JRAG
نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی
دوره ۵، شماره ۱، ۱۳۹۸، صفحات ۲۰۷–۲۱۵
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/JRAG.2017.960

الگوریتمی جامع برای انجام واهمامیخت ناپایا با تفکیک پذیری بالا در حضور نوفه گوسی و اسپایکی

سیدحسین سیدآقامیری[1] و علی غلامی[2]*

۱- دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران
۲- دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۱۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۲

* نویسنده مسئول مکاتبات: **h.aghamiry@ut.ac.ir**

واژگان کلیدی

واهمامیخت ناپایا
تنکی
تابع هزینه غیرخطی
واهمامیخت تنک
فیلتر وارون Q

چکیده

در بسیاری از حوزه‌های علوم به دست آوردن اطلاعات در مورد یک کمیت نیازمند تئوری وارون است. در این موارد با استفاده از تئوری وارون اطلاعات آن کمیت از اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم آن استخراج می‌شود. در تئوری وارون به همان اندازه که نوشتن یک تابع هزینه مهم است؛ حل آن نیز اهمیت دارد. در اکثر مسائل وارون خطی و محدب، تابع هزینه غیرخطی بوده و از روش‌های تکراری برای حل آن استفاده می‌شود. در این روش‌ها تعیین پارامتر منظم سازی، سرعت همگرایی و کیفیت جواب از موارد مورد بحث است و داشتن روشی جامع، کم‌هزینه و قابل اعتماد بسیار ارزشمند است. مسئله واهمامیخت ناپایا به عنوان یک مرحله مهم از پردازش داده‌های لرزه‌ای و ابزاری کلیدی برای بهبود تفکیک پذیری زمانی، یک مسئله وارون خطی، مقید و بَد وضع با تابع هزینه غیرخطی (چنانچه اثر جذب و موجک معلوم باشند، در غیر این صورت مسئله غیرخطی است) است؛ که حل آن دشوار است. در این مقاله روشی برای حل این بهینه‌سازی در حضور نوفه گوسی و یا اسپایکی پیشنهاد می‌شود؛ که به روزرسانی پارامتر را به صورت خودکار انجام می‌دهد و جوابی پایدار و قابل اعتماد در حالت‌های مختلف ارائه می‌دهد. روش پیشنهادی به انتخاب پارامتر منظم سازی اولیه و جواب اولیه وابسته نیست و پاسخ نهایی در تابع هزینه صدق می‌کند. نتایج اعمال روش پیشنهادی بر مثال‌های مصنوعی و داده‌های واقعی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی پایدار و سریع بوده و نسبت به تغییر پارامتر منظم سازی اولیه مقاوم است.

۱- مقدمه

عملیات لرزه‌ای تلاشی برای به دست آوردن مدل زیرسطحی با استفاده از اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم است. تبدیل این اندازه‌گیری‌ها به مدل‌های زیرسطحی نقش تئوری وارون را بی‌بدیل می‌کند. در تئوری وارون به همان اندازه که نوشتن یک تابع هزینه مناسب برای یک مسئله اهمیت دارد حل آن تابع هزینه هم اهمیت دارد. در بسیاری از مسائل، فیزیک ارتباط‌دهنده بین کمیت‌ها و اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم خطی است (یا با تقریب خوبی خطی است و یا با تکنیک‌هایی خطی می‌شود). در مسائل خطی حالت‌هایی وجود دارد که تابع هزینه غیرخطی است (مثل زمانی که داده به نوفه اسپایکی آغشته باشد و یا اینکه مدل مورد نظر توزیع احتمالاتی دنباله سنگین داشته باشد) که برای حل آن‌ها به روش‌های حل تکراری نیاز است. در روش‌های تکراری انتخاب جواب اولیه، پارامتر منظم سازی مورد نیاز، سرعت همگرایی و کیفیت جواب نهایی بسیار اهمیت دارد. همچنین چون مسئله در یک مرحله حل نمی‌شود دانستن اینکه آیا جواب نهایی، جواب تابع هزینه است بسیار حائز اهمیت است (قابل اعتماد بودن روش). یک روش پرطرفدار در ژئوفیزیک برای حل مسائل وارون با تابع هزینه غیرخطی، روش IRLS (Iterative Reweighted Least Square) است (Gersztenkom et al., 1985)؛ که نیاز به دانستن پارامتر منظم سازی دارد. روش‌هایی که برای تعیین پارامتر منظم سازی وجود دارد، بیشتر برای توابع هزینه خطی کارایی دارند و برای توابع هزینه غیرخطی روشی وجود ندارد (Aster et al., 2005).

ردلرزه (Seismic trace) ثبت شده حاصل اندرکنش اثرات پیچیده‌ای است و به دست آوردن اطلاعات مفید از آن بدون اعمال مراحل پردازشی پیشرفته دشوار است. یکی از مراحل پردازش، واهمامیخت است؛ که با حذف اثرات فیلترهای اعمال شده بر سری ضرایب بازتاب زمین (r)، تفکیک پذیری زمانی را افزایش می‌دهد. مدل کردن ریاضی این فیلترها پیچیده است و در عمل از فرض‌های ساده ساز استفاده می‌شود. بعضی از این اثرات تغییرپذیر با زمان و برخی دیگر تغییرناپذیر با زمان هستند. مدل کردن فرایندهای تغییرپذیر با زمان به دلیل این‌که درجه آزادی بالاتری نسبت به فرایندهای تغییرناپذیر با زمان دارند؛ دشوارتر خواهد بود. اگر ردلرزه ثبت شده اثر دو فیلتر تغییرپذیر و تغییرناپذیر با زمان که بر سری ضرایب بازتاب زمین اثر کرده‌اند، در نظر گرفته شود که نوفه هم به آن اضافه شده باشد؛ می‌توان فیلتر تغییرناپذیر را به موجک اولیه، اثرات اطراف چشمه و گیرنده و... (Sheriff and Geldart, 1995) و فیلتر تغییرپذیر با زمان را به جذب لرزه‌ای، چندگانه‌های (Multiples) کوتاه مسیر و اثرات لایه نازک (سید آقامیری و غلامی، ۱۳۹۵) نسبت داد. در ادامه این مقاله، فیلترهای تغییرناپذیر با زمان که عموماً فیلترهای پایین گذر هستند؛ موجک نامیده می‌شوند و فیلترهای تغییرپذیر با زمان که همه اثری مشابه هم دارند؛ اثر جذب نامیده می‌شوند. اثر جذب باعث تضعیف دامنه فرکانس‌های مختلف می‌شود. به نحوی که سرعت کاهش فرکانس‌های بالا بیشتر از فرکانس‌های پایین است (سید آقامیری و غلامی، ۱۳۹۵).

در پردازش مرسوم داده‌های لرزه‌ای اثر موجک توسط واهمامیخت پایا حذف می‌شود؛ که در این فرایند وارون، موجک یا معلوم بوده و یا این‌که تخمین زده شده و حذف می‌شود (Gholami and Sacchi, 2013). همچنین حذف اثر جذب با فیلتر وارون-Q (Inverse Q-filtering) اتفاق می‌افتد؛ که به دلیل بَد وضع بودن این مسئله، استفاده از منظم سازی در این مرحله اجتناب‌ناپذیر است (Zhang and Ulrich, 2007).

از آنجا که خطا در مراحل پردازش به صورت تجمعی رشد می‌کند و واهمامیخت پایا و فیلتر وارون-Q مسائلی بد وضع هستند؛ انجام همزمان این مراحل باعث رسیدن به پاسخ‌های بهتر و قابل اعتماد تر می‌شود؛ که البته مسئله وارون حاصل که واهمامیخت ناپایا نامیده می‌شود؛ پیچیده‌تر خواهد بود. در حالتی که اثر جذب و موجک معلوم باشد، واهمامیخت ناپایا غیر کور (non-blind) خوانده می‌شود. اگر یکی از موجک‌ها و اثر جذب معلوم باشد، واهمامیخت ناپایا نیمه‌کور (semi-blind) نامیده می-شود و در حالتی که موجک و اثر جذب مجهول باشند؛ واهمامیخت ناپایا کور (blind) نامیده می‌شود.

تاکنون روش‌های متعددی برای تخمین موجک از داده‌های لرزه سطحی پیشنهاد شده است (Gholami and Sacchi, 2013). از طرفی با استفاده از اطلاعات چاه و یا داده‌های VSP (Vertical seismic profile) می‌توان اثر جذب را به دست آورد (Tonn, 1991). در حالتی که این اطلاعات موجود نیست، روش-هایی برای تخمین اثر جذب از اطلاعات لرزه‌ای سطحی وجود دارد (Hauge, 1981، Quan and Harris, 1997 و Zhang and Ulrych, 2002). چنانچه موجک و اثر جذب معلوم باشند، مسئله واهمامیخت ناپایای غیرکور به شدت بد وضع است. مرگراو و همکاران (Margrave et al., 2011) روشی برای انجام واهمامیخت ناپایا غیر کور به نام واهمامیخت گابور (Gabor deconvolution) پیشنهاد دادند؛ که طی یک فرایند نخست موجک و اثر جذب را تخمین می‌زند و سپس اثر آن‌ها را حذف می‌کند. اگرچه ایده ایشان برای تخمین اثر جذب و موجک خوب بود؛ ولی این روش ناپایدار است. غلامی (Gholami, 2016) با اصلاح واهمامیخت گابور و ارائه واهمامیخت گابور تصویر شده (Projected Gabor deconvolution) مشکلات روش قبلی را حل کرده و روشی پایدار پیشنهاد داد.

غلامی و آقامیری (Gholami and Aghamiry, 2017; Gholami, 2015) دو روش‌هایی برای انجام واهمامیخت ناپایا نیمه‌کور پیشنهاد دادند. در هر دو این روش‌ها با دانستن موجک

می‌توان اثر جذب و پاسخ ضربه زمین را طی یک منظم سازی مقید به دست آورد.

در مقاله حاضر با فرض دانستن موجک و اثر جذب، هدف آن است که برای انجام واهمامیخت ناپایا با تفکیک پذیری بالا الگوریتمی قابل اعتماد پیشنهاد گردد؛ که با انواع مختلف نوفه سازگاری داشته باشد؛ از سوی دیگر به پارامتر منظم سازی اولیه حساس نباشد و نسبت به تغییر آن‌ها مقاوم باشد و به طور خودکار پارامتر منظم سازی را تخمین بزند و درنهایت با تعداد تکرار کم به جوابی با کیفیت بالا برسد.

۲- تئوری روش

ردلرزه ثبت شده y حاصل همامیختن یک موجک لرزه‌ای w با پاسخ ضربه زمین x است که نوفه e هم به آن اضافه شده است:

$$y = w * x + e \qquad (۱)$$

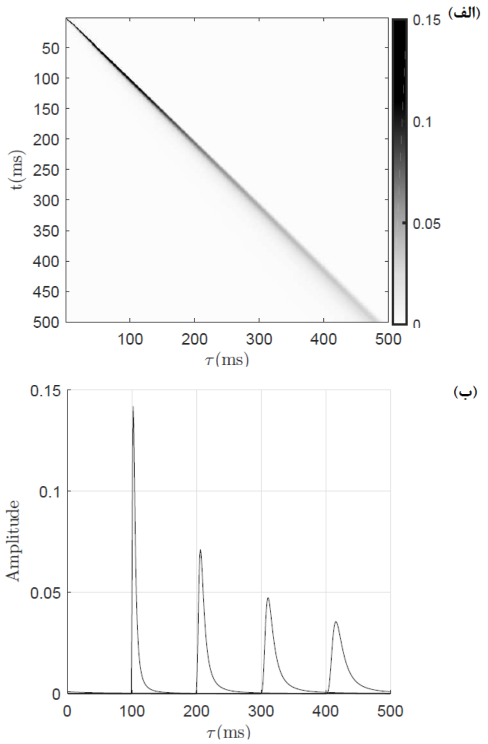
که در این رابطه * به عملگر همامیخت اشاره دارد. واهمامیخت پایا به دنبال حذف w و بهبود تفکیک پذیری زمانی است. حتی اگر بتوان اثر موجک را به طور کامل حذف کرد؛ x نمی‌تواند نماینده سری ضرایب بازتاب زمین باشد؛ چون اثر جذب در آن وجود دارد. برای رسیدن به تفکیک پذیری بالا، باید اثر جذب تا حد ممکن از بین برود. در حالتی که اثر جذب لحاظ شود؛ می‌توان ردلرزه را با استفاده از رابطه زیر تشریح کرد:

$$y = WAr + e \qquad (۲)$$

مرگراو و همکاران (Margrave et al., 2011) این رابطه را هامامیخت ناپایا نامید؛ که در این رابطه W یک ماتریس توپلیتسی به دست آمده از موجک اولیه و A ماتریس جذب است و ساختاری به صورت زیر دارد:

$$A(t,\tau) = \mathbb{F}^{-1}_{\omega \to \tau}\left[e^{-\frac{\omega + jH(|\omega|)}{2} \sum_{i=0}^{\tau-1} \frac{1}{Q(i)}} \right] \qquad (۳)$$

که $\mathbb{F}^{-1}_{\omega \to \tau}$ نشان‌دهنده عکس تبدیل فوریه، H عملگر تبدیل هیلبرت و $j = \sqrt{-1}$ است. در رابطه (۳)، t نشان‌دهنده زمان، τ نشان‌دهنده زمان انتشار (propagation time)، ω نشان‌دهنده فرکانس زاویه‌ای و $Q(i)$ فاکتور کیفیت (Quality factor) برای زمان i است. به عنوان مثال ساختار ماتریس A برای فاکتور کیفیت ثابت برابر ۵۰ و زمان انتشار برابر ۵۰۰ میلی‌ثانیه در شکل ۱ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ستون‌های ابتدایی شباهت زیادی به اسپایک دارند؛ ولیکن در اثر جذب با افزایش شماره ستون شکل اسپایک‌ها تغییر می‌کنند.



شکل ۱: الف: ماتریس A برای فاکتور کیفیت ۵۰ و زمان انتشار ۵۰۰ میلی‌ثانیه، ب: نمایش تعدادی از ستون‌های ماتریس A در کنار هم.

یک راه به دست آوردن r این است که ابتدا واهمامیخت پایا برای حذف اثر موجک اعمال شود و در مرحله بعد برای حذف اثر جذب از فیلتر وارون-Q استفاده شود؛ ولی از آنجا که در مراحل پردازش، خطا به صورت تجمعی رشد می‌کند و عملگرهای واهمامیخت پایا و فیلتر وارون-Q بد وضع هستند؛ خطای ایجاد شده از مرحله قبل در مرحله بعد به شدت رشد می‌کند و به دست آوردن پاسخ را دشوار می‌کند؛ بنابراین بهتر است که هر دو آن‌ها در یک مرحله و به طور همزمان انجام شوند (Gholami, 2014).

برای حذف همزمان اثر موجک و جذب، واهمامیخت ناپایا پیشنهاد شد (Clarke, 1968):

$$\underset{w,Q,r}{\arg\min} \|r\|_1 \qquad s.t. \qquad \|y - WAr\|_p^p \le \delta \qquad (۴)$$

که در این رابطه δ به سطح نوفه موجود در ردلرزه اشاره دارد. همچنین $\|\ \|_p$ نرم p نوفه بوده و مقدار p به نوع نوفه موجود در ردلرزه ربط دارد. برای نوفه گوسی مقدار آن ۲ و برای نوفه اسپایکی مقدار آن ۱ است (Aster et al., 2005). مسئله بهینه‌سازی (۴) یک مسئله بهینه‌سازی با چند هدف، غیرخطی و مقید است؛ که حل آن دشوار است و برای حل آن باید تعداد مجهولات کاهش یابند.

در این مقاله هدف آن است که الگوریتمی جامع برای حل مسئله (۴) در حالتی که موجک و اثر جذب معلوم باشند (واهمامیخت ناپایا

غیرکور) و ردلرزه به نوفه گوسی و یا نوفه اسپایکی آغشته باشد؛ پیشنهاد شود. در این حالت، مسئله بهینه‌سازی (۴) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\arg\min_{r} \|r\|_1 \qquad s.t. \qquad \left\| \begin{matrix} y - WA\,r \\ G \end{matrix} \right\|_p^p \le \delta \qquad (۵)$$

که یک مسئله بهینه‌سازی خطی و مقید با تابع هزینه غیرخطی است. غلامی و محمدی (Gholami and Mohamadi, 2015) روش IRRLS (Iterative Reweighted and Refined Least Square) را برای حل بهینه‌سازی‌های خطی و مقید پیشنهاد دادند؛ که به صورت تکراری با استفاده از رابطه زیر به روز رسانی پاسخ اولیه را انجام می‌دهد:

$$\begin{aligned} r^{k+1} &= \alpha r^k + P^k (y - \alpha G r^k) \\ P^k &= \lambda^k (\lambda^k G^T \Phi_m^k G + \Phi_r^k)^{-1} G^T \Phi_m^k \end{aligned} \qquad (۶)$$

در این رابطه $0\le\alpha\le1$ ضریبی است که اهمیت مدل قبلی و مدل جدید را در پاسخ هر مرحله مشخص می‌کند. هر چه α مقدار کمتری داشته باشد، سرعت همگرایی کمتر است؛ ولی پاسخ تنک‌تری هم به دست خواهد آمد. همچنین $\Phi_m^k=diag\{|y-Gr|^{p-2}\}$ و $\Phi_r^k=diag\{|r|^{-1}\}$ ماتریس‌های قطری وزن دهی می‌باشند. غلامی و محمدی (Gholami and Mohamadi, 2015) پارامتر λ^k را در هر مرحله با رابطه‌ای از پیش معین که به داده y وابسته نیست؛ به دست آوردند. پارامتر λ^k نقش مهمی در سرعت همگرایی و کیفیت جواب نهایی دارد. غلامی و آقامیری (Gholami and Aghamiry, 2017) پارامتر λ^k را با استفاده از رابطه‌ای که به y و r^k وابسته بود؛ به روزرسانی کردند و علاوه بر افزایش سرعت همگرایی، وابستگی روش به انتخاب پارامتر λ^0 را از بین بردند. این روش تلاش می‌کند تا λ^k را طوری وابسته به r^k و y به دست آورد که پاسخ حاصل در تکرار آخر علاوه بر صدق کردن در شرط $\|y-Gr\|_p^p \le \delta$، کمترین نرم یک را نسبت به تمام پاسخ‌های قبلی داشته باشد. به این منظور λ^{k+1} تا حد ممکن به ریشه معادله غیرخطی $\|y-Gr^{k+1}\|_p^p=\delta$ نزدیک می‌شود. برای یافتن ریشه این معادله می‌توان از رابطه ریشه‌یابی نیوتن استفاده کرد (Atkinson, 2008):

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \frac{\delta - \|y - Gr\|_p^p}{\frac{\partial}{\partial\lambda}\|y - Gr\|_p^p} \qquad (۷)$$

استفاده از رابطه (۷) نیاز به محاسبه $\frac{\partial}{\partial\lambda}\|y-Gr\|_p^p$ دارد؛ که به دست آوردن آن دشوار است. در این روش به جای مشتق از شیب خطی که از نقطه $\left\{\lambda^0,\|y-Gr^0\|_p^p\right\}$ و $\left\{\lambda^k,\|y-Gr^k\|_p^p\right\}$ می‌گذرد؛ به عنوان تقریب مشتق استفاده شده است. این روش که secant method نامیده می‌شود؛ رابطه به دست آوردن λ^{k+1} را به صورت زیر پیشنهاد می‌دهد (Gholami and Aghamiry, 2017):

$$\lambda^{k+1} = \left| \frac{\delta - \|y - Gr^0\|_p^p}{\|y - Gr^k\|_p^p - \|y - Gr^0\|_p^p} \right| \lambda^k \qquad (۸)$$

که قدر مطلق موجود در این رابطه تضمین می‌کند همواره مقدار λ^{k+1} مثبت باشد. به عنوان جمع‌بندی می‌توان الگوریتم زیر را برای حل مسئله واهمامیخت ناپایا غیر کور ارائه داد:

$1-\ \ Input: y, Q, w, \delta, p$

$2-\ \ oputput: r$

$3-\ \ define: k=0, \lambda^0=1, r^0=0, \phi_m^0=\phi_r^0=I$

$4-\ \ while\ \ \|y-Gr^k\|_p^p \succ \delta \ \ do$

$\qquad P^k = \lambda^k (\lambda^k G^T \Phi_m^k G + \Phi_r^k)^{-1} G^T \Phi_m^k$

$\qquad r^{k+1} = \alpha r^k + P^k (d - \alpha G r^k)$

$\qquad \Phi_m^k = diag\{|y - Gr|^{p-2}\}$

$\qquad \Phi_r^k = diag\{|r|^{-1}\}$

$\qquad \lambda^{k+1} = \left| \frac{\delta - \|y-Gr^0\|_p^p}{\|y-Gr^k\|_p^p - \|y-Gr^0\|_p^p} \right| \lambda^k$

$\qquad k = k+1$

$\qquad end$

الگوریتم ۱: الگوریتم پیشنهادی جهت حل مسئله بهینه‌سازی مقید.

۳- اعمال روش بر روی داده‌های مصنوعی

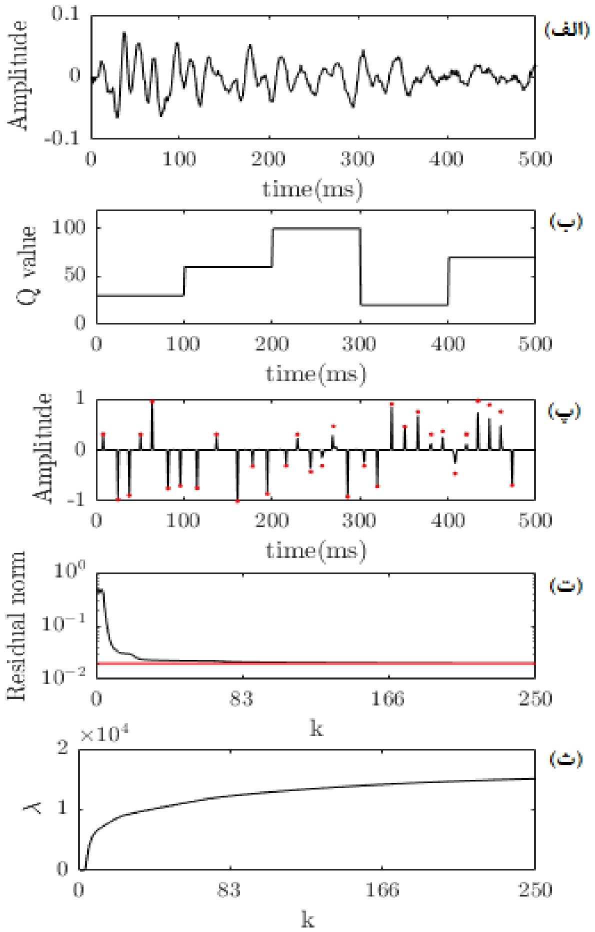
به منظور آزمودن الگوریتم پیشنهادی در ابتدا یک مسئله واهمامیخت ناپایا غیر کور با نوفه گوسی در نظر گرفته شد. در شکل ۲-الف ردلرزه جذب شده با نوفه گوسی نشان داده شده است. موجک استفاده شده در این ردلرزه، ریکر (Ricker) با فرکانس غالب ۴۰ هرتز بوده و جذب با مدل Q نشان داده شده در شکل ۲-ب انجام شده است. روش جدید با $p=2$ بر این ردلرزه اعمال شده؛ که نتیجه در شکل ۲-پ آمده است. نقاط قرمز محل نوک اسپایک‌ها را در سری ضرایب بازتاب اولیه نشان می‌دهند. در شکل ۲-ت مقدار عدم تطابق در تکرارهای مختلف رسم شده و خط قرمز در این شکل سطح مورد نظر برای عدم تطابق (δ) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، روش بعد از چندین تکرار همگرا شده است و سری ضرایب بازتاب به دست آمده ۴٫۸۸۵ درصد خطا دارد. در شکل ۲-ث، λ^k در تکرارهای مختلف ترسیم شده

است. روند صعودی این نمودار نشان‌دهنده کاهش اهمیت عدم تطابق و افزایش اهمیت مدل در منظم سازی با افزایش شماره تکرار است. در این مثال عدد شرط (condition number) اپراتور 1.8×10^{24}است؛ که نشان‌دهنده یک مسئله بسیار بد وضع است؛ که اندکی نوفه در فضای داده به شدت در فضای مدل تقویت خواهد شد. چنانچه منظم سازی و تعیین پارامتر آن به درستی انجام نگیرد؛ گرفتن جواب از این مسئله امکان‌پذیر نیست. هرچند روش پیشنهادی به خوبی به این مهم دست یافته است. به منظور مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر، همین مسئله با روش IRLS حل شد. در ابتدا با استفاده از MSE (Mean square error) پارامتر منظم سازی از میان ۳۰ پارامتر منظم سازی انتخاب شد و سپس حل مسئله با استفاده از پارامتر منظم سازی انتخاب شد؛ تا رسیدن به شرط $\|y-Gr\|_p^p \le \delta$ ادامه پیدا کرد؛ که نتایج در جدول ۱ آمده است. بر اساس اطلاعات این جدول هر دو روش توانسته‌اند به خطایی در حد هم دست پیدا کنند؛ ولی زمان لازم برای انجام الگوریتم پیشنهادی به مراتب کمتر از IRLS است. همان‌طور که اشاره شد پارامتر منظم سازی IRLS با استفاده از MSE تعیین شده است. به این معنی که مسئله به وسیله IRLS برای پارامترهای منظم سازی متفاوت حل شده و بهترین پارامتر منظم سازی بر اساس خطای بین سری ضرایب بازتاب واقعی و سری ضرایب بازتاب تخمینی انتخاب شده است. در عمل به دلیل نداشتن سری ضرایب بازتاب واقعی، تخمین پارامتر با این روش غیرممکن است و از طرفی روش‌های موجود تخمین پارامتر منظم سازی برای توابع هزینه خطی کارا می‌باشند؛ که این مسئله تعیین پارامتر منظم سازی IRLS را در مواجهه با توابع هزینه غیرخطی دشوار می‌کنند؛ که این مسئله اهمیت عدم نیاز به تعیین پارامتر منظم سازی در روش جدید را بیشتر نشان می‌دهد.

به عنوان مثال دیگر یک مسئله واهمامیخت ناپایا غیر کور با نوفه اسپایکی بررسی می‌شود. در شکل ۳–الف ردلرزه جذب شده با مدل Q شکل ۳–ب و موجک ریکر ۴۰ هرتز که نوفه اسپایکی به آن اضافه شده؛ نشان داده شده است. نتیجه اعمال واهمامیخت ناپایا با p=1 در شکل ۳–پ آمده است. همانند شکل ۲، نقاط قرمز نشان‌دهنده محل نوک اسپایک‌ها در سری ضرایب بازتاب اولیه می‌باشند. همچنین در شکل ۳–ت مقدار عدم تطابق در تکرارهای مختلف رسم شده و خط قرمز موجود در این شکل سطح مورد نظر برای عدم تطابق (δ) را نشان می‌دهد؛ که در این شکل همگرایی پس از چند تکرار مشهود است و سری ضرایب بازتاب به دست آمده ۰٫۰۵ درصد خطا دارد. در شکل ۳–ث نیز λ^k در تکرارهای مختلف برحسب شماره تکرار ترسیم شده است؛ که همانند مثال قبل نشان‌دهنده کاهش اهمیت عدم تطابق و افزایش اهمیت مدل در منظم سازی با افزایش شماره تکرار است.

به منظور نشان دادن عدم وابستگی روش ذکر شده به مقدار λ^0 مسئله‌ای بیان شده در شکل ۲–الف و ۳–الف به ازا مقادیر مختلف λ^0 حل شد و نمودار عدم تطابق برحسب شماره تکرار برای آن‌ها به ترتیب در شکل ۴–الف و ۵–الف رسم شده است. جدا از این‌که λ^0 چه باشد، تمام آن‌ها همگرا شده‌اند. یکی دیگر از مواردی که بررسی می‌شود و از اهمیت بالایی برخوردار است، مسئله مقاوم بودن روش در برابر مقدار نوفه موجود در ردلرزه است.

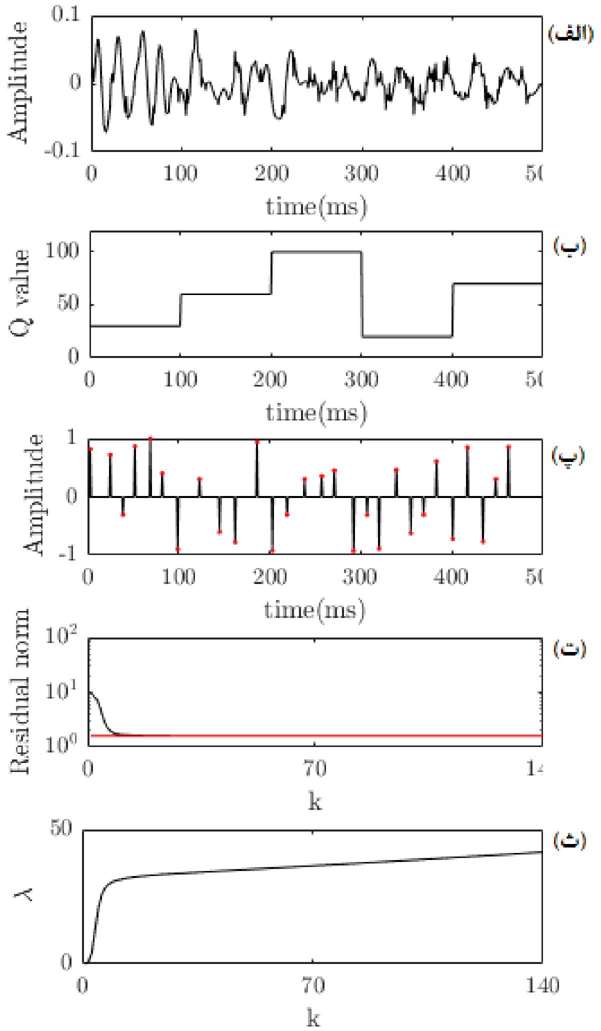
به این منظور سطح نوفه موجود در شکل ۲–الف و ۳–الف را تغییر داده و الگوریتم پیشنهادی بر روی آن‌ها اعمال شد؛ که نمودارهای عدم تطابق برحسب شماره تکرار برای آن‌ها به ترتیب در شکل ۴–ب و ۵–ب رسم شده است. در این شکل‌ها هر منحنی با درصد خطا مشخص شده است (درصد خطا بیانگر نسبت انرژی خطا به انرژی ردلرزه بدون نوفه است). همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، همه آن‌ها پس از چندین تکرار همگرا شده‌اند.



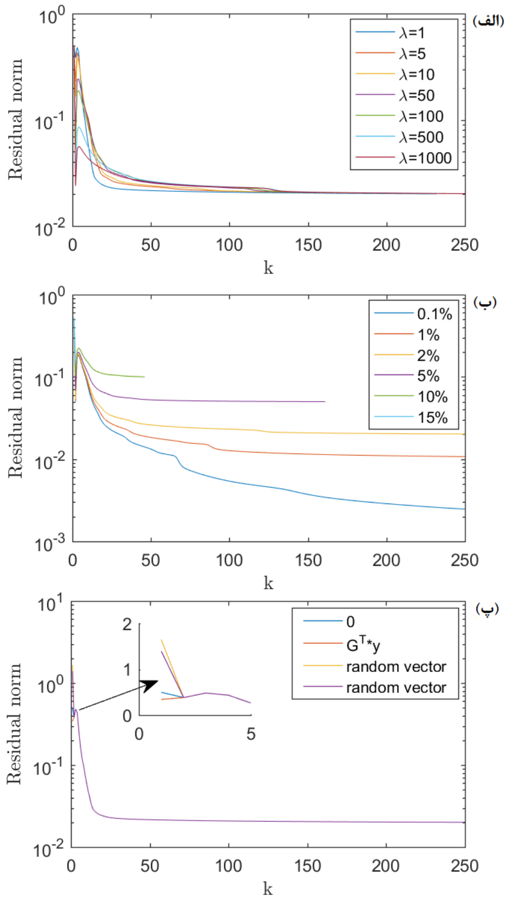
شکل ۲: واهمامیخت ناپایا غیر کور با الگوریتم پیشنهادی در حضور نوفه گوسی الف: ردلرزه جذب شده، ب: مدل Q زمین به صورت تابعی از زمان، پ: سری ضرایب بازتاب تخمین زده شده توسط الگوریتم پیشنهادی که نقاط قرمز در این شکل نشان‌دهنده محل نوک اسپایک‌ها در سری ضرایب بازتاب اولیه می‌باشند؛ ت: نرم عدم تطابق برحسب شماره تکرار که δ با خط قرمز در این شکل مشخص شده است. ث: λ برحسب شماره تکرار.

جدول ۱: RMSE و زمان سپری شده برای انجام واهمامیخت ناپایا کور بر روی ردلرزه شکل ۲-الف با روش IRLS و الگوریتم پیشنهادی.

	RMSE (درصد)	زمان سپری شده (ثانیه)
IRLS	۴,۸۸۷	۱۱,۲۳۲
الگوریتم پیشنهادی	۴,۸۸۵	۱۰۰۱,۱۲۵



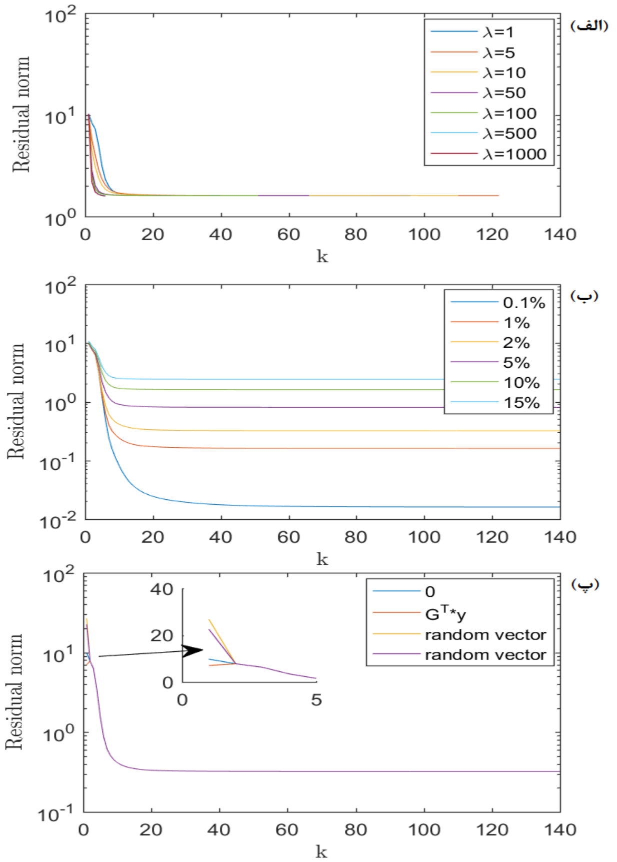
شکل ۳: واهمامیخت ناپایا غیر کور با الگوریتم پیشنهادی در حضور نوفه اسپایکی. الف: ردلرزه جذب شده، ب: مدل Q زمین به صورت تابعی از زمان، پ: سری ضرایب بازتاب تخمین زده شده توسط الگوریتم پیشنهادی؛ که نقاط قرمز در این شکل نشان‌دهنده محل نوک اسپایک‌ها در سری ضرایب بازتاب اولیه می‌باشند. ت: نرم عدم تطابق برحسب شماره تکرار که δ توسط خط قرمز در این شکل مشخص شده است. ث: λ برحسب شماره تکرار.



شکل ۴: نمودار عدم تطابق برحسب تکرار برای اعمال واهمامیخت ناپایا غیر کور بر روی شکل ۱-الف با شرایط الف: استفاده از ۱، ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ به عنوان λ^0، ب: استفاده از ۰/۱، ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نوفه در ردلرزه، پ: استفاده از بردار ۰، جواب الحاقی و دو بردار تصادفی به عنوان جواب اولیه (به منظور مقایسه بهتر، رفتار عدم تطابق برای پنج تکرار اول در این شکل بزرگ شده که با فلش مشخص است).

به منظور نشان دادن عدم وابستگی الگوریتم پیشنهادی به سری ضرایب بازتاب اولیه (r^0)، مسئله‌های بیان شده در شکل ۲-الف و ۳-الف به ازا پاسخ‌های اولیه مختلف (جواب بردار ۰، جواب الحاقی $G^T d$ و دو بردار تصادفی) حل شدند و نمودار عدم تطابق برحسب شماره تکرار برای آن‌ها به ترتیب در شکل ۴-پ و ۵-پ رسم شده است که همگرایی همه آن‌ها بعد از چندین تکرار مشخص است.

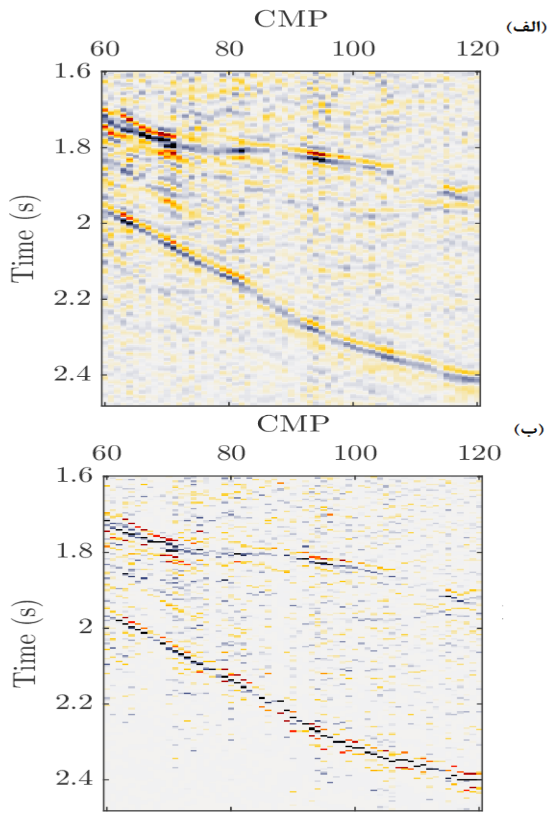
تنها تفاوت این نمودارها در چند تکرار اول است؛ به این منظور رفتار عدم تطابق برای ۵ تکرار اول در شکل ۴-پ و ۵-پ به صورت جداگانه ترسیم شده است. به وضوح دیده می‌شود که علیرغم پاسخ اولیه متفاوت، از تکرار دوم به بعد عدم تطابق همه آن‌ها یکسان است و این دلالت بر بی‌اهمیت بودن جواب اولیه در الگوریتم پیشنهادی دارد.



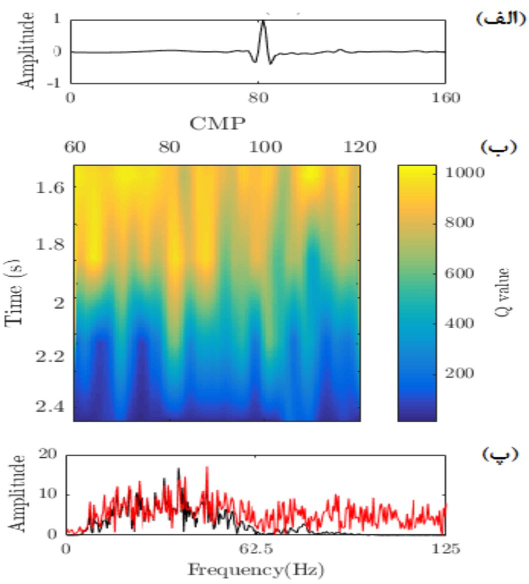
شکل ۵: نمودار عدم تطابق برحسب تکرار برای اعمال واهمامیخت ناپایا غیر کور بر روی شکل ۳–الف با شرایط الف: استفاده از ۱، ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ به عنوان λ^0 ب: استفاده از ۰/۱، ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نوفه در ردلرزه، پ: استفاده از بردار ۰، جواب الحاق و دو بردار تصادفی به عنوان جواب اولیه (به منظور مقایسه بهتر، رفتار عدم تطابق برای پنج تکرار اول در این شکل بزرگ شده که با فلش مشخص است).

۴- اعمال روش بر روی داده‌های واقعی

به منظور مشاهده نتایج الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌های واقعی، بخشی از یک سری داده پس از برانبارش انتخاب شده است (شکل ۶–الف). مدل جذب (Q) این مقطع توسط روش آقامیری و غلامی (Aghamiry and Gholami, 2017) تخمین زده شد؛ که در شکل ۷–ب نمایش داده شده است. همچنین موجک این ردلرزه با روش غلامی و ساشی (Gholami and Sacchi, 2013) به دست آمد (شکل ۷–الف). نتایج اعمال واهمامیخت ناپایا غیرکور با الگوریتم پیشنهادی و مدل جذب و موجک تخمینی در شکل ۶–ب آمده است؛ که بهبود تفکیک پذیری قائم در آن مشهود است. به منظور مقایسه بهتر در شکل ۷–پ، طیف فرکانس یکی از ردلرزه‌های شکل ۶–الف (مشکی) در کنار طیف فرکانسی همان ردلرزه از شکل ۶–ب (قرمز) رسم شده است. در این شکل بهبود محتوای فرکانسی نسبت به قبل از واهمامیخت قابل ملاحظه است.



شکل ۶: اعمال واهمامیخت ناپایا غیر کور با الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌های واقعی، الف: بخشی از یک مقطع برانبارش شده، ب: مقطع به دست آمده بعد از اعمال واهمامیخت ناپایا غیر کور با استفاده از روش پیشنهادی.



شکل ۷: الف: موجک میانگین تخمین زده شده با روش غلامی و ساشی از مقطع شکل ۶–الف، ب: مقطع Q تخمینی با روش غلامی و آقامیری، پ: اندازه طیف فرکانس یک ردلرزه شکل ۶–الف (مشکی) در کنار اندازه طیف فرکانس همان ردلرزه از شکل ۶–ب (قرمز).

۵- نتیجه‌گیری

به دلیل ناپایایی موجک لرزه‌ای و تغییر تدریجی شکل آن با زمان نتیجه حاصل از واهمامیخت لرزه‌ای زمانی بهینه خواهد بود که این آثار در الگوریتم مورد استفاده در نظر گرفته شود؛ حال چنین الگوریتمی را واهمامیخت ناپایا نامند. واهمامیخت ناپایا یک مسئله بهینه‌سازی مقید و چند هدفه بوده؛ که حل آن بدون داشتن اطلاعات در مورد موجک و مدل جذب، تقریباً غیرممکن است. در سال‌های اخیر روش‌های زیادی برای تخمین موجک و تخمین اثر جذب پیشنهاد شده است. با به دست آوردن این اثرات و فرض تنک بودن سری ضرایب بازتاب زمین، مسئله واهمامیخت ناپایا به یک مسئله خطی مقید با تابع هزینه غیرخطی تبدیل می‌شود؛ که از روش‌های تکراری برای حل آن استفاده می‌شود. در این مقاله الگوریتمی جامع برای حل این مسئله پیشنهاد شد؛ که امکان در نظر گرفتن نوفه گوسی و اسپایکی را دارد. این الگوریتم تلاش می‌کند تا رابطه (۵) را حل کند. الگوریتم پیشنهادی به پارامتر منظم سازی اولیه حساس نیست و به صورت خودکار پارامتر مورد نیازش را در هر تکرار حساب می‌کند و سرعت همگرایی بالایی دارد.

۶- منابع

سید آقامیری، ح. و غلامی، ع.، ۱۳۹۵، تخمین ضریب کیفیت ثابت برای یک ردلرزه و حذف اثر آن توسط واهمامیخت ناپایا، مجله پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، مقاله تحت چاپ.

Aghamiry, H.S. and Gholami, A., 2017, Interval-Q estimation and compensation: an adaptive dictionary learning approach, Extended Abstract, 79th EAGE Conference & Exhibition, Paris, France.

Aster, R., Borchers, B. and Thurber, C., 2005, Parameter Estimation and Inverse Problems, Elsevier, New York.

Atkinson, K.E., 2008, An introduction to numerical analysis, John Wiley & Sons.

Clarke, G.K.C., 1968, Time-varying deconvolution filters, Geophysics, 33, 936-944.

Gersztenkorn, A., Bednar, J.B. and Lines, L.R., 1985, Robust iterative inversion for the one-dimensional acoustic wave equation, In SEG Technical Program Expanded Abstracts 1985, Society of Exploration Geophysicists, pp. 331-334.

Gholami, A. and Aghamiry, H.S., 2017, RR algorithm for robust inversion of seismic data, Extended Abstract, 79th EAGE Conference & Exhibition, Paris, France.

Gholami, A. and Gheymasi, H.M., 2015, Regularization of geophysical ill-posed problems by iteratively re-weighted and refined least squares, Computational Geosciences, 20 (1), 19-33.

Gholami, A. and Sacchi, M.D., 2013, Fast 3D blind seismic deconvolution via constrained total variation and GCV, SIAM Journal on Imaging Sciences, 6 (4), 2350-2369.

Gholami, A., 2014, Non-convex compressed sensing with frequency mask for seismic data reconstruction and denoising, Geophysical Prospecting, 62 (6), 1389-1405.

Gholami, A., 2015, Semi-blind nonstationary deconvolution: Joint reflectivity and Q estimation, Journal of Applied Geophysics, 117, 32-41.

Gholami, A., 2016, Projected Gabor deconvolution, Geophysics, 81 (2), 1-7.

Hauge, P.S., 1981, Measurements of attenuation from vertical seismic profiles, Geophysics, 46 (11), 1548-1558.

Margrave, G.F., Lamoureux, M.P. and Henley, D.C., 2011, Gabor deconvolution: Estimating reflectivity by nonstationary deconvolution of seismic data, Geophysics, 76 (3), 15-30.

Quan, Y. and Harris, J.M., 1997, Seismic attenuation tomography using the frequency shift method, Geophysics, 62, 895-905.

Sheriff, R.E. and Geldart, L.P., 1982, Exploration Seismology, Cambridge University Press.

Tonn, R., 1991, The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational method, Geophysical Prospecting, 39, 1-27.

Zhang, C. and Ulrych, T.J., 2002, Estimation of quality factors from CMP records, Geophysics, 67, 1542-1547.

Zhang, C. and Ulrych, T.J., 2007, Seismic absorption compensation: A least-squares inverse scheme, Geophysics, 72 (6), 109-114.

JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

(JRAG)

2019, VOL 5, NO 2

(DOI): 10.22044/JRAG.2017.960

Shahrood University of Technology

A general algorithm for high-resolution non-stationary deconvolution in presence of Gaussian and spike-like noises

Seyed Hossein Seyed Aghamiry[1*] and Ali Gholami[2]

1- Ph.D. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 6 May 2017; Accepted: 3 July 2017

Corresponding author: h.aghamiry@ut.ac.ir

Keywords

Non-Stationary Deconvolution
Sparsity
Non-Linear Cost Functions
Sparse Deconvolution
Inverse Q-Filtering

Extended Abstract

Summary

Definition of a suitable cost function is a critical step in solving a problem based on inverse theory, and minimization of the designed cost function can also be very challenging. Non-linear cost functions are usually solved by using iterative algorithms where selection of the parameters in each iteration has a profound effect on the speed of convergence and the quality of the final solution. Therefore, a scheme for automatic determination of the parameters in a general framework can be highly effective in solving inverse problems arising in applied geophysics. Seismic non-stationary deconvolution is a highly ill-conditioned problem, which is required to be solved when improving the vertical resolution of the data is intended. The solution of this problem can be very challenging specifically when a high-resolution solution is desired and when the contaminant noise in the data is non-Gaussian or spike-like. In this paper, we consider this problem assuming that the seismic wavelet and the medium quality factor (Q) are known. Specifically, we consider the minimization of a general cost function for solution of seismic non-stationary deconvolution. The iteratively reweighted least squares (IRLS) algorithm is a common technique for solving this kind of problems in geophysics. However, automatic determination of the regularization parameter in each iteration of IRLS is not an easy task and making the algorithm inefficient. Here, we extend the recently developed method, called iterative reweighted and rrefined least squares (IRRLS) method, for treating seismic deconvolution and propose a new scheme based on the secant method for automatic update of the regularization parameter in each iteration.

Introduction

According to the convolutional model of the Earth, a seismic signal can be modeled as convolution of the source generated wavelet (w) with the Earth impulse response. The Earth impulse response contains the reflectivity information of the layer boundaries and the elasticity effects of the medium such as attenuation, absorption, etc. The aim of non-stationary seismic deconvolution is to recover information about subsurface from non-stationary seismic signals by solving a multi objective non-linear optimization. Solving this optimization without any prior information about w and attenuation (Q) will be impossible. There are some methods for estimating w and Q from surface seismic data. In the case of known Q and w, the problem changes to a linear optimization with non-linear cost function. The IRLS is a popular method in geophysics for solving this kind of non-linear cost functions but it can be time consuming when there is no information about the noise bound. An alternative IRRLS has been proposed that solves non-linear cost functions iteratively. Furthermore, an automatic algorithm has been developed for updating the regularization parameter at each iteration.

Methodology and Approaches

We follow a strategy, ensuring that regularization parameter at iteration $k+1$ (λ^{k+1}) is closer to a root of the nonlinear equation $\left\|y-Gr^{k+1}\right\|_p^p=\delta$, where y is the attenuated trace, G is non-stationary deconvolution operator and r^{k+1} is the solution of the IRRLS algorithm at the $k+1$ iteration. We can use the Newton's role of root finding to move regularization parameter toward the root of $\left\|y-Gr^{k+1}\right\|_p^p=\delta$. However, Newton's role of root finding needs to exact computation of the derivative, and it is time consuming for the IRRLS algorithm. Therefore, we use an approximation of the derivative by replacing it by the tangent of a secant line passing through points $\left\{\lambda^k, \left\|y - Gr^k\right\|_p^p\right\}$ and $\left\{\lambda^0, \left\|y - Gr^0\right\|_p^p\right\}$.

Results and Conclusions

We have proposed a method, based on the IRRLS and secant method of root finding, for high resolution constrained non-stationary deconvolution. Numerical examples from simulated results confirmed that the proposed method is not sensitive to the initial parameters and provide high-resolution estimates of seismic reflectivity series.