon et al., 1986) اما این امر نیازمند روشی است که علاوه بر بازسازی کامل دامنه‌های امواج، قدرت تفکیک بالایی را نیز ارائه دهد. با اعمال عملگر پیشرو تبدیل رادون، از آنجائی که امواج بالا و پایین‌رونده شیب‌های مختلفی دارند، در ناحیه‌های جداگانه‌ای از حوزه رادون قرار می‌گیرند. اگر تفکیک ضرایب هر یک از این امواج به گونه‌ای باشد که جداسازی هر کدام آسیبی به دیگری نرساند، می‌توان با استفاده از یک پوش، ضرایب هر کدام از جبهه موج‌های بالا و یا پایین‌رونده را به صورت جداگانه به حوزه مکان-زمان برگرداند که بدین منظور از الگوریتم جدول ۱ استفاده خواهد شد.

ابتدا کاربرد الگوریتم بر روی داده مصنوعی بررسی می‌شود. با استفاده از یک مدل زمین‌شناسی چندلایه و مدل‌سازی پیشرو، داده مصنوعی نیم‌رخ لرزه‌ای قائم نشان داده شده در شکل ۳-الف به دست آمده است. همان‌طور که واضح است، امواج با یکدیگر همپوشانی دارند و علاوه بر رسیدهای اولیه، بازتاب‌های چندگانه نیز وجود دارند. با استفاده از روش مرسوم حوزه رادون به دست آمده و در قسمت (ب) آورده شده است. ضرایب رادون مربوط به امواج بالا و پایین‌رونده در شیب‌های مثبت و منفی قرار گرفته‌اند. با استفاده از الگوریتم معرفی شده، حوزه رادون تنگ محاسبه شده است که در آن اثرات مصنوعی ناشی از دگرنامی موجود در روش مرسوم دیده نمی‌شود (شکل ۳-ج). حال می‌توان به وسیله یک پوش، ضرایب دارای شیب مثبت و یا منفی را به صورت جداگانه با استفاده از عملگر الحاقی تبدیل رادون به حوزه مکان-زمان برگرداند. پس از بازسازی هر کدام از جبهه موج‌های بالا یا پایین‌رونده می‌توان با کم کردن آن از داده اولیه، دیگری را نیز به دست آورد. در قسمت (ه) امواج بالارونده و در

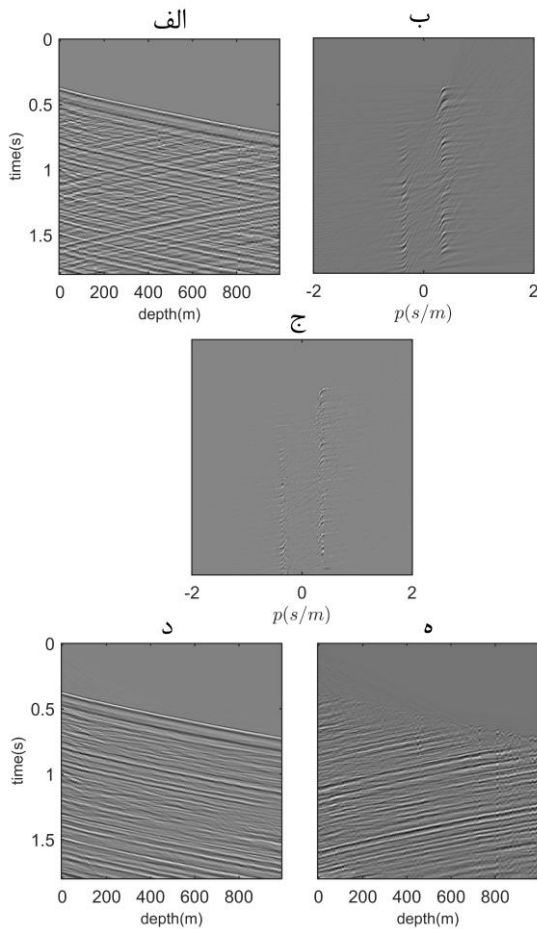


شکل ۱: حوزه رادون محاسبه شده از دو روش. الف) رخ داده‌های خطی با فرکانس‌های متفاوت. ب) حوزه رادون به دست آمده از حل مستقیم رابطه (۳). ج) با استفاده از الگوریتم جدول ۱.

شکل ۲-ج حوزه رادون به دست آمده از روش مرسوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، تفکیک رخ داده‌ها در حوزه رادون مرسوم به هیچ عنوان امکان‌پذیر نیست. حوزه رادون تنگ این داده با استفاده از روش مطرح شده به دست آمده و در شکل ۲-د آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل تخمین زده شده تا حد زیادی مشابه مدل اولیه بوده و ضرایب مربوط به هر رخداد به خوبی قابل تفکیک‌اند. در قسمت (و) نیز اختلاف داده محاسبه شده از اعمال الحاقی تبدیل رادون خطی بر مدل تنگ به دست آمده و داده حاصل از مدل اولیه آورده شده است؛ که نشان‌دهنده شباهت بسیار زیاد دو داده بازسازی شده است.



شکل ۲: مقایسه تفکیک‌پذیری در حوزه رادون. الف) ضرایب حوزه رادون اولیه. ب) داده محاسبه شده از قسمت (الف). ج) حوزه رادون مرسوم داده قسمت (ب). د) حوزه رادون تنگ به دست آمده به وسیله جدول ۱. ه) داده محاسبه شده از قسمت (د). و) اختلاف داده قسمت (ب) و (ه).

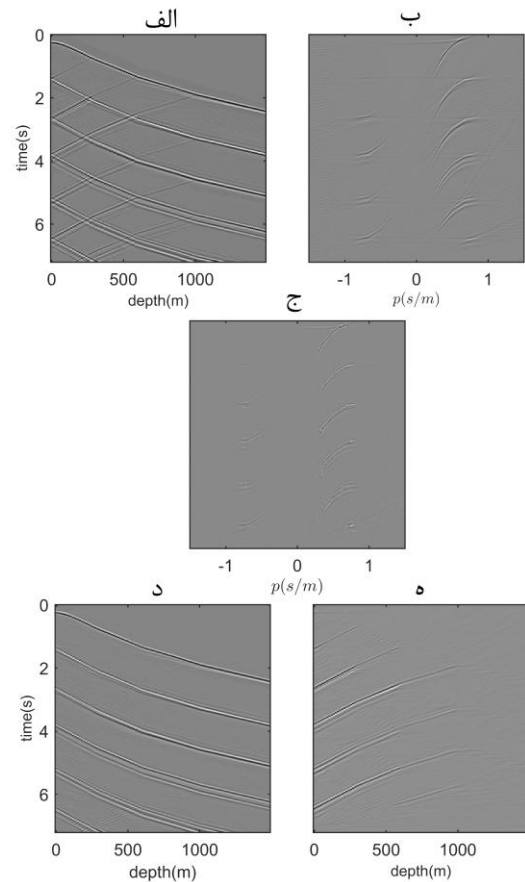


شکل ۴: جداسازی امواج در داده نیمرخ لرزه‌ای قائم واقعی. (الف) داده واقعی با فاصله نمونه‌برداری مکانی ۱۰ متر و زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه. (ب) حوزه رادون به دست آمده از روش معمول، (ج) از الگوریتم جدول ۱. (د) امواج پایین‌رونده (ه) امواج بالارونده.

۴- حذف نوفه‌های لرزه‌ای تداخلی

در داده‌های دریایی گاهی نوفه حاصل از عملیات برداشت کشتی مجاور خود را به صورت نوفه‌های تداخلی لرزه‌ای (Seismic Interference) در برداشت‌های چشمه مشترک نشان می‌دهند. برای زمان‌های بازتاب بیشتر از چند ثانیه زیر زمان کف آب، این نوفه‌های پراثری بر بازتاب‌های ضعیف همپوشانی می‌کنند؛ که باعث بروز مشکل در مراحل پردازش پیش از برهم‌انبارش مانند مهاجرت و یا تحلیل تغییرات دامنه با دورافت (AVO) می‌شوند. نوفه‌های لرزه‌ای تداخلی در برداشت‌های چشمه مشترک دریایی به صورت رخداد‌های هم‌مدوست با دامنه زیاد خود را نشان می‌دهند. در حالی که در مقاطع دورافت مشترک و یا گیرنده مشترک به صورت غیرهم‌مدوست خواهند بود. بسیاری از روش‌های رایج حذف این‌گونه نوفه‌ها بر مبنای غیرهم‌مدوست بودن نوفه تداخلی و استفاده از فیلتر پیشگو است (Gulunay and Pattberg, 2001). در این مقاله کاربرد تبدیل رادون با وضوح بالا در حذف نوفه‌های تداخلی بررسی می‌شود.

قسمت (د) امواج پایین‌رونده به دست آمده با استفاده از تبدیل رادون خطی با وضوح بالا آورده شده است.



شکل ۳: جداسازی امواج در داده نیمرخ لرزه‌ای قائم مصنوعی. (الف) داده مصنوعی ساخته شده از یک مدل چندلایه. (ب) حوزه رادون به دست آمده از روش معمول، (ج) از الگوریتم جدول ۱. (د) امواج پایین‌رونده. (ه) امواج بالارونده.

حال به منظور آزمایش روش مطرح شده بر روی یک داده واقعی، از یک داده واقعی با فاصله نمونه‌برداری مکانی ۱۰ متر و زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه که در شکل ۴-الف آورده شده است استفاده شده است. به منظور نمایش بهتر به دامنه‌ها وزن داده شده است. ابتدا حوزه رادون آن به وسیله روش مرسوم محاسبه شده و در قسمت (ب) نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود ضرایب مربوط به امواج بالا و پایین‌رونده در شیب‌های مثبت و منفی قرار گرفته‌اند اما همچنان در نزدیکی صفر تداخل ضرایب دیده می‌شود که مانع از جداسازی بهینه و حفظ دامنه امواج بازسازی شده خواهد شد. حوزه رادون تنک به دست آمده از روش مطرح شده در قسمت (ج) نشان داده شده است که در آن قدرت تفکیک تا حد زیادی افزایش یافته است و می‌توان به راحتی ضرایب مربوط به هر یک از جبهه موج‌ها را به حوزه مکان-زمان برگرداند. نتایج حاصل از جداسازی در قسمت‌های (د) و (ه) آورده شده‌اند.

۵- افزایش کیفیت داده‌های دورلرز

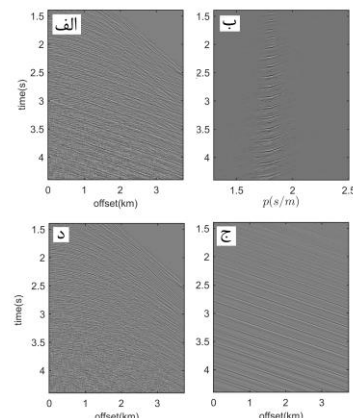
هنگام وقوع یک زلزله، جبهه موج تولید شده در عمق دارای انحنایی است؛ که تابعی از عمق و فاصله است. هرچه عمق چشمه بیشتر باشد این انحنا کمتر و جبهه موج به حالت تخت نزدیک‌تر خواهد شد و در نتیجه تقریب آن به وسیله مجموعه‌ای از جبهه موج‌های تخت دقیق‌تر خواهد بود و استفاده از تبدیل رادون خطی را ممکن می‌سازد. به طور کلی، می‌توان جبهه موج یک داده دورلرز را ترکیبی از انرژی‌های حاصل از چشمه، موج‌های دچار پراش و نوفه دانست که از این بین، تنها جبهه موج حاصل از چشمه ساختار تخت خواهد داشت. تبدیل رادون خطی رخدادهای دارای برون‌راند خطی را به خوبی در حوزه رادون تصویر می‌کند. در حالی که پراش‌ها و نوفه‌ها به صورت ضرایب کم‌دامنه و پخش خود را در حوزه رادون نشان می‌دهند (Wilson and Guiton, 2005). به دست آوردن حوزه رادون به عنوان یک مسئله وارون تنگ باعث کمینه کردن دامنه ضرایب اثرات مصنوعی ناشی از نوفه و حفظ دامنه‌های ضرایب پراش انرژی مربوط به سیگنال می‌شود و بازگشت به حوزه مکان-زمان تنها باعث بازسازی رخدادهای مورد نظر می‌شود (Trad et. al., 2003).

مشکل دیگری که در داده‌های دورلرز رایج است، برداشت تنگ و غیریکنواخت آن‌هاست؛ که به دلیل نبود یک آرایه برداشت چگال اتفاق می‌افتد. به کمک تبدیل رادون خطی و تعریف یک مختصات مکانی یکنواخت، می‌توان به هنگام برگشت به حوزه مکان-زمان داده را درون‌یابی کرد. این امر با اعمال یک پوش و وارد کردن تنها ردلرزه‌های موجود در حل مسئله وارون و برداشتن این پوش به هنگام اعمال عملگر الحاقی تبدیل رادون به منظور بازگشت به حوزه مکان-زمان صورت می‌گیرد.

در شکل ۶-الف قسمتی از یک داده دورلرز واقعی آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، رخدادهای خطی قابل مشاهده‌اند؛ اما وجود نوفه و جابه‌جایی زمانی در بعضی ایستگاه‌ها مانع از تشخیص دقیق زمان رسید امواج می‌شود. حوزه رادون قسمت (الف) با استفاده از حل مستقیم رابطه (۳) محاسبه و در شکل ۶-ب آورده شده است. در حوزه رادون شکل ۶-ب علاوه بر تمرکز انرژی مربوط به رخدادهای اصلی، به عنوان مثال رخداد موجود در زمان ۱/۵ ثانیه، پخش‌شدگی انرژی ناشی از نوفه‌ها و جابه‌جایی زمانی قابل مشاهده است. بدون در نظر گرفتن داده‌های نامرغوب در بعضی ایستگاه‌ها، با استفاده از یک پوش و اعمال قید تنگی بر مدل و با استفاده از الگوریتم تکراری رفت و برگشتی معرفی شده، حوزه رادون تنگ قسمت (الف) به دست آمده و در شکل ۶-ج آورده شده است. سپس بدون در نظر گرفتن پوش، حوزه رادون به دست آمده با استفاده از عملگر الحاقی تبدیل رادون خطی به حوزه مکان-زمان برگردانده شده است (شکل ۶-د). همان‌طور که مشخص است در داده بازسازی شده، جبهه موج‌های موجود به طور واضح مشخص‌اند و به راحتی و

در یک برداشت چشمه مشترک دریایی، بازتاب‌های ناشی از لایه‌های زیرین خود را به صورت رخدادهای هذلولی شکل نشان می‌دهند؛ در حالی که نوفه‌های تداخلی به شکل جبهه موج‌های تخت بر روی آن‌ها قرار می‌گیرند. با اعمال عملگر پسر و تبدیل رادون خطی بر روی داده، بیشینه تمرکز انرژی مربوط به رخدادهای خطی خواهد بود و رخداد هذلولی شکل به صورت پخش‌شدگی انرژی در حوزه رادون ظاهر خواهند شد. اعمال قید تنگی بر مسئله رادون خطی به منظور به دست آوردن حوزه رادون داده حاصل از برهم‌نهی جبهه موج‌های تخت و هذلولی شکل، باعث نگاه داشتن و تمرکز بیشتر ضرایب رادون رخدادهای خطی و حذف ضرایب مربوط به بازتاب‌های هذلولی شکل خواهد شد؛ بنابراین، می‌توان از مدل حاصل به منظور بازسازی جبهه موج‌های تخت ناشی از نوفه‌های تداخلی استفاده کرد و سپس با کم کردن داده بازسازی شده از داده اولیه به یک برداشت چشمه مشترک عاری از نوفه دست یافت.

در شکل ۵-الف قسمتی از یک برداشت چشمه مشترک واقعی با فاصله نمونه‌برداری مکانی ۱۲/۵ متر و زمانی ۰/۰۴ ثانیه آورده شده است. حضور نوفه‌های لرزه‌ای تداخلی، به شکل رخدادهای خطی، بر روی بازتاب‌های هذلولی شکل به خوبی مشخص است. با استفاده از الگوریتم جدول ۱ حوزه رادون خطی تنگ داده قسمت (الف) محاسبه و در شکل ۵-ب آورده شده است. تمرکز انرژی مشاهده شده مربوط به رخدادهای خطی موجود در داده بوده و پخش انرژی ناشی از بازتاب‌ها در حوزه رادون دیده نمی‌شوند. با اعمال عملگر الحاقی تبدیل رادون و برگرداندن ضرایب حوزه رادون به حوزه مکان-زمان می‌توان تنها جبهه موج‌های نوفه را بازسازی کرد (شکل ۵-ج). در نهایت با کم کردن نوفه‌های تداخلی بازسازی شده از داده اولیه، شکل ۵-د که تنها شامل بازتاب‌های هذلولی شکل است حاصل می‌شود.



شکل ۵: حذف نوفه‌های لرزه‌ای تداخلی. الف) برداشت چشمه مشترک واقعی دریایی آلوده به نوفه تداخلی. ب) حوزه رادون خطی تنگ به دست آمده از الگوریتم جدول ۱. ج) جبهه موج‌های تخت بازسازی شده مربوط به نوفه‌های تداخلی. د) داده حاصل از کم کردن قسمت (ج) از (الف).

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱، شماره ۲، ۱۳۹۴.

vertical seismic profiling data, *Geophysics*, 51 (12), 2206-2218.

Cary, P., 1998, The simplest discrete Radon transform: 68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys, Expanded Abstracts, 1999-2002.

Combettes, P. L. and Wajs, V.R., 2005, Signal recovery by proximal forward- backward splitting, *Multiscale Model. Simul*, 4 (4), 1168-1200.

Elboth, T. and Haouam, F., 2015, A Seismic Interference Noise Experiment in the Central North Sea, 77th EAGE Conference and Exhibition, Madrid, Spain.

Gao, L., Chen, W., Wang, B. and Gao, J., 2014, VSP wave field separation: An optimization method based on block relaxation and singular value thresholding, *Journal of Applied Geophysics*, (104), 156-162.

Gholami, A. and Hosseini, S.M., 2011, A General Framework for Sparsity-Based Denoising and Inversion, *IEEE Transactions On Signal Processing*, 59 (11).

Gulunay, N. and Pattberg, D., 2001, Seismic interference noise removal, 71st Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys, Expanded Abstracts.

Herrmann, P.H., Mojesky, T., Magesan, M. and Hugonnet, P., 2000, Dealiasing, High-Resolution Radon transforms, SEG.

Hu, L.Z. and McMechan, G.A., 1987, Wavefield transformation of vertical seismic profiles, *Geophysics*, 52, 307-321.

Kabir, M.M.N. and Marfurt, K.J., 1999, Toward true amplitude multiple removal: The Leading Edge, 18, 66-73.

Moon, W., Carswell, A., Tang, R. and Dilliston, C., 1986, Radon transform wave field separation for vertical seismic profiling data, *Geophysics*, 51 (4), 940-947.

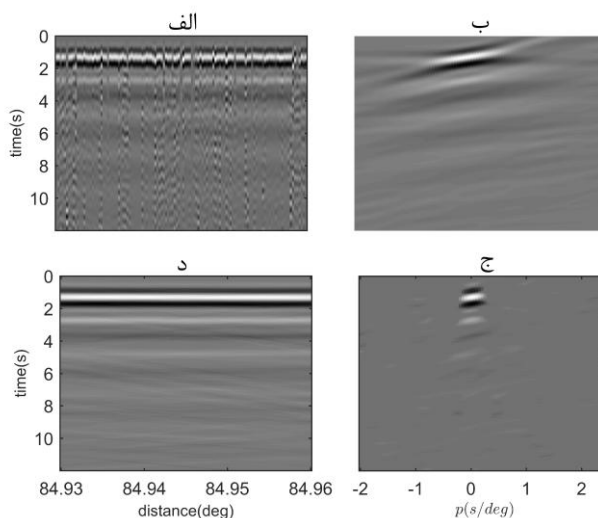
Ng, M. and Perz, M., 2004, High-resolution Radon transform in the tx domain using 'intelligent' prioritization of the Gauss-Seidel estimation sequence: 84th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, doi:<http://dx.doi.org/10.1190/1.1845211>.

Sacchi, M. and Porsani, M., 1999, Fast high resolution parabolic RT: 69th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1477-1480.

Sacchi, M. and Ulrych, T., 1995, High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction, *Geophysics*, 60, 1169-1177.

Sacchi, M., 2002, Statistical and Transform Methods in Geophysical Signal Processing, Department of Physics, University of Alberta.

با دقت بیشتری می‌توان زمان رسیدهای امواج ثبت شده را تشخیص داد.



شکل ۶: کاربرد تبدیل رادون خطی در بالا بردن نسبت سیگنال به نوفه در داده‌های دورلرز. الف) داده دورلرز واقعی مربوط به یک زلزله در زوایای بالا. ب) حوزه رادون معمول مربوط به قسمت (الف). ج) حوزه رادون به دست آمده با اعمال قید تنگی. د) حوزه مکان-زمان به دست آمده از قسمت (ج) با استفاده از الحاقی تبدیل رادون خطی.

۶- نتیجه‌گیری

کاربردهای زیادی را می‌توان برای انواع مختلف تبدیل رادون برشمرد؛ که در این مقاله به کاربردهای تبدیل رادون خطی پرداخته شد. همان‌طور که نشان داده شد، تبدیل رادون مرسوم دچار اثرات مصنوعی است؛ که از قدرت تفکیک و وضوح آن می‌کاهد. با استفاده از الگوریتم مطرح شده می‌توان به یک حوزه رادون تنگ دست یافت؛ که در آن جدایش ضرایب رخدادهاى مختلف به راحتی امکان‌پذیر است. همان‌طور که در مثال‌های عددی نشان داده شد، می‌توان از این الگوریتم در جداسازی جبهه موج‌های امواج بالارونده و پایین‌رونده از یکدیگر در داده‌های نیمرخ لرزه‌ای قائم و همچنین تفکیک نوفه‌های لرزه‌ای تداخلی از برداشت‌های چشمه مشترک دریایی استفاده کرد. همچنین استفاده از یک حوزه رادون تنگ می‌تواند در بهبود کیفیت مقاطع دورلرز و همچنین افزایش نسبت سیگنال به نوفه و یا درون‌یابی داده‌ها مؤثر باشد.

۷- منابع

Aki, K. and Richards, P.G., 2002, *Quantitative Seismology*, University Science Books.

Aminzadeh, F., 1986, A recursive method for the separation of upgoing and downgoing waves of

- Trad, D., Ulrych, T. and Sacchi, M., 2003, Latest views of the sparse Radon transform, *Geophysics*, 68, 386-399, doi: 10.1190/1.1543224.
- Wang, J. and Ng, M., 2009, Greedy least-squares and its application in Radon transforms, CSPG CSEG CWLS Convention.
- Wilson, C.H.K. and Guitton, A., 2005, Interpolation and signal extraction of teleseismic wavefields with the linear radon transform, Stanford Exploration Project, Report 120, 197-216.
- Simaan, M. and Love, P., 1984, Optimum suppression of coherent signals with linear moveout in seismic data. *Geophysics*, 49 (3), 215-226.
- Stewart, R.R., 1985, Median filtering: review and a new f/k analogue design. *J. Can. Soc. Explor. Geophys*, 1 (1), 54-63.
- Thorson, R. and Claerbout, J., 1985, Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion, *Geophysics*, 50, 2727-2741.



Wavefield separation and enhancement using sparse linear radon transform

Sharyar Khas Ahmadi^{1*} and Ali Gholami²

1- M.Sc. Graduated, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 10 March 2016; Accepted: 19 April 2016

Corresponding author: sh.khasahmadi@ut.ac.ir

Keywords

Radon Transform

Sparsity

High Resolution

Wave Field Separation

Signal to Noise Ratio

Extended Abstract

Summary

Radon transform is a useful tool in seismic data processing with lots of applications. However, incomplete information decreases its resolution and limits its applicability. Sparseness is a valid criterion to overcome this problem. In this paper, a forward-backward splitting algorithm is used to solve an l_1 -norm regularized Radon transform in order to obtain a high resolution linear Radon

transform (LRT). Then, it is applied on down-up going wavefield separation in vertical seismic profiling (VSP) data and also seismic interference (SI) noise attenuation. It is also shown that a sparse LRT can be used to enhance the quality of teleseismic data.

Introduction

Overlapping wavefields in time-space domain can be separated in Radon domain, however, different reasons cause resolution problems and aliasing in Radon transform. Obtaining a sparse Radon panel enables us to separate coefficients of each event without harming the others. Using sparsity promoting methods results in a high resolution Radon domain with minimum non-zero elements. An l_2 - l_1 norm cost function is constructed and a forward-backward splitting algorithm is employed to obtain a sparse model, which can be used for different purposes among which VSP wavefield separation, SI noise attenuation and wavefield enhancement are dealt with here. Both down- and upgoing wavefields of VSP data contains information of subsurface but they need to be separated. Mapping their coefficients to separable regions using a sparse linear Radon transform is an efficient solution. One other application could be SI noise attenuation. This kind of marine noise is originated by other surveys in the same area and overpowers reflections. According to their linear characteristics and the use of sparse LRT, they can be subtracted from the data. Moreover, it is shown that injecting sparsity to Radon domain eliminates random noise and also non-linear events. Furthermore, low quality traces can be replaced by interpolated new reconstructed traces applying a mask on misfit term in the cost function. This can be used to enhance the quality of teleseismic data with linear wavefields.

Methodology and Approaches

The ability of separating coefficients in Radon domain relies on the resolution of Radon transform. Least square regularization results in a smooth solution, which causes the application limitation. Here, a sparse LRT is developed by applying an l_1 -norm constraint on Radon model. This transformation can be applied on VSP data to map upgoing and downgoing wavefields to negative and positive slowness regions, respectively. Then, each of them can be reconstructed separately using inverse Radon operator. High amplitude seismic interference noise is harmful to many processing steps and they need to be attenuated beforehand. Their linear coherency in shot gathers makes LRT an appropriate tool to eliminate them. Using a sparse LRT converges SI plane waves energy, however, attenuates reflections coefficients. Thus, only SI noise can be reconstructed, and then, subtracted from marine shot gathers. Sparse data acquisition in teleseismic data, and also, the presence of random noise reduce the quality of the data and make arrival time picking difficult. Sparsity in Radon panel and interpolation increases the resolution of the reconstructed data so that the P- and S-wave arrival times can be determined with more accuracy.

Results and Conclusions

Synthetic and real numerical examples demonstrated the efficiency of applying a forward-backward splitting algorithm to solve an l_2 - l_1 cost function for obtaining a sparse Radon panel in which even linear wavefields with very close slopes can be identified. This method is a feasible and effective way to separate overlapping upgoing and downgoing VSP wavefields, and to attenuate the seismic interference noise and to enhance teleseismic wavefield.