Archive of SID

JRAG
نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی
دوره ۵، شماره ۲، ۱۳۹۸، صفحات ۱۹۳–۲۰۵
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/JRAG.2017.856

تخمین موجک و واهامیخت داده‌های لرزه‌ای با استفاده از روش بازیابی فاز

سپیده وفائی شوشتری [1*] و علی غلامی [2]

۱- کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران
۲- دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۷

* نویسنده مسئول مکاتبات: s.vafaei@ut.ac.ir

واژگان کلیدی

بازیابی فاز
واهامیخت کور
موجک لرزه‌ای
فاز آمیخته
طیف دامنه فوریه
پاسخ ضربه زمین
تخمین موجک

چکیده

داده حاصل از عملیات لرزه‌نگاری در مقایسه با سایر روش‌های ژئوفیزیکی می‌تواند اطلاعات بیش‌تری از زیر سطح زمین ارائه کند و به همین دلیل لرزه‌نگاری در اکتشافات نفت و گاز از اهمیت بالایی برخوردار است. واهامیخت موجک و یا چشمه یکی از با اهمیت‌ترین مراحل در پردازش داده لرزه‌ای است که برای افزایش قدرت تفکیک زمانی مقاطع لرزه‌ای به یک موجک با ساختار صحیح نیازمند است؛ اما تخمین درست یک موجک لرزه‌ای به شدت تحت تأثیر پیچیدگی‌های فازی موجک است. خصوصیات آماری سری بازتاب زمین باعث می‌شود اطلاعات طیف دامنه فوریه موجک چشمه را بتوان از داده‌های ثبت شده محاسبه نمود و در نتیجه اطلاعات فازی موجک در حالت‌های خیلی ساده نظیر بیشینه یا کمینه فاز بودن را قابل محاسبه می‌نماید. این امر موجب شده که فرض کمینه فاز بودن موجک چشمه در لرزه‌نگاری بسیار مرسوم شود. در حالی که این فرض در بیشتر اوقات درست نیست. در این مقاله با تخمین یک طیف دامنه هموار برای موجک لرزه‌ای، اقدام به انجام فرآیند واهامیخت داده‌ها بر اساس الگوریتم بازیابی فاز به منظور تخمینی از پاسخ ضربه زمین خواهیم نمود. در واقع بر خلاف روش‌های واهامیخت مرسوم تنها از وارون‌سازی طیف دامنه فوریه داده‌ها بهره گرفته می‌شود. در گام بعدی با واهامیخت پاسخ ضربه محاسبه شده از داده‌ها تخمین صحیح‌تری از موجک با فاز دلخواه را خواهیم داشت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با داده‌های شبیه‌سازی شده و میدانی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر است موجک‌های با فاز آمیخته را با دقت بالایی استخراج نماید. از دیگر خصوصیات بارز این روش تخمین همزمان پاسخ ضربه زمین یا سری بازتابی زمین است. لذا الگوریتم ارائه شده در اینجا نوعی واهامیخت کور محسوب می‌شود؛ به طوری که سری بازتاب و موجک چشمه به طور همزمان تخمین زده می‌شوند.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

در لرزه‌نگاری بازتابی، یک موج آکوستیک با طول کوتاه به داخل زمین فرستاده شده و انرژی بازتاب شده در نتیجه‌ی تغییرات امپدانس لایه-های زمین اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از تعداد زیادی چشمه و گیرنده قرار داده شده در نقاط مختلف سطح، یک مقطع دو یا سه بعدی از زیر سطح زمین به صورت یک تصویر حاصل خواهد شد.

پس از یک سری مراحل پردازشی مشخص و فرض‌های ساده‌سازی مربوط به مسئله، لرزه‌نگاشت ثبت شده در گیرنده‌ها، می‌تواند به عنوان هامیخت (convolution) یک بعدی موجک چشمه که به طور معمول نامتغیر با زمان و مکان در نظر گرفته می‌شود و ناشناخته است، با تابع بازتاب که پاسخ ضربه زمین را تعریف می‌کند، در نظر گرفته شود. باید توجه داشت که لرزه‌نگاشت‌ها آلوده به نوفه تصادفی هم می‌باشند (Robinson and Treitel, 1980). یک چشمه لرزه‌ای معمول، موجک با طول محدودی را تولید می‌کند؛ که به عنوان یک فیلتر میان-گذر عمل کرده و قدرت تفکیک داده ثبت شده را کاهش می‌دهد. برای افزایش تفکیک‌پذیری و تشخیص بازتاب‌های بسیار به هم نزدیک، به طور معمول از عمل واهمامیخت (deconvolution) استفاده می‌شود؛ که بتوان تا حد زیادی اثرات موجک مذکور را از روی داده ثبت شده از بین برد. بنا بر دلایل متعددی مانند جذب فرکانس-های بالا، پدیده شبه در گیرنده‌ها و عوامل دیگر، موجک مؤثر به طور عمده ناشناخته است و لازم است که همراه با سری بازتاب تخمین زده شود. با مجهول بودن هم موجک چشمه لرزه‌ای و هم سری ضرایب بازتاب زمین، با واهمامیخت نوع کور (blind deconvolution) مواجه‌ایم؛ که هر دو مجهول باید در طی مراحل حل مسئله به دست آیند. این نوع از فرآیند واهمامیخت در مقایسه با فرآیند واهمامیختی که در آن موجک چشمه به عنوان یکی از اطلاعات معلوم اولیه مشخص است، به مراتب مشکل‌تر خواهد بود؛ بنابراین، مسئله مطرح شده در اینجا به شدت بد وضع (ill-posed) بوده و برای به دست آوردن پاسخ یکتای آن باید از یک سری اطلاعات از پیش تعیین شده بهره گرفت.

روش‌های مرسوم واهمامیخت اغلب بر پایه‌ی فرض توزیع گوسی برای هر دوی سری ضرایب بازتاب و نوفه موجود در داده‌ها می‌باشند. این امر باعث می‌شود که مسئله با محاسبات ساده‌تر و از طریق روش-های خطی مانند فیلتر وینر (Wiener filtering) و یا واهمامیخت واریانس کمینه حل شود (Wiener, 1949; Mendel, 1983)؛ اما این نکته قابل ذکر است که فرض گوسی بودن سری ضرایب بازتاب، فرض صحیحی برای تُنُکی (Sparsity) که به واقعیت لایه‌بندی زمین نزدیک است، نیست و بر اساس این فرض، میزان تفکیک‌پذیری، میزان قابل بهبودی نخواهد بود. علاوه بر این یک توزیع گوسی برای سری ضرایب بازتاب، اجازه نخواهد داد که فاز موجک تخمین زده شود و بنابراین فرض کمینه فاز بودن که در اغلب موارد فرض نادرستی است، به طور رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش هوموروفیک (Homomorphic) می‌تواند فاز موجک را به دست آورد؛ اما حساسیت آن نسبت به نوفه موجود در داده بسیار بالا است (Tribolet, 1979). روش‌هایی که بر پایه‌ی آمار مرتبه بالا (Higher order statistics) هستند، قادر خواهند بود که موجک را زیر نظر فرضیاتی مانند پایایی، سفید بودن و توزیع تصادفی غیر گوسی برای سری ضرایب بازتاب، تخمین بزنند (Sacchi and Ulrych, 2000). این گونه روش‌ها از نظر تئوری، خصوصیات صحیحی را وارد مراحل حل مسئله می‌کنند؛ اما اغلب از نظر محاسباتی پیچیده هستند و به حجم داده زیادی احتیاج دارند؛ تا تخمین‌های مورد قبولی را ارائه دهند.

در یک بررسی جامع‌تر، می‌توان روش‌های تعبیه شده برای انجام فرآیند واهمامیخت کور را به دو دسته روش‌های ترتیبی و همزمان طبقه‌بندی کرد. در روش واهمامیخت ترتیبی، ابتدا موجک چشمه از طریق یکی از روش‌های تخمین موجک به دست آورده می‌شود و سپس در ترکیب با روش‌های مرسوم واهمامیخت از موجک تخمین زده شده استفاده می‌شود تا سری ضرایب بازتاب زمین، بازیابی شود (Taylor et al., 1979). هرچند باید به این نکته توجه داشت که بیشتر روش‌های تخمین موجک بر پایه روش‌های آماری می‌باشند (Sacchi and Ulrych, 2000; Ulrych et al. 1995) و در مورد تخمین فاز موجک مورد نظر دارای محدودیت هستند. روش‌هایی که تاکنون برای تخمین موجک صورت گرفته را می‌توان در سه گروه روش‌های آماری، استفاده از داده‌های چاه‌نگاری (Edgar and Van der Baan, 2011) و اندازه‌گیری موجک چشمه لرزه‌ای همزمان با انفجار و گسترش در زمین قرار داد. از میان این روش‌ها، روش سوم برای چشمه‌های لرزه‌ای مانند ویبراتورهای خشکی و چشمه‌های لرزه‌ای دریایی میسر بوده است و برای اندازه‌گیری موجک که چشمه لرزه‌ای آن دینامیت است، حتماً باید فرض کمینه فاز بودن موجک در آن لحاظ شود (Ziolkowski, 1991). در روش‌های آماری نیز با سه فرض اساسی برای حل این مسئله سروکار داریم؛ که شامل سفید بودن طیف پاسخ زمین، تصادفی بودن سری بازتاب زمین و کمینه فاز بودن موجک لرزه‌ای می‌باشند (Ziolkowski, 1991). علاوه بر این، پیاده‌سازی این روش‌ها در موارد داده واقعی که با نوفه و اطلاعات ناکافی همراه هستند، با مشکل روبرو خواهند بود. در روش‌های همزمان واهمامیخت کور نیز هر دو مجهول موجک و سری بازتاب به طور همزمان و به صورت روش‌های تکرارپذیر تا حد یک خطای معین و با توجه به نوع الگوریتم مورد استفاده و فرض‌های اولیه در نظر گرفته شده برای مجهولات مسئله، تخمین زده می‌شوند (Gholami and Sacchi, 2013;

www.SID.ir

Archive of SID

Heimer and Cohen, 2009; Kaaresen and Taxt, 1998)؛ بنابراین ژئوفیزیکدانان همواره با موانع، فرض‌ها و محدودیت‌هایی در روش‌های واهامیخت کور و تخمین صحیح سری بازتاب زمین و موجک چشمه لرزه‌ای روبرو بوده‌اند.

در این مقاله، الگوریتم پیشنهاد شده تحت عنوان بازیابی فاز، تنها از طریق وارون‌سازی طیف دامنه داده لرزه‌ای ثبت شده به حل مسئله واهامیخت پرداخته می‌شود (Gholami, 2014). در یک گام، با استفاده از الگوریتم انقباض و آستانه‌گذاری سریع به روش تکرار (Fast Iterative Shrinkage Algorithm)، سری ضرایب بازتاب به دست می‌آید و در گامی دیگر با استفاده از سری حاصل، موجک چشمه لرزه‌ای دارای اطلاعات ساختاری صحیح، تخمین زده خواهد شد. بنابر روش مذکور، هیچ‌گونه محدودیتی برای فاز موجک تخمینی در نظر گرفته نمی‌شود و تمامی موجک‌ها با فازهای صفر، کمینه، بیشینه و آمیخته با دقت بالایی قابل بازیابی می‌باشند. در نتیجه فرآیند واهامیخت و در نظر گرفتن مدل لایه‌ای برای زمین مورد مطالعه، قدرت تفکیک زمانی مقاطع لرزه‌ای مورد پردازش افزایش خواهد یافت. در نهایت، کارایی مؤثر روش تعبیه شده در داده‌های شبیه‌سازی شده و میدانی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- تئوری مسئله

مسئله واهامیخت موجک و یا چشمه یکی از با اهمیت‌ترین مسائل در کاربردهای لرزه‌شناسی است. فرآیند واهامیخت در درجه اول برای افزایش قدرت تفکیک زمانی کاربرد داشته است که یکی از ملزومات اعمال آن بر روی مقاطع لرزه‌ای، داشتن یک موجک با ساختار صحیح است. در روش‌های آماری واهامیخت لرزه‌ای، موجک از خود داده لرزه‌ای تخمین زده می‌شود، هرچند آسان‌تر است که طیف دامنه آن را محاسبه نمود (Yilmaz, 2001) و فاز موجک به طور معمول از دست داده می‌شود و یا به صورت نادرستی وارد مسئله می‌شود.

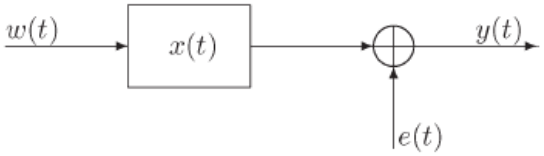
این موضوع، واهامیخت موجک‌های دارای ساختار و فاز آمیخته را مشکل‌سازتر می‌کند. تاکنون تحقیقات زیادی در مورد استخراج یک موجک لرزه‌ای قابل اعتماد و صحیح از داده برداشت شده، صورت گرفته است تا بتوان مسئله واهامیخت لرزه‌ای را پیاده‌سازی کرد (Gholami and Sacchi, 2013; Van der Baan and Pham, 2008).

در این بخش با بیان تئوری روش بازیابی فاز زیر نظر فرضیاتی که یکی از آن‌ها پایایی (stationarity) موجک چشمه است، واهامیخت موجک‌های دارای ساختار پیچیده، مورد آزمایش و بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱- مدل هامیختی زمین

مدل هامیختی (Convolutional Model) یک لرزه‌نگاشت بازتابی تنها برای یک چشمه نقطه‌ای ظاهر می‌شود و فرض اساسی در این مدل «خطی بودن» است. این مدل حاصل هامیخت موجک چشمه با پاسخ ضربه زمین است که پاسخ ضربه زمین خود در نتیجه تابع گرین (Green function) است. در اندازه‌گیری‌های فیزیکی، لرزه‌نگاشت ثبت شده $y(t)$، پاسخ زمین به یک موجک با باند فرکانسی محدود که توسط یک چشمه لرزه‌ای تولید شده است، است.

یک چشمه ایده آل چشمه‌ای است که موجک اسپایکی با پهنای صفر ایجاد کند. هرچند در عمل چنین تابع چشمه‌ای نمی‌تواند تولید شود. به لحاظ ریاضی، $y(t)$ به عنوان هامیخت موجک $w(t)$ با سری بازتاب زمین $x(t)$ مدل‌سازی می‌شود که در واقع $x(t)$ تضاد امپدانس (Impedance) بین لایه‌های مختلف زمین-شناسی را مشخص می‌کند و سرانجام مدل حاصل به نوفه افزودنی $e(t)$ که لزوماً دارای توزیع گوسی نیست، آغشته می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱: مدل هامیختی. لرزه‌نگاشت $y(t)$ شامل پاسخ ضربه زمین $x(t)$ است؛ که با موجک چشمه $w(t)$ هامیخت شده و به مقداری نوفه گوسی $e(t)$ آلوده شده است (Gholami and Sacchi, 2012).

در عمل، لرزه‌نگاشت برداشت شده یک بردار ستونی گسسته y با طول محدود است که $y_n = y(n\Delta T)$ برای $n = 0,1,...,N-1$ و بازه نمونه‌برداری Δt تعریف می‌شود. در صورتی‌که محور زمان بر اساس بازه نمونه‌برداری یکسان Δt گسسته‌سازی شود، مدل هامیختی به صورت رابطه (۱) بیان می‌گردد:

$$y_n = \sum_{m=0}^{N-1} w_{n-m} x_m + e_n \qquad (۱)$$

در معادله فوق، حد بالای انتگرال بر اساس طول زمانی برداشت شده جایگذاری می‌شود. فرض اساسی که برای نوع توزیع نوفه موجود در مسئله در نظر گرفته شده است، توزیع گوسی است. در صورتی که شکل ماتریسی مدل هامیختی را مورد بررسی قرار دهیم، آنگاه معادله (۲) را در حوزه زمان خواهیم داشت.

$$y = G\,x + e \qquad (۲)$$

که در آن ماتریس G به صورت $G=F^{-1}WF$ یک ماتریس چرخشی (circulant) برای موجک w به شمار می‌آید و $W = \mathrm{diag}(\hat{w})$ یک ماتریس قطری است؛ که طیف دامنه موجک w بر روی قطر اصلی آن قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که $\hat{w}$ طیف فوریه موجک لرزه‌ای و عملگرهای F و F^{-1} نیز به ترتیب ماتریس

www.SID.ir

Archive of SID

عملگرهای گسسته فوریه و وارون فوریه می‌باشند (Gholami and Sacchi, 2012). در واقع ماتریس G، به نوعی ارائه‌ای گسسته از انتگرال همامیخت برای سیگنال‌های نمونه‌برداری شده است؛ که در اینجا به عنوان عملگر همامیختی متشکل از موجک لرزه‌ای پایا که در همه‌ی زمان‌ها دارای ساختار و دامنه‌ی یکسانی است، خواهد بود.

۲-۲- بازیابی سری بازتاب زمین

می‌توان بیان کرد که واهامیخت یکی از روش‌های معمول در پردازش داده‌های لرزه‌ای است. در واقع، سیگنال‌ها و تصاویر متعددی می‌توانند در نتیجه همامیخت یک سیگنال دلخواه مجهول با کرنل مات‌کننده (Blurring kernel) باشند. به طوری که عمل پردازشی که این امکان را فراهم می‌سازد تا تأثیرات این کرنل از روی سیگنال یا تصویر مشاهده شده برداشته شود به عمل واهامیخت معروف است. واهامیخت پایا بر پایه مدل همامیختی که در رابطه (۲) توضیح داده شد، خواهد بود. از آن‌جایی که این مدل همامیختی تنها یک متغیر معلوم و مشخص دارد که همان لرزه‌نگاشت ثبت شده است، پس دارای دو مجهول است؛ که شامل موجک و سری بازتاب زمین خواهند بود.

بسیاری از روش‌های واهامیخت ارائه شده برای بازیابی سری ضرایب بازتاب زمین و با فرض یک توزیع گوسی تعمیم یافته برای x و e جواب تقریبی $\tilde{x}$ را به عنوان کمینه کننده تابع هزینه به شکل زیر تعریف می‌کنند:

$$\tilde{x} = \arg\min_{x} \left\{ \|y - Gx\|_p^p + \lambda \|x\|_q^q \right\} \qquad (۳)$$

در تابع هزینه مطرح شده، بخش $\|y - Gx\|_p^p$ بخش تطابق با داده یا همان بخش خطا را بیان می‌کند؛ که با توجه به اطلاعات اولیه‌ای در مورد خصوصیات نوفه‌ی موجود در داده‌ها تعیین می‌شود. بخش $\|x\|_q^q$ به طور معمول ناهمواری‌های جواب به دست آمده از مسئله را اندازه‌گیری کرده و به عنوان یک بخش منظم‌سازی ایفای نقش می‌کند. از نقطه نظر منظم سازی، $\tilde{x}$ جواب یکتای معادله (۲) است که بخش منظم‌ساز رابطه (۳) را برآورده می‌کند و پارامتر λ ضریب متناظر با بخش منظم‌ساز است؛ که به عنوان پارامتر منظم‌سازی (Regularization parameter) شناخته می‌شود.

تابع هزینه مطرح شده (۳) یک مسئله تشکیل شده از نرم‌های متفاوت p و q $(p,q>0)$ است که کمینه‌سازی آن به شدت به مقادیر p و q بستگی دارد. برای یک بردار مشخص $v \in R^N$، نرم p بردار به صورت $\|V\|_p^p = \sum_i |v_i|^p$ محاسبه می‌شود.

اکنون ما در مسئله خود به عنوان واهامیخت به روش بازیابی فاز، به دنبال یافتن الگوریتم مؤثری هستیم؛ که تُنُک‌ترین سری بازتاب زمین را تنها با استفاده از طیف دامنه داده مشاهده شده به دست آورده (Gholami, 2014) و سپس در گام بعدی، با استفاده از سری بازتاب حاصل، موجک چشمه لرزه‌ای تخمین زده می‌شود. دلیل اصلی بازیابی سری بازتاب زمین بر اساس واهامیخت تُنُک این است که مدل صحیح بازتاب‌های زمین می‌تواند بر طبق برهم نهی مجموعه‌ای از اسپایک‌ها در نظر گرفته شود که با واقعیت مدل زمین سازگاری بیشتری دارد. به بیان دیگر، علاقه‌مند به مدل زمینی هستیم که شامل حداقل تعداد لایه‌های زمین‌شناسی باشد؛ بنابراین با فرض تُنُک بودن سری بازتاب $q = 1$ و همچنین با فرض گوسی بودن توزیع نوفه $p = 2$ در نظر گرفته می‌شوند و بر اساس مسئله بازیابی فاز، تابع هزینه برای مسئله واهامیخت به صورت رابطه (۴) تغییر پیدا می‌کند.

$$\tilde{x} = \arg\min_{x} \left\{ \left\| |\hat{y}| - |FGx| \right\|_2^2 + \lambda \, \mathrm{Reg}(x) \right\} \qquad (۴)$$

در تابع هزینه فوق که بر اساس آن $\tilde{x}$ مدل سری بازتاب زمین تنها از روی طیف دامنه مشاهدات تخمین زده می‌شود، $|\hat{y}|$ بیانگر طیف دامنه داده مشاهده شده، F عملگر فوریه، G عملگر همامیخت، λ پارامتر منظم‌سازی و Reg تابع منظم‌سازی است؛ که وظیفه آن فراهم کردن قیدهای ساختاری لازم برای مسئله است؛ بنابراین هیچ‌گونه اطلاعات فازی در مورد موجک چشمه را وارد مسئله نکرده‌ایم (Gholami, 2014).

قیدی که برای منظم‌سازی مسئله سری بازتاب در نظر گرفته می‌شود، بر پایه تُنُکی خواهد بود. در واقع، برای انجام فرآیند واهامیخت تک‌کاناله (single-channel deconvolution)، تابع منظم‌سازی را به صورت $\mathrm{Reg}(x) = \|x\|_1$ تعریف کرده که تابع منظم‌ساز نرم-۱ است. تابع proximity مربوط به این مسئله هم از طریق رابطه (۵) قابل محاسبه است:

$$prox_{\lambda}(x) = \mathrm{sgn}(x) \max\left(|x| - \lambda, 0\right) \qquad (۵)$$

در واقع فاز یک سیگنال، اطلاعات ساختاری آن را دربردارد و به این ترتیب خطاهای فازی به طور معناداری تأثیرات الگوریتم‌های پردازشی را با محدودیت مواجه می‌کند. مسئله واهامیخت موجک نیز که در آن سعی بر افزایش قدرت تفکیک قائم داده است، از جمله مسائلی است که با از دست دادن اطلاعات فاز همراه خواهد بود. بازیابی فاز، اصلی‌ترین و پیچیده‌ترین گام در این مسئله است به دلیل این‌که یک سیگنال بر اساس طیف دامنه و طیف فاز آن تعریف می‌شود که این دو مستقل از هم هستند و نمی‌توان یکی را از روی دیگری بازیابی کرد؛ بنابراین مسئله اصلی که در اینجا مطرح است، معکوس‌سازی تنها طیف دامنه است که به آن مسئله بازیابی فاز (phase retrieval) گفته می‌شود. بازیابی فاز یک مسئله غیر محدب است و برای حل این مسئله تابع هزینه را به صورت رابطه (۴) تعریف می‌کنیم که وظیفه بخش منظم‌ساز محدودیت‌های ساختاری است که برای حل مسئله ضروری است تا جواب به دست آمده به مدل واقعی

www.SID.ir

Archive of SID

نزدیک باشد. برای حل این مسئله بهینه‌سازی، از روش انقباض و آستانه‌گذاری سریع به روش تکرار (FISTA) که مراحل تکرار آن در جدول ۱ آورده شده است، استفاده می‌شود تا علاوه بر سهولت محاسبات، همگرایی به جواب، با سرعت بیش‌تری صورت گیرد (Beck and Teboulle, 2009).

جدول ۱: الگوریتم FISTA برای مسئله بازیابی فاز.

A FISTA for phase retrieval problem
1) Initialize: given x^0, set $\alpha^0 = 1$ and $u^0 = x^0$
2) **for** $j \leftarrow 1$ to maximum iteration **do**
3) $\gamma \leftarrow \frac{j}{j\rho(G^TG)+1}$
4 $x^{j+1} \leftarrow prox_{\gamma\lambda}(u^j - \gamma G^T F^{-1}\mathrm{diag}\left(1-\frac{b}{\lvert FGu^j\rvert}\right)FGu^j$
5) $\alpha^{j+1} \leftarrow \frac{1+\sqrt{1+4\alpha^j\times\alpha^j}}{2}$
6) $u^{j+1} \leftarrow x^{j+1} + \frac{\alpha^j-1}{\alpha^{j+1}}(x^{j+1}-x^j)$
7) **end**

لازم به ذکر است که در عمل، با لرزه‌نگاشت‌های متعددی سروکار داریم که نمونه‌های گسسته از یک میدان موج دو یا سه بعدی هستند. هم‌چنین، مدل بازتاب دلخواه نیز یک تابع دو یا سه بعدی است؛ بنابراین، واهامیخت رد لرزه به رد لرزه به مدل بازتابی نتیجه می‌شود؛ که جواب مطلوبی نیست به دلیل اینکه ارتباط مکانی اطلاعات موجود در داده را در نظر نمی‌گیرد. بدین منظور برای پیاده‌سازی واهامیخت چندکاناله (multi-channel deconvolution) تابع منظم‌ساز جدیدی را به صورت رابطه (۶) تعریف می‌کنیم و آن را با بخش منظم‌ساز تابع هزینه (۴) جایگزین خواهیم نمود.

$$\mathrm{Reg}(x) = (1-\beta)\|x\|_1 + \beta \mathrm{TV}_2(x) \qquad (۶)$$

که در رابطه فوق، بخش $\mathrm{TV}_2(x)$ تابع تغییرات کلی مرتبه دوم است. پارامتر $0 \le \beta \le 1$ دومین پارامتر منظم‌سازی است که وظیفه آن برقراری تعادل میان دو بخش منظم‌سازی که همان تُنُکی در راستای زمانی و پیوستگی در راستای جانبی است، خواهد بود. هرچه مقدار β بزرگ‌تر باشد، پیوستگی موجود در لایه‌ها بیشتر ولی میزان تُنُکی لایه کمتر خواهد بود و برای مقدار β کوچک‌تر، تُنُکی لایه‌ها افزایش و میزان پیوستگی کاهش خواهد یافت. مقدار مناسب برای پارامتر β به روش آزمایش و خطا به دست می‌آید.

تغییرات کلی یکی از روش‌های معمول منظم‌سازی است که برای حفظ کردن ناپیوستگی‌های شدید در جواب منظم یافته استفاده می‌شود. علت اصلی استفاده از $\mathrm{TV}_2(x)$ برای بازیابی سری بازتاب در این است که با نرم اقلیدسی مشتق دوم جهت‌دار مدل بر اساس رابطه (۷) نسبت دارد و برای هموار کردن مدل در راستای بازتاب‌ها از کارایی بالایی برخوردار است.

$$\mathrm{TV}_2(x) = \sum_i \sqrt{[D_{xx}x]_i^2 + 2[D_{xy}x]_i^2 + [D_{yy}x]_i^2} \qquad (۷)$$

که در رابطه بالا، D_{ij} ها، عملگرهای مشتق‌گیری مرتبه دوم در راستاهای i و j می‌باشند. برای حل تابع هزینه مربوطه به واهامیخت چندکاناله که در این بخش مطرح شد، از الگوریتم تکرارپذیر شکافت برگمن (split Bregman) استفاده می‌شود؛ که قادر است مؤلفه‌های نرم-۱ و نرم-۲ تابع هزینه مورد نظر را از هم جدا کرده و به صورت ساده‌تری به حل مسئله بپردازد (Gholami and Sacchi, 2013).

۲-۳- تخمین موجک لرزه‌ای

در این بخش با استفاده از سری بازتاب حاصل از واهامیخت به روش بازیابی فاز، به تخمین موجک لرزه‌ای که اطلاعات صحیح فازی را دربردارد، پرداخته می‌شود. برای به دست آوردن یک موجک هموار از تابع هزینه (۸) که از خانواده توابع منظم‌ساز تیخونف (Tikhonov) محسوب می‌شود، استفاده خواهد شد.

$$\tilde{w} = \arg\min_w \left\{\|y - Gw\|_2^2 + \lambda\|Lw\|_1\right\} \qquad (۸)$$

که w موجک تخمینی، y داده مشاهده شده، L ماتریس تنک مشتق‌گیری متشکل از مرتبه‌های متفاوت و G عملگر هامیخت ساخته شده از سری بازتاب تخمین زده شده به روش بازیابی فاز می‌باشند. گویی موجک در حوزه مشتقات تعریف شده، تُنُک در نظر گرفته شده است. برای حل تابع هزینه (۸) از روش تکرار کمترین مربعات وزن‌دهی شده (IRLS) که در جدول ۲ آورده شده است، استفاده می‌شود.

در این الگوریتم، I بر ماتریس همانی $N \times N$ دلالت می‌کند و Q ماتریس وزن‌دهی به صورت قطری است؛ که ورودی‌های قطر آن به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شوند:

$$Q^{j+1}[i,i] = \frac{1}{\sqrt{\left(L w^j[i]\right)^2 + \varepsilon}} \qquad (۹)$$

پس از بازیابی موجک دارای ساختار صحیح می‌توان از موجک حاصل استفاده کرده و با بهره‌گیری از روش‌های مرسوم واهامیخت تُنُک در حوزه زمان، سری بازتاب را با دقت بالاتری به دست آورد.

جدول ۲: الگوریتم IRLS برای بازیابی موجک.

IRLS algorithm for recovering the wavelet
1) Initialize: set $Q^0 = 1$ and λ
2) **for** $j \leftarrow 1$ to maximum iteration **do**
3) Solve $w^{j+1} = (G^TG + \lambda L^TQ^{j+1}L)^{-1}G^Ty$
4) Compute Q^{j+1} according to equation (9)
5) **end**

www.SID.ir

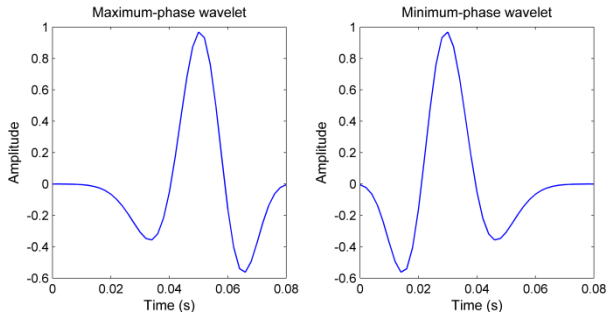
Archive of SID

۳- مثال‌های عددی

۳-۱- داده‌های شبیه‌سازی شده

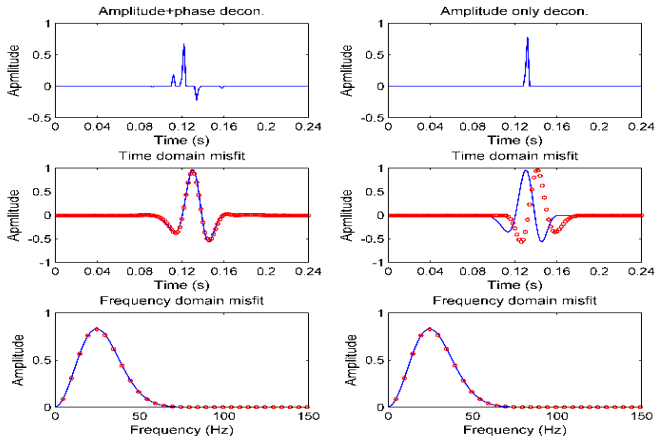
در شکل ۲-الف، تابع چشمه به صورت یک موجک ریکر بیشینه فاز در نظر گرفته شده؛ که با استفاده از معادل کمینه‌ی آن‌که در شکل ۲-ب آورده شده است، عمل واهامیخت پیاده‌سازی می‌شود. نتایج حاصل از این واهامیخت به دو روش مرسوم در حوزه زمان و بازیابی فاز به ترتیب در ستون‌های الف و ب شکل ۳ نشان داده شده است. در هر دو ستون، شکل‌های مربوط به سطر اول، سری بازتاب حاصل از فرآیند واهامیخت، شکل‌های مربوط به سطر دوم، تطابق اطلاعات فازی سیگنال اولیه و بازسازی شده و شکل‌های مربوط به سطر سوم، تطابق اطلاعات دامنه سیگنال اولیه و بازسازی شده را نشان می‌دهند. همان‌طور که از روی نتایج مشهود است، واهامیخت مرسوم که بر اساس وارون‌سازی اطلاعات هم طیف فاز و هم طیف دامنه سیگنال و با اعمال قید منظم‌ساز نرم-۱ صورت می‌گیرد، از فشرده‌سازی موجک تا حد یک اسپایک بازمانده است به دلیل این‌که به سری بازتاب نیاز دارد تا وقتی از فیلتر کمینه فاز عبور می‌کند، ساختار چشمه را منطبق سازد؛ به عبارت دیگر، این نوع واهامیخت، سری بازتاب تُنُک را در ازای پیش‌بینی و تطابق هر دوی طیف دامنه و طیف فاز به دست خواهد آورد. در حالی‌که روش بازیابی فاز آورده شده در جدول ۱، موجک را به خوبی تا حد یک اسپایک فشرده می‌سازد بدون این‌که به اطلاعات ساختاری آن نیاز داشته باشد و تنها طیف دامنه را منطبق می‌کند.

در شکل ۴-الف یک سری بازتاب تنک دارای ۵۱۲ نمونه زمانی شامل ۱۰ اسپایک با دامنه‌های متفاوت، با یک موجک برلگ دارای فرکانس ۵۰ هرتز و بازه نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه نشان داده شده در شکل ۴-ب به رنگ آبی که از خصوصیات آن داشتن فاز آمیخته است، هامیخت شده و سپس ۵ درصد نوفه تصادفی به آن افزوده شده است تا لرزه‌نگاشت شبیه‌سازی شده آورده شده در شکل ۴-د را تولید کند. با فرض این‌که فاز موجک مذکور در دسترس نیست، الگوریتم بازیابی فاز پیاده‌سازی شده است. با توجه به شکل ۴-ه و وارون‌سازی تنها طیف دامنه داده، با منطبق کردن طیف دامنه داده بازسازی شده بر طیف دامنه داده اولیه، فاز آمیخته موجک با دقت بالایی تخمین زده شده است و موجک تخمینی نیز در شکل ۴-ب به رنگ قرمز مشاهده می‌شود.



(الف) (ب)

شکل ۲: الف: موجک ریکر بیشینه فاز. ب: موجک ریکر کمینه فاز.

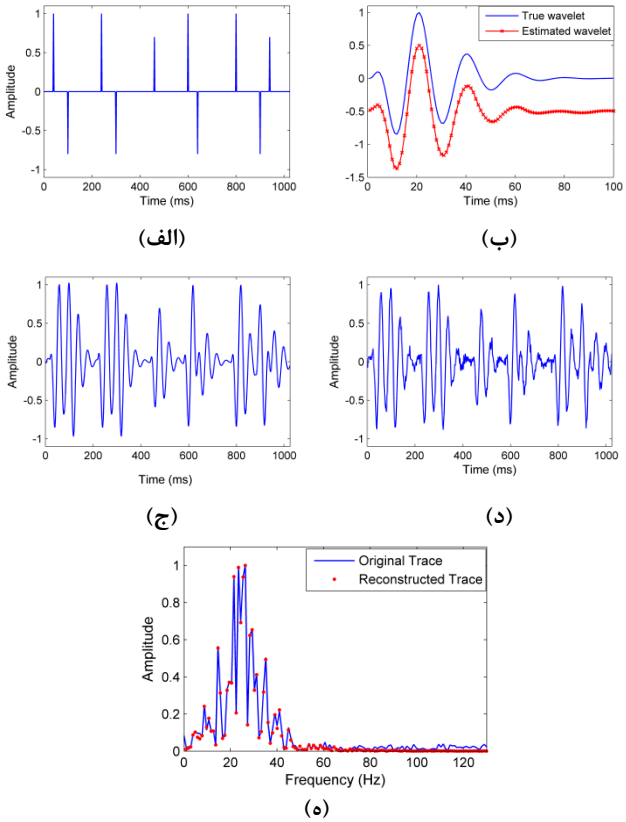


(الف) (ب)

شکل ۳: نتیجه واهامیخت موجک‌های شکل ۲ باهم. ستون چپ: واهامیخت به روش مرسوم در حوزه زمان. ستون راست: واهامیخت به روش بازیابی فاز.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴: تخمین موجک به روش بازیابی فاز. الف) سری بازتاب. ب) موجک صحیح و موجک تخمین زده شده به روش بازیابی فاز. ج) لرزه‌نگاشت حاصل از همامیخت سری بازتاب با موجک. د) لرزه‌نگاشت آغشته شده به ۵ درصد نوفه تصادفی. ه) انطباق سازی طیف دامنه داده اولیه با طیف دامنه داده بازسازی شده به روش بازیابی فاز.

سری بازتاب ارائه شده در شکل ۵-الف نتیجه وارون‌سازی فقط طیف دامنه با اجرای ۵۰۰ تکرار از الگوریتم بازیابی فاز و مقدار پارامتر منظم‌سازی $\lambda = 0.09$ است و در همین شکل، مکان دقیق ضرایب بازتاب مدل اصلی با دایره‌های آبی رنگ مشخص شده‌اند. در شکل ۵-ب طیف دامنه داده اولیه به رنگ آبی و طیف دامنه سری بازتاب تخمین زده شده به رنگ قرمز آورده شده است که به طور واضحی گویای حذف اثر کرنل مات کننده و افزایش پهنای باند فرکانسی داده پس از واهامیخت است. در شکل ۵-ج لرزه‌نگاشت بازسازی شده حاصل از سری بازتاب و موجک تخمین زده شده به رنگ قرمز و برای مقایسه با داده اولیه که به رنگ آبی است، آورده شده است. همان‌طوری که انتظار می‌رود، داده بازسازی شده به جز در موارد خطا، انطباق خوبی را با داده اولیه نشان می‌دهد.

شکل ۶-الف یک مدل بازتاب شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که ابعاد این مدل به صورت $x \in R^{512\times512}$ است و برای تخمین موجک و واهامیخت لرزه‌ای از داده دوبعدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مدل شبیه‌سازی شده، فاصله نمونه‌برداری زمانی $dt = 2$ میلی‌ثانیه و فاصله نمونه‌برداری مکانی $dx = 20$ متر در نظر گرفته شده‌اند. مقطع حاصل از همامیخت مدل بازتاب مذکور با موجک برلگ (Berlage) که از جمله موجک‌های دارای ساختار و فاز پیچیده است، با فرکانس ۵۰ هرتز و بازه نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه نشان داده شده در شکل ۶-ه در شکل ۶-ب آمده است. در نهایت، شکل ۶-ج مقطع لرزه‌ای اصلی را نشان می‌دهد که با افزودن نوفه دارای توزیع گوسی با نسبت SNR=5(dB) (signal to noise ratio) به مقطع شکل ۶-ب، به دست آمده است. با تقریب زدن یک طیف دامنه هموار از روی طیف دامنه داده مشاهده‌ای، الگوریتم بازیابی فاز آورده شده در جدول ۱ پیاده‌سازی شده است. شکل ۶-د طیف دامنه بر حسب فرکانس را نشان می‌دهد که طیف آبی رنگ، طیف دامنه میانگین داده لرزه‌ای شبیه‌سازی شده و طیف قرمز رنگ از هموار کردن طیف آبی رنگ حاصل شده و به عنوان طیف دامنه موجک اولیه مورد استفاده قرار گرفته است. در نتیجه انجام فرآیند واهامیخت کور، موجک تخمین زده شده؛ که با تعداد ۲۰ تکرار از الگوریتم IRLS آورده شده در جدول ۲ و پارامتر منظم‌سازی $\lambda = 0.2$، حاصل شده است و همچنین مقطع بازتاب نوسازی شده؛ که بر اساس فاز صحیح موجک تخمینی شکل ۶-ی و تحت قید تُنُکی بازسازی شده است، به ترتیب در شکل‌های ۶-ی و ۶-و نمایش داده شده‌اند.

جهت بررسی پایداری روش تعبیه شده در حضور نوفه، برای

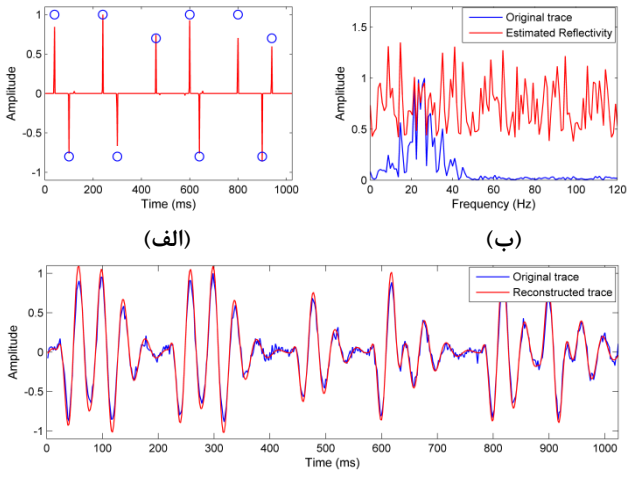
www.SID.ir

Archive of SID

تخمین موجک لرزه‌ای از مدل بازتاب شکل ۶-الف و موجک برلگ دارای فاز آمیخته شکل ۶-ه به همراه سطوح انرژی متفاوتی از مقدار نوفه افزوده شده به مقطع لرزه‌ای، استفاده شده است تا نسبت SNR برای مدل موجک به دست آمده، مورد ارزیابی قرار گیرد. کیفیت موجک تخمین زده شده بر حسب نسبت SNR (به دسی بل) به صورت زیر تعریف می‌شود:

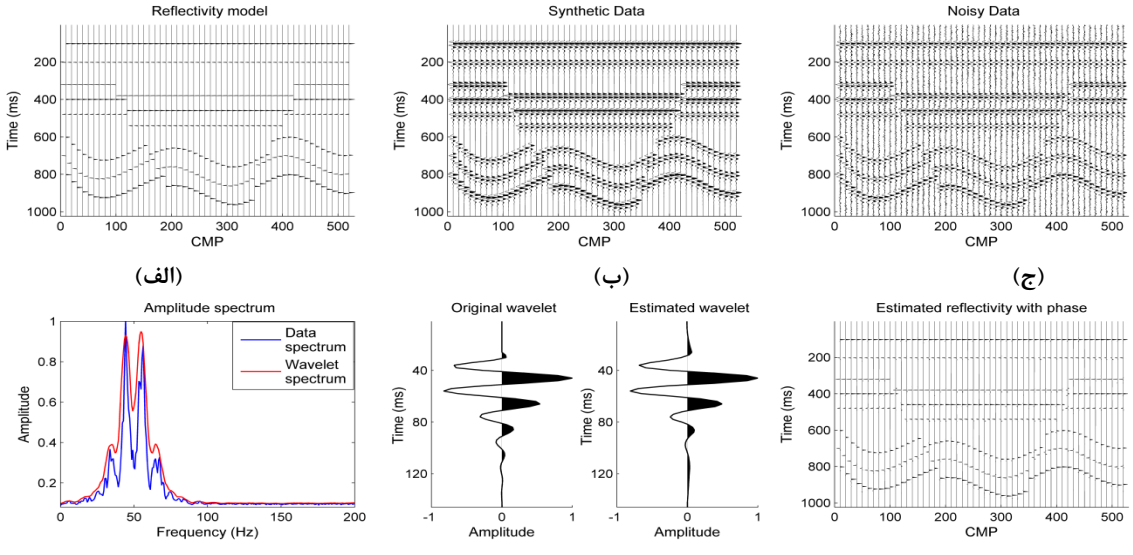
$$\mathrm{SNR} = 20\log_{10}\frac{\|\tilde{w}\|_2}{\|w-\tilde{w}\|_2} \qquad (۱۰)$$

که در رابطه (۱۰)، $\tilde{w}$ موجک تخمین زده شده به روش الگوریتم تعبیه شده و w موجک صحیح اولیه است؛ که مقطع لرزه‌ای مات را تولید کرده است. نمودار کیفیت موجک تخمین زده شده بر حسب نسبت سیگنال به نوفه داده لرزه‌ای برای موجک برلگ مذکور، در شکل ۷ آمده است؛ که تا نسبت SNR=0(dB) از سطح انرژی نوفه موجود در داده، موجک تخمینی از کیفیت قابل قبولی در مقایسه با مدل اصلی برخوردار است و از این نسبت، پایین‌تر، میزان کیفیت موجک تخمینی کاهش پیدا می‌کند.



(الف) (ب) (ج)

شکل ۵: الف) سری بازتاب حاصل از واهامیخت رد لرزه شکل ۴-د. ب) طیف فرکانس رد لرزه قبل و بعد از واهامیخت. ج) رد لرزه اصلی و بازسازی شده. رنگ آبی در همه شکل‌ها پارامتر اصلی را نشان می‌دهد.

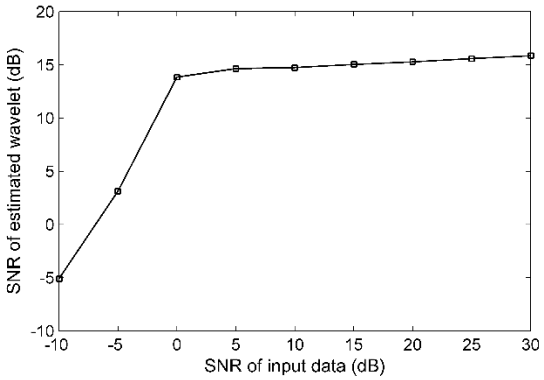


(الف) (ب) (ج) (د) (ه) (ی) (و)

شکل ۶: الف) مقطع بازتاب شبیه‌سازی شده. ب) مقطع لرزه‌ای. ج) مقطع لرزه‌ای نوفه‌دار با نسبت سیگنال به نوفه ۵ دسی بل. د) طیف دامنه داده و طیف دامنه موجک تخمینی. ه) موجک صحیح. ی) موجک تخمین زده شده. و) مقطع بازتاب تخمین زده شده نهایی.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷: نمودار بررسی پایداری روش پیشنهادی تخمین موجک در حضور میزان متفاوت نوفه.

۳-۲- داده میدانی

در این بخش، الگوریتم ارائه شده، مورد استفاده قرار گرفته است تا فرآیند واهامیخت کور بر روی یک برداشت دریایی نقطه میانی مشترک (CMP) با ابعاد $y \in R^{600\times180}$ پیاده‌سازی شود. هر لرزه‌نگاشت شامل ۶۰۰ نمونه زمانی است که فاصله نمونه‌برداری آن‌ها ۴ میلی‌ثانیه است. مختصات عمودی مربوط به زمان بر حسب ثانیه و مختصات افقی مربوط به دورافت بر حسب متر می‌باشند. در بحث لرزه‌نگاری اکتشافی منظور از زمان اشاره شده در اینجا، زمانی است که یک موج طولی در زمین سیر می‌کند؛ تا با یک سطح بازتاب برخورد کرده و پس از آن به سطح زمین بازگردد برای حالتی که چشمه و گیرنده لرزه‌ای، از نقاط شبکه‌ای یکسانی بر روی سطح عملیاتی بهره می‌گیرند.

برداشت نقطه میانی مشترک قبل از فرآیند واهامیخت در شکل ۸-الف، برداشت حاصل از واهامیخت بر اساس الگوریتم بازیابی فاز در شکل ۷-ب و برداشت حاصل از واهامیخت به روش مرسوم در حوزه زمان و با بهره‌گیری از موجک تخمین زده شده در شکل ۸-ج آمده است؛ که می‌توان به وضوح افزایش قدرت تفکیک زمانی و بهبود تصویرسازی لایه‌های نازک را در برداشت CMP پس از فرآیند واهامیخت مشاهده کرد.

موجک اولیه‌ای که برای ساختن عملگر واهامیخت در الگوریتم بازیابی فاز از آن بهره گرفته شده است؛ دارای فاز صفر و طیف دامنه نشان داده شده در شکل ۹-الف است. طیف دامنه موجک اولیه در واقع با هموارسازی طیف دامنه میانگین داده مشاهده‌ای که همان برداشت نقطه میانی مشترک قبل از واهامیخت است، تقریب زده شده است.

در بخش مقدمه به این موضوع پرداخته شد که در روش بازیابی فاز، بازیابی داده‌های لرزه‌ای تنها بر اساس وارون‌سازی طیف دامنه داده صورت می‌گیرد و بنابراین برای مسئله مورد نظر، به دنبال یافتن جوابی هستیم که طیف دامنه پیش‌بینی شده از داده بازسازی شده با طیف دامنه داده مشاهده‌ای با اختلاف بسیار جزئی مطابقت کند. در مثال برداشت نقطه میانی مشترک آورده شده، انطباق طیف دامنه داده بازسازی‌شده و طیف دامنه داده مشاهده‌ای در شکل ۹-ب نشان داده شده است؛ که طیف آبی رنگ، طیف دامنه مربوط به یک رد لرزه از برداشت نقطه میانی مشترک و نقطه‌چین‌های قرمز رنگ مربوط به طیف دامنه رد لرزه بازسازی شده از سری بازتاب تخمین زده شده با موجک اولیه است. همان‌طور که مشهود است، دو طیف تطابق بسیار بالایی را نشان می‌دهند. موجک لرزه‌ای استخراج شده از برداشت نقطه میانی مشترک شکل ۸-الف در شکل ۹-ج نشان داده شده؛ که دارای فاز و ساختار صحیح است.

علاوه بر این در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب به تحلیل طیف دامنه مربوط به لرزه‌نگاشتی از بخش میانی برداشت CMP و میانگین طیف دامنه تمامی لرزه‌نگاشت‌های برداشت، قبل و بعد از انجام فرآیند واهامیخت پرداخته شده است. در این دو شکل، رنگ آبی مربوط به طیف دامنه‌های داده قبل از واهامیخت و رنگ قرمز مربوط به طیف دامنه‌های داده پس از واهامیخت می‌باشند. همان‌طور که از روی شکل طیف‌ها مشخص است، گسترش پهنای باند فرکانسی محسوسی را در نتیجه پیاده‌سازی واهامیخت، خواهیم داشت.

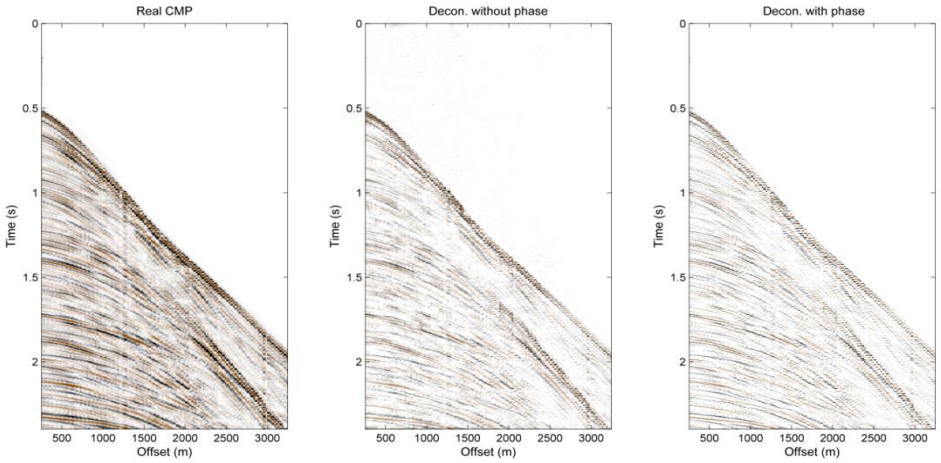
برای اعتبارسنجی و اطمینان کامل از صحت نتایج به دست آمده از داده میدانی، می‌توان از داده‌های چاه‌نگاری استفاده کرد؛ اما چون داده‌های چاه مربوط به منطقه مورد بررسی در دسترس نیست؛ می‌توان با استناد به دقت و صحت نتایج عددی حاصل شده از داده‌های شبیه‌سازی شده تک‌کاناله و چندکاناله و تخمین دقیق موجک و سری بازتاب به روش تعبیه شده در آن‌ها، گفت که نتایج مربوط به داده میدانی نیز مورد قبول خواهد بود. هم‌چنین، بررسی و تحلیل طیف دامنه داده قبل و بعد از واهامیخت توسط موجک تخمین زده شده، می‌تواند دلیل دیگری برای افزایش اعتبار و صحت روش پیشنهادی در مقاله باشد.

برای جلوگیری از وارد شدن نوفه و اثرات مصنوعی بر روی داده لرزه‌ای در حین اعمال فرآیند واهامیخت، از پارامتر منظم‌سازی مناسب و بهینه در مسئله استفاده می‌شود؛ که نقش آن در برقراری

www.SID.ir

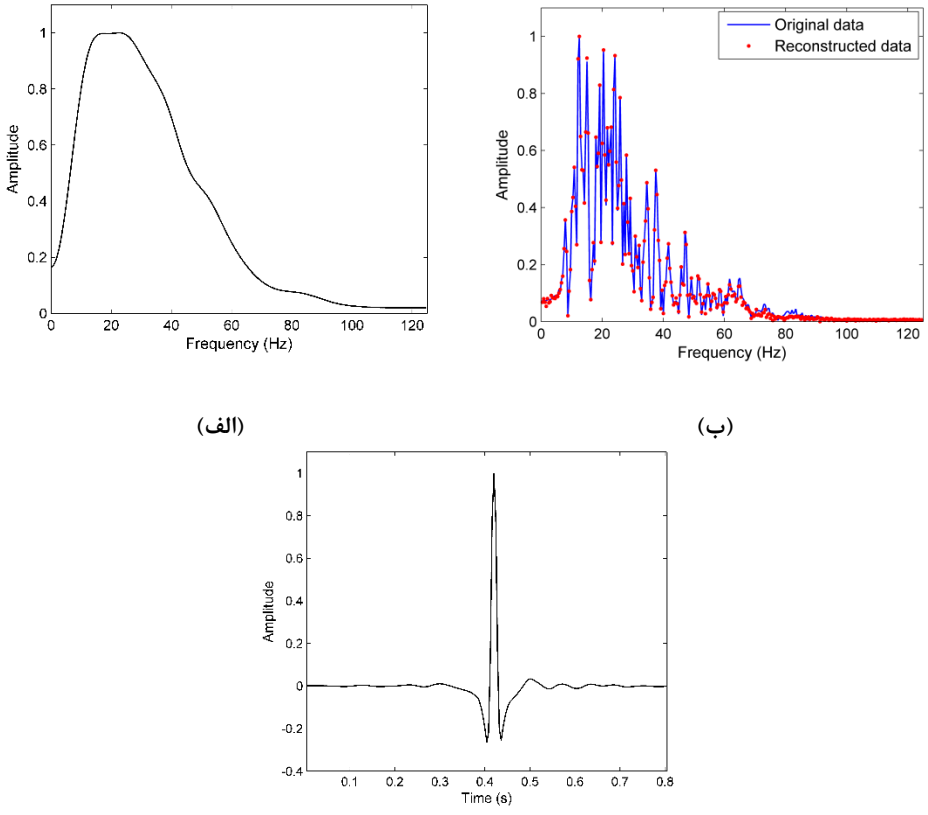
Archive of SID

تعادل میان بخش خطا و بخش منظم‌ساز است. در واقع در صورتی‌که مقدار این پارامتر به طور متناسب برای فرآیند واهامیخت مطرح شده در این مقاله انتخاب شود، اثرات ناشی از نوفه بر روی داده به حداقل خواهد رسید و نتایج حاصل صحیح و معتبر خواهند بود. می‌توان در طرح‌های بعدی برای تخمین پارامتر دقیق از روش‌های معقول و مناسب با مسئله مطرح شده بهره گرفت.



(الف) (ب) (ج)

شکل ۸: الف) یک ورداشت نقطه میانی مشترک (CMP) دریایی قبل از فرآیند واهامیخت. ب) ورداشت پس از واهامیخت حاصل از تنها طیف دامنه موجک. ج) ورداشت پس از واهامیخت نهایی حاصل از موجک تخمینی با فاز.



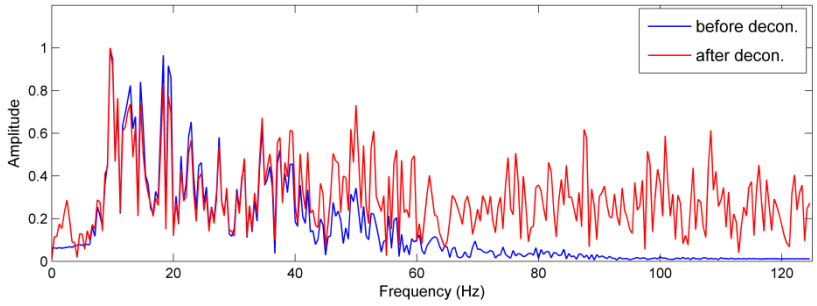
(الف) (ب)

(ج)

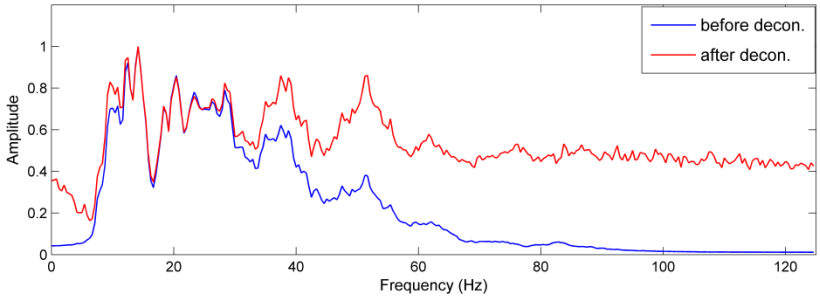
شکل ۹: الف) طیف دامنه موجک اولیه استفاده شده در الگوریتم بازیابی فاز، ب) تطابق طیف دامنه داده اولیه و داده بازسازی شده، ج) موجک استخراج شده از ورداشت CMP.

www.SID.ir

Archive of SID



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: الف) طیف دامنه لرزه‌نگاشت میانی ورداشت CMP قبل و بعد از فرآیند واهامیخت. ب) میانگین طیف دامنه ورداشت CMP قبل و بعد از فرآیند واهامیخت. گسترش پهنای باند فرکانسی بعد از واهامیخت به خوبی مشهود است.

۴- نتیجه‌گیری

الگوریتم بازیابی فاز با تطابق دادن تنها طیف دامنه داده بازسازی شده به طیف دامنه داده مشاهده‌ای در مقایسه با الگوریتم‌هایی که در حوزه زمان، هر دو طیف دامنه و فاز را برای وارون-سازی منطبق می‌سازند، نتایج معتبرتری را در مسائل مربوط به عدم تطابق فازی از جمله فرآیند واهامیخت ارائه می‌دهد.

روش بازیابی فاز مطرح شده در این مقاله، هیچ‌گونه محدودیتی را برای فاز موجک استخراجی، در نظر نمی‌گیرد و می‌تواند با دقت بالایی ساختار موجک‌های با فاز پیچیده را به دست دهد؛ که همواره یکی از چالش‌های عمده در مراحل پردازش داده لرزه‌ای بوده است.

با بررسی پایداری روش پیشنهادی در حضور نوفه با سطوح متفاوتی از انرژی، مشاهده شد که مدل تخمین زده شده برای موجک حاصل از الگوریتم از کیفیت و دقت خوبی برخوردار است و بنابراین روش پیشنهادی، پایدار است. در نهایت، عملکرد مطلوب روش تعبیه شده بر روی نتایج عددی شبیه‌سازی شده تک‌کاناله و چندکاناله و همچنین داده میدانی، کارایی آن را در افزایش قدرت تفکیک زمانی بازتاب‌ها در مقاطع لرزه‌ای و همچنین بازیابی فاز صحیح موجک لرزه‌ای و مدل بازتاب زمین تنها با استفاده از طیف دامنه داده مشاهده‌ای، تأیید می‌نماید.

۵- منابع

Beck, A. and Teboulle, M., 2009, A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems, SIAM Journal on Imaging Sciences, 2, 183-202.

Edgar, J.A. and Van der Baan, M., 2011, How reliable is statistical wavelet estimation?, Geophysics, 76)4), V59-V68.

Gholami, A. and Sacchi, M.D., 2012, A fast and automatic sparse deconvolution in the presence of outliers, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 50, 4105-4116.

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

Gholami, A., 2014, Phase retrieval through regularization for seismic problems, Geophysics, 79 (5), V153-V164.

Heimer, A. and Cohen, I., 2009, Multichannel seismic deconvolution using Markov-Bernoulli random-field modeling, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 47, 2047-2058.

Kaaresen, K.F. and Taxt, T., 1998, Multichannel blind deconvolution of seismic signals, Geophysics, 63, 2093-2107.

Mendel, J.M., 1983, Optimal Seismic Deconvolution: An Estimation-Based Approach, New York, Academic Press.

www.SID.ir

Archive of SID

Robinson, E.A. and Treitel S., 1980, Geophysical Signal Analysis, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.

Sacchi, M.D. and Ulrych, T.J., 2000, Non-minimum phase wavelet estimation using higher order statistics, The Leading Edge, 19, 80-83.

Taylor, H.L., Banks, S.C. and McCoy, J.F., 1979, Deconvolution with the lp-norm, Geophysics, 44, 39-52.

Tribolet, J.M., 1979, Seismic Applications of Homomorphic Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.

Ulrych, T.J., Velis, D.R. and Sacchi, M.D., 1995, Wavelet estimation revisited, The Leading Edge, 10, 1139-1143.

Van der Baan, M. and Pham, D.T., 2008, Robust wavelet estimation and blind deconvolution of noisy surface seismic, Geophysics, 73) 5), V37-V46.

Wiener, N., 1949, Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series, New York, Wiley.

Yilmaz, O., 2001, Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data, Society of Exploration Geophysicists, Vol. 1.

Ziolkowski, A., 1991, Why don’t we measure seismic signatures?, Geophysics, 56, 190-201.

www.SID.ir

Archive of SID

Shahrood University of Technology

JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

(JRAG)

2019, VOL 5, NO 2

(DOI): 10.22044/JRAG.2017.856

Iranian Geophysical Society- 1975

Wavelet estimation and deconvolution of seismic data through phase retrieval method

Sepideh Vafaei Shoushtari [1*] and Ali Gholami[2]

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

Received: 4 January 2017; Accepted: 26 January 2017

Corresponding author: s.vafaei@ut.ac.ir

Keywords

Phase Retrieval
Blind Deconvolution
Seismic Wavelet
Complex Phase
Fourier Amplitude Spectrum
Impulse Response
Wavelet Estimation

Extended Abstract

Summary

Seismic data can present a remarkably good image of the subsurface, and therefore, seismic methods have found considerable attention in oil and gas exploration industry. Wavelet or source deconvolution is one of the most important procedures in seismic processing used to increase the time resolution of the seismic sections while requires a reliable wavelet. The accuracy of the wavelet depends severely on the complexity of the wavelet phase. In this paper, through a smooth estimation of the wavelet amplitude spectrum, we go for obtaining the impulse response of the earth via a phase retrieval algorithm. Despite the conventional deconvolution methods, here just the Fourier amplitude spectrum information of the data is inverted as a phase retrieval problem. In the next step, deconvolution of the recorded impulse response from the data leads to a better estimation of the wavelet with any desired phase spectrum. Therefore, the presented algorithm is considered as a "blind deconvolution" method.

Introduction

In statistical seismic deconvolution, the wavelet is estimated from the data; however, it is easier to estimate its amplitude spectrum, and the phase is usually missed or is very inaccurate. This makes deconvolution of mixed-phase wavelets more problematic. It has still remained a challenge among geophysicists to estimate a reasonable seismic wavelet from the data to perform deconvolution efficiently. In this paper, as it is going to be illustrated, the proposed phase retrieval algorithm can be used for deconvolution of mixed-phase wavelets.

Methodology and Approaches

A reflection seismogram, after some specified processing steps, can be regarded as a convolution of the source wavelet with the reflectivity series and some additive noise. For obtaining the reflectivity series describing the earth, an appropriate wavelet is needed for deconvolution. The reflectivity model is obtained only by the amplitude spectrum of the observed data, looking for a solution whose predicted amplitude spectrum matches the observations of amplitude spectrum, up to a constant considered for errors in the data. Actually, it refers to an amplitude-only inversion problem, which reconstructs the Fourier phase of a signal from the Fourier amplitude. Obtaining the reflectivity model through the phase retrieval algorithm is an ill-posed inverse problem and has to be solved through regularization method. The problem is solved for a reflectivity series based on the fast iterative shrinkage/thresholding algorithm (FISTA) allowing extra constraints while preserving the computational simplicity. In multichannel deconvolution for improving temporal sparsity while preserving the lateral continuity of the estimation, we define a combined regularization function based on sparsity and second-order total variation. Split Bregman algorithm is used to solve the corresponding proximity function. Then, a wavelet with any desired phase spectrum is estimated using the obtained reflectivity.

Results and Conclusions

In this paper, we proposed a deconvolution algorithm which just needed a smooth approximation of the source wavelet amplitude spectrum. The desired performance of the proposed phase retrieval method on the numerical and field seismic examples confirmed its efficiency by enhancing the resolution of the seismic section and obtaining the accurate reflectivity model. The approach for solving deconvolution discussed here had no limitations for the phase of the extracted wavelet and could obtain wavelets having complex structures with an acceptable accuracy.

www.SID.ir