

حذف اثر جذب زمین با استفاده از فیلترهای خطی غیر پایا (Nonstationary linear filters)

ایمان گنجی^۱ و حمیدرضا سیاهکوهی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۸۸،۲۵، پذیرش نهایی: ۹۰۷،۱۹)

چکیده

با توسعه روش‌های لرزه‌نگاری در بررسی ساختارهای زیرسطحی، بررسی محدودیت‌ها و مشکلات موجود در این زمینه نیز اهمیت پیدا کرده است. اصول لرزه‌نگاری بر مبنای انتشار امواج لرزه‌ای در محیط کُشسان است. این امواج هنگام انتشار در محیط زمین واقعی تضعیف می‌شوند. تضعیف امواج تابع بسامد است و باعث اُفت بسامد غالب و به تبع آن موجب از بین رفتن قدرت تفکیک در مقاطع لرزه‌ای می‌شود. بی‌توجهی به این مسئله علاوه بر مشکلات پردازشی، در تفسیر داده‌های لرزه‌ای نیز تاثیر خواهد گذاشت. یکی از عوامل اصلی در تضعیف امواج لرزه‌ای، پدیده جذب است. در این مقاله با به‌کارگیری نظریه فیلترهای خطی غیرپایا، راهکاری برای جبران اثر این پدیده از داده‌های لرزه‌ای معرفی می‌شود. روش موردنظر در این تحقیق موسوم به (PSO, Pseudo Differential Operators) است و برپایه عملگرهای شبه دیفرانسیلی در حوزه زمان - بسامد است. ضمن بیان مبانی نظری روش، کارایی آن روی داده‌های مصنوعی و واقعی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که بهتر است قبل از اعمال روش، تا حد امکان نوفه‌ها به کمک فیلترهای مناسب حذف شوند، زیرا در فرایند جبران اثر Q، همراه با تقویت سیگنال، نوفه‌ها نیز (به‌خصوص در بخش انتهایی ردلرزه) تقویت می‌شوند و باعث محو شدن سیگنال‌های اصلی می‌شوند. نرم‌افزارهای لازم برای این تحقیق را نگارندگان در محیط متلب (MATLAB) تدوین کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: جذب، فیلتر خطی غیرپایا، فاکتور Q، عملگر شبه دیفرانسیلی

Absorption effect removal of the earth using nonstationary linear filters

Ganji, I.¹ and Siahkoochi, H. R.²

¹ Ph. D. candidate, Department of Geophysics, Islamic Azad University, Research and Science Branch, Tehran, Iran

² Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 16 Nov 2009, Accepted: 11 Oct 2011)

Abstract

Seismic waves travelling through inelastic media are attenuated by the conversion of elastic energy into heat. Upon being attenuated, the travelling wave changes: amplitude is reduced, travelling waveform is modified due to high-frequency content absorption, and phase is delayed. Attenuation is usually quantified through the quality factor Q: the ratio between the energy stored and lost in each cycle due to inelasticity. The energy attenuation and phase distortion caused by the absorbing medium can be removed by inverse Q filtering. In this paper we introduce a method in time frequency domain to compensate the attenuation based on non-stationary linear filters proposed by Margrave (1998).

Constant-Q attenuation model: The theory of constant-Q model (Kjartansson, 1979) predicts an amplitude loss given by:

$$A(x) = A_0 \exp\left(\frac{-\omega x}{2\nu Q}\right) \quad (1)$$

where Q is the attenuation parameter, ω is the angular frequency, v is the velocity, A_0 is the initial amplitude, and $A(x)$ is the amplitude at the travelled distance x . A dispersion relation, for the velocity with respect to the frequency, is an essential element of the Q -constant theory. For the examples we used in this paper, the following dispersion relation (Aki and Richards, 2001) has been used:

$$v(\omega) = v(\omega_0) \left[1 + \left(\frac{1}{\pi Q} \right) \log \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] \quad (2)$$

which gives the phase velocity at any frequency, $v(\omega)$, in terms of the velocity at a reference frequency ω_0 . A linear filter is entirely characterized by its impulse response. In the theory of constant- Q model the earth is considered a linear filter, the attenuating earth impulse response is a fundamental result. Kjartansson (1979) shows that the Fourier transform of the attenuating medium impulse response is:

$$B(\omega) = \exp \left\{ -\frac{x|\omega|}{2Qc} - i\omega \frac{x}{c} \right\} \quad c = c_0 \left| \frac{\omega}{\omega_0} \right|^{\frac{1}{\pi Q}} \quad (3)$$

A nonstationary convolutional model for an attenuated seismic trace can be established by combining equations (2) and (3), then by nonstationary convolving the attenuated impulse response with a reflectivity function and, finally, by convolving the result with an arbitrary wavelet (Margrave and Lamourex, 2002).

$$\hat{s}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \hat{w}(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_Q(\omega, \tau) r(\tau) e^{i\omega(t-\tau)} d\tau \quad (4)$$

where the 'hat' symbol indicates Fourier transform, r is the reflectivity function, w is the wavelet and $\alpha_Q(\omega, \tau)$ is the time-frequency exponential attenuation function,

$$\alpha_Q(\omega, \tau) = \exp \left(\frac{-\omega\tau}{2Q} + iH \left(\frac{\omega\tau}{2Q} \right) \right) \quad (5)$$

in which the real and imaginary components in the exponent and connected through the Hilbert transform H , result that is consistent with the minimum phase characteristic of the attenuated pulse.

Inverse-Q filtering: Nonstationary convolution can be expressed in (f, τ) domain as follows:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha(f, \tau) h(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (6)$$

which $\alpha(f, \tau)$ is transfer function

$$\alpha(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t, \tau) e^{-2\pi i f t} dt \quad (7)$$

Regarding to transfer function characteristic in nonstationary convolution equation in time-frequency domain, if $H(f)$ is input in frequency domain, then:

$$\tilde{g}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha(f, t) H(f) e^{ift} df \quad (8)$$

Where $\tilde{g}(t)$ is the output in time domain.

In two equations (6) and (8), transfer function in time-frequency domain, has nonstationary filter characteristic.

The filter operators defined in these two equations are called pseudodifferential operators (Saint-Raymond, 1991). Here, $\alpha(f, \tau)$ denotes pseudodifferential operator. Such operators are more efficient for nonstationary filters and essentially for inverse Q filtering. We tested the performance of the method on both real and synthetic seismic data.

Key words: attenuation, nonstationary linear filter, Q factor, pseudodifferential operator

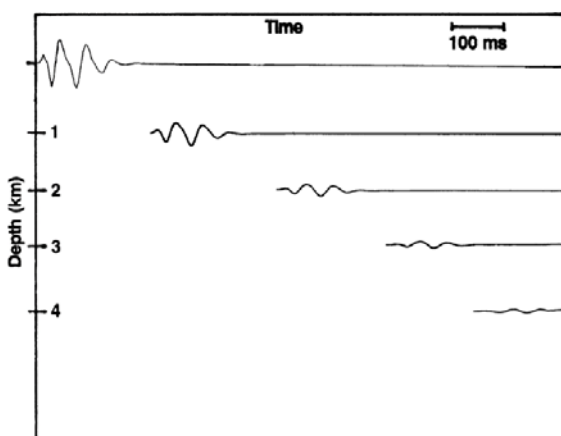
۱ مقدمه

حذف کرد، یا به عبارت دیگر چگونه می توان موجک را پایا کرد؟ معمولاً در منابع از این فرایند با عنوان فیلتر وارون Q نام می برند.

در ۱۹۸۰ هیل برای به دست آوردن لرزه نگاشت بدون اثر جذب، از معکوس ماتریس جذب (Q) استفاده کرد و برای این منظور یک ماتریس کمکی نیز به کار برد. در روش وانگ (۲۰۰۲) اساس کار بر مبنای مهاجرت و حل معکوس معادله موج است. در ۱۹۹۸ مارگریو (Margrave) روش PSO را با استفاده از انتگرال های فوریه غیرپایای تعمیم یافته یا عملگرهای شبه دیفرانسیلی در فیلتر وارون Q مورد استفاده قرار داد. اساس کار این تحقیق نتایج کارهای نظری مارگریو (۱۹۹۸) است.

تضعیف انرژی لرزه ای با زمین به هنگام انتشار موج لرزه ای از مشکلات اساسی در بررسی ساختار زیرسطحی به روش لرزه ای است. معمولاً تضعیف انرژی لرزه ای در اثر دو پدیده رخ می دهد: پدیده گسترش هندسی (Geometrical spreading) و پدیده جذب (Absorption phenomenon). آنچه در این مقاله مدنظر است تضعیف انرژی لرزه ای با پدیده جذب است.

امواج لرزه ای گذرنده از محیط غیرکشسان به دلیل تبدیل انرژی لرزه ای به شکل های گوناگون مانند گرما، تضعیف میشوند. به این پدیده در لرزه نگاری جذب گفته می شود. پدیده جذب با کمیتی به نام ضریب کیفیت هم بیان میشود. در اثر این پدیده موجک در حال انتشار با گذشت زمان دچار کاهش دامنه و بسامد غالب می شود و معمولاً به صورت پهن شدگی موجک ظاهر می شود. تغییر ویژگی های موجک با گذشت زمان معمولاً به ناپایا بودن آن تعبیر می شود (شکل ۱). هر چند در خیلی از مباحث نظریه لرزه نگاری فرض می شود موجک ها پایا هستند و ویژگی های آنها با گذشت زمان تغییر نمی کند. جبران نشدن اثر جذب هنگام پردازش داده های لرزه ای منجر به از دست رفتن کیفیت مقاطع لرزه نگاری و قدرت تفکیک آنها خواهد شد. سؤالی که در اینجا مطرح است، این است که چگونه می توان اثر جذب را از روی داده های لرزه ای



شکل ۱. تغییر موجک با زمان و مکان (ایلماز، ۲۰۰۱).

۲ مدل جذب مستقل از بسامد

نظریه مدل جذب مستقل از بسامد (Q ثابت) اُفت دامنه‌ای را پیش‌بینی می‌کند که با رابطه (۱) توصیف می‌شود (جارتانسون، ۱۹۷۹):

$$A(x) = A_0 \exp\left(\frac{-\omega x}{2\nu Q}\right) \quad (1)$$

که در آن Q پارامتر جذب، ω بسامد زاویه‌ای، ν سرعت، A_0 دامنه اولیه و $A(x)$ دامنه پس از طی مسافت x است. این رابطه نشان می‌دهد که برای یک مقدار ثابت Q ، امواج با بسامد بالا سریع‌تر از امواج با بسامد پایین میرا می‌شوند. به واسطه حضور پدیده جذب، محیط پاشنده خواهد شد و این بدان معنا است که سرعت در محیط وابسته به بسامد می‌شود و این امر بخش اصلی نظریه Q ثابت است. در اینجا با مشخص ساختن بسامدی مرجع، از نسبت پاشش استفاده می‌کنیم (آکی و ریچاردز، ۲۰۰۲):

$$\nu(\omega) = \nu(\omega_0) \left[1 + \left(\frac{1}{\pi Q} \right) \log\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \right] \quad (2)$$

که در آن $\nu(\omega)$ سرعت فاز در هر بسامد دلخواه را برحسب سرعت در بسامد مرجع ω_0 خواهد داد. اصولاً فیلترهای خطی با پاسخشان توصیف می‌شوند. در نظریه مدل Q ثابت، زمین درحکم یک فیلتر خطی در نظر گرفته می‌شود، از این رو پاسخ زمین اهمیت زیادی دارد. جارتانسون (۱۹۷۹) نشان داد وقتی که $Q^{-2} \ll 1$ ، تبدیل فوریه پاسخ محیط جاذب (زمین) به صورت زیر است:

$$B(\omega) = \exp\left\{ -\frac{x|\omega|}{2Qc} - i\omega \frac{x}{c} \right\} \quad (3)$$

$$c = c_0 \left| \frac{\omega}{\omega_0} \right|^{\frac{1}{\pi Q}}$$

که در آن B پاسخ زمین است. برای لحاظ کردن اثر جذب در یک ردلرزه می‌توان از

ترکیب روابط (۲) و (۳) استفاده کرد. این مطلب در حوزه بسامد به صورت زیر قابل بیان است (مارگریو و لامورکس، ۲۰۰۲).

$$\hat{s}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \hat{w}(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_Q(\omega, \tau) r(\tau) e^{i\omega(t-\tau)} d\tau \quad (4)$$

که در آن علامت $(\hat{\quad})$ بیانگر تبدیل فوریه، r تابع سری ضرایب، w موجک و $\alpha_Q(\omega, \tau)$ تابع جذب نمایشی زمان-بسامد یا همان عامل جذب متغیر با بسامد است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha_Q(\omega, \tau) = \exp\left(\frac{-\omega\tau}{2Q} + iH\left(\frac{\omega\tau}{2Q}\right)\right) \quad (5)$$

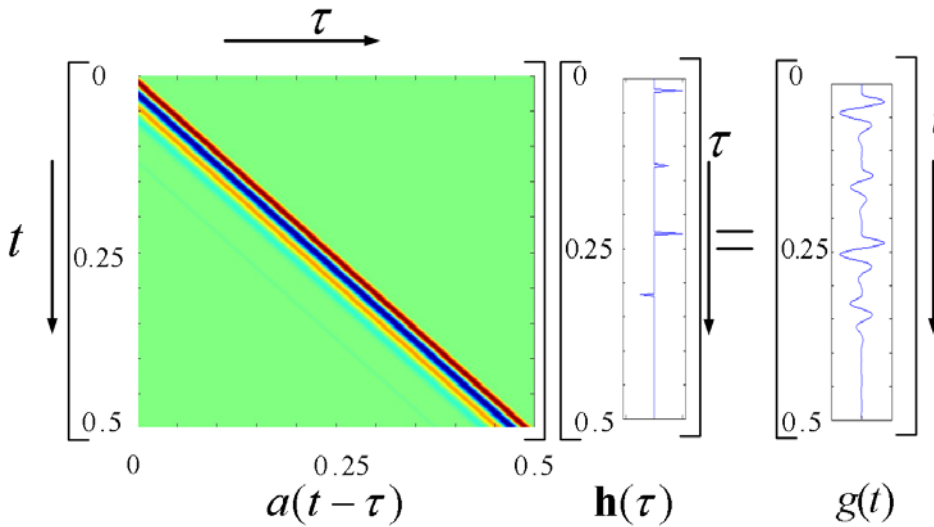
و در آن H تبدیل هیلبرت است. در اینجا فرض شده که موجک با فاز کمینه است و طیف فاز آن از تبدیل هیلبرت طیف دامنه به دست می‌آید (هیل، ۱۹۸۱).

۳ اصول نظری فیلترهای خطی غیرپایا

اگر $h(t)$ سیگنال ورودی و $a(u)$ یک فیلتر خطی پایای دلخواه باشد، بنابراین $g(t)$ خروجی فیلتر با انتگرال هم‌میخت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t-\tau)h(\tau)d\tau = a(t) * h(t) \quad (6)$$

روابط فیلتر غیرپایا را می‌توان از تعمیم روابط پایا به دست آورد. عبارت $a(t-\tau)$ در رابطه (۶) شکل تأخیر یافته $a(t)$ یا پاسخ فیلتر به ورودی در زمان τ است. در شکل ۲ مدل هم‌میخت پایا برای ساخت یک ردلرزه به صورت طرحوار نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود ماتریس عملگر هم‌میخت پایا مربوط به موجک با فاز کمینه $(a(t-\tau))$ در سمت چپ شکل روی بُردار ضرایب بازتاب $(h(\tau))$ عمل کرده و در سمت راست بُردار ردلرزه حاصل $(g(t))$ را نتیجه می‌دهد.



شکل ۲. نمایش همابمخت پایا درحکم عملگری ماتریسی در حوزه زمان (برای توضیح به متن مراجعه شود).

همان‌طور که در این رابطه نشان داده شده، برخی از ماتریس‌های همابمخت درجه تقارن زیادی دارد و با نام ماتریس‌های توئپلیتز (Toeplitz) مشهور هستند (مارگریو، ۱۹۹۸).

تفاوت اساسی بین فیلترهای پایا و غیرپایای خطی این است که در حالت غیر پایا، پاسخ به‌طور دلخواه با زمان تغییر می‌کند. توصیف کامل یک فیلتر غیرپایا در حالت کلی، نیازمند این است که پاسخ آن برای همهٔ زمان‌ها معلوم باشد، یعنی

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = \dots + \begin{bmatrix} \vdots \\ a_{\cdot,0} \\ a_{\cdot,1} \\ a_{\cdot,2} \\ a_{\cdot,3} \\ \vdots \end{bmatrix} h_0 + \begin{bmatrix} \vdots \\ a_{-1,1} \\ a_{-1,0} \\ a_{1,1} \\ a_{2,1} \\ \vdots \end{bmatrix} h_1 + \begin{bmatrix} \vdots \\ a_{-2,2} \\ a_{-1,2} \\ a_{\cdot,2} \\ a_{1,2} \\ \vdots \end{bmatrix} h_2 + \dots \quad (9)$$

که در آن هر بردار ستونی در سمت راست، پاسخ فیلتر در زمان متناسب با اندیس h_j است و با مقدار h_j وزن داده می‌شود. برای فیلترهای پایا این بردارهای ستونی همگی (به استثنای انتقال زمانی آنها) مشابه هستند، شایان ذکر است که برای فیلتر غیر پایا، بردارهای ستونی یا همان

تعمیم رابطه (۶) به سامانه‌های غیرپایا را می‌توان با به‌کارگیری $a(t-\tau, \tau)$ به جای $a(t-\tau)$ عملی ساخت. این نوع نگارش، هم مفهوم تاخیر پاسخ فیلتر و هم وابستگی صریح پاسخ به زمان τ را برای توجیه تغییرات فیلتر با زمان حفظ خواهد کرد. با فرض a_n, h_n, g_n به‌منزلهٔ شکل گسستهٔ سیگنال‌های $a(t), h(t), g(t)$ ، شکل گسسته رابطه همابمخت را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$g_k = \Delta t \sum_j a_{k-j} h_j \quad (7)$$

که در آن Δt بازه نمونه برداری زمانی است. این تعریف می‌تواند به‌صورت عملیات ماتریسی با بیان h, g به‌صورت بردارهای ستونی و ساخت یک ماتریس همابمخت خاص با $a(t)$ به‌گونه‌ای دیگر بازنویسی شود (استرانگ، ۱۹۸۶):

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_0 & a_{-1} & a_{-2} & \vdots \\ a_1 & a_0 & a_{-1} & \vdots \\ a_2 & a_1 & a_0 & \vdots \\ a_3 & a_2 & a_1 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (8)$$

می‌کند و در سمت راست بُردار ردلرزه حاصل $(g(t))$ را نتیجه می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۲ و ۳ نشان‌دهنده متغیر بودن پاسخ فیلتر غیرپایا با زمان است.

۴ بازنویسی روابط در حوزه بسامد

با وجود اینکه روابط در حوزه زمان بسط داده شدند ولی روش‌های حوزه زمان همیشه برای اهداف محاسباتی و طراحی فیلتر مناسب نیستند. تبدیل فوریه سریع، اغلب برای فیلتر کردن پایا در حوزه بسامد سودمند است. چون دو متغیر زمان t و τ در رابطه (۶) وجود دارند، مطابق با این دو، دو بسامد f و F نیز در حوزه بسامد وجود خواهند داشت. در ادامه برای سیگنال ورودی h ، زمان و بسامد با τ و F نشان داده می‌شوند و این کمیت‌ها برای سیگنال خروجی، با t و f نشان داده می‌شوند. پس از انجام تبدیل فوریه در حوزه هر دو بسامد f و F ، رابطه همامیخت غیرپایای (۱۱) به صورت زیر خواهد بود (مارگریو-۱۹۹۸):

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f) A(f, f - F) df \quad (12)$$

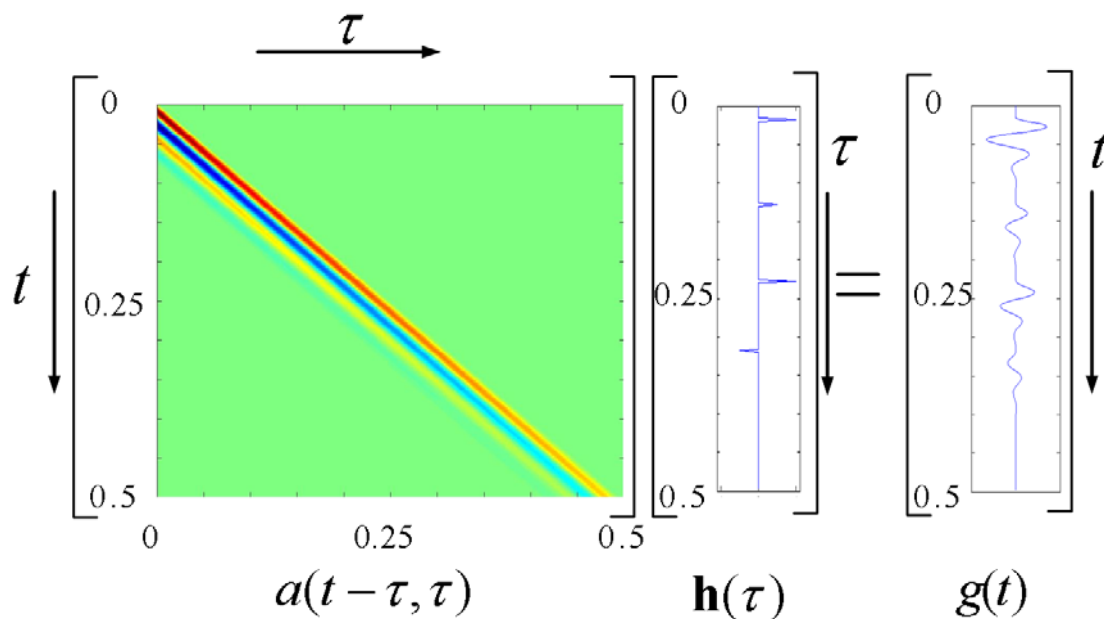
پاسخ‌های فیلتر در زمان‌های گوناگون یکسان نیستند. به سادگی می‌توان فیلتر غیرپایای دلخواه را با ضرب ماتریسی در حوزه زمان نشان داد. این عمل در واقع بسط مستقیم همامیخت پایا است و به صورت یک حالت کلی یا همامیخت غیرپایا در خواهد آمد. برای این منظور رابطه ۷ را می‌توان به صورت رابطه صریح ۹ اصلاح کرد

$$g_k = \Delta t \sum_j a_{k-j,j} h_j \quad (10)$$

و انتگرال همامیخت در رابطه ۶ هم به صورت زیر قابل تعمیم است:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t - \tau, \tau) h(\tau) d\tau \quad (11)$$

مشاهده می‌شود با جایگزینی $a(t - \tau)$ با $a(t - \tau, \tau)$ در رابطه (۲) برهم‌نهی وزنی پاسخ‌ها حفظ می‌شود. در شکل ۳ مدل همامیخت غیرپایا برای ساخت یک ردلرزه به صورت طرحوار نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ماتریس عملگر همامیخت پایا مربوط به موجک با فاز کمینه $(a(t - \tau, \tau))$ در سمت چپ شکل روی بُردار ضرایب بازتاب $(h(\tau))$ عمل



شکل ۳. نمایش همامیخت غیرپایا در حکم عملگری ماتریسی در حوزه زمان.

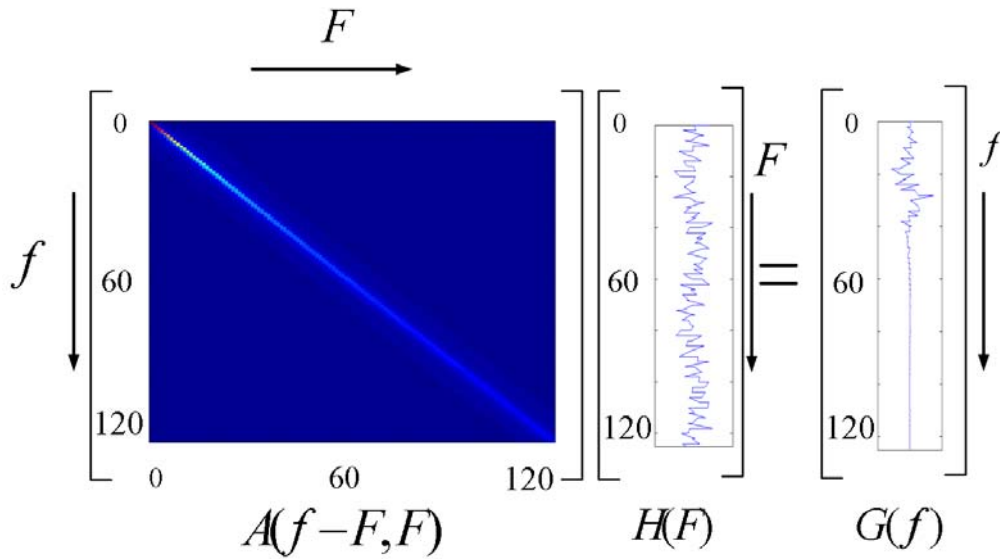
فوریه را برای ساخت یک ردلرزه، به صورت طرحوار نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، ماتریس عملگر همایخت پایا و غیرپایا مربوط به موجک با فاز کمینه $(A(f-F, F))$ در سمت چپ شکل روی تبدیل فوریه بُردار ضرایب بازتاب $(H(F))$ عمل کرده است و در سمت راست تبدیل فوریه بُردار ردلرزه حاصل $(G(f))$ را نتیجه می‌دهد.

که در آن $G(f)$ و $H(f)$ به ترتیب طیف فوریه $g(t)$ و $h(t)$ هستند و به صورت زیر داده می‌شوند:

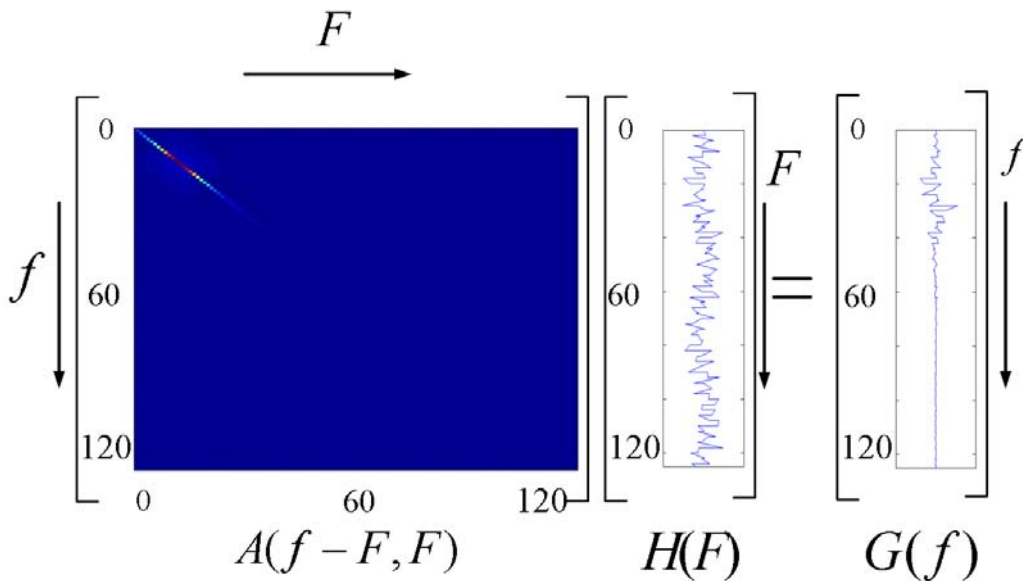
$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (13)$$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (14)$$

شکل‌های ۴ و ۵ مدل همایخت پایا و غیرپایا در حوزه



شکل ۴. نمایش همایخت پایا درحکم عملگری ماتریسی در حوزه بسامد.



شکل ۵. نمایش همایخت غیرپایا درحکم عملگری ماتریسی در حوزه بسامد.

شکل‌های ۶ و ۷ مدل هم‌میخت پایا و غیرپایا در حوزه زمان-بسامد را برای ساخت یک ردلرزه به صورت طرحوار نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، ماتریس عملگر هم‌میخت پایا و غیرپایا مربوط به موجک با فاز کمینه $(\alpha(f, \tau))$ در سمت چپ شکل روی بُردار ضرایب بازتاب $(h(\tau))$ عمل کرده است و در سمت راست تبدیل فوریه بُردار ردلرزه حاصل $(G(f))$ را نتیجه می‌دهد.

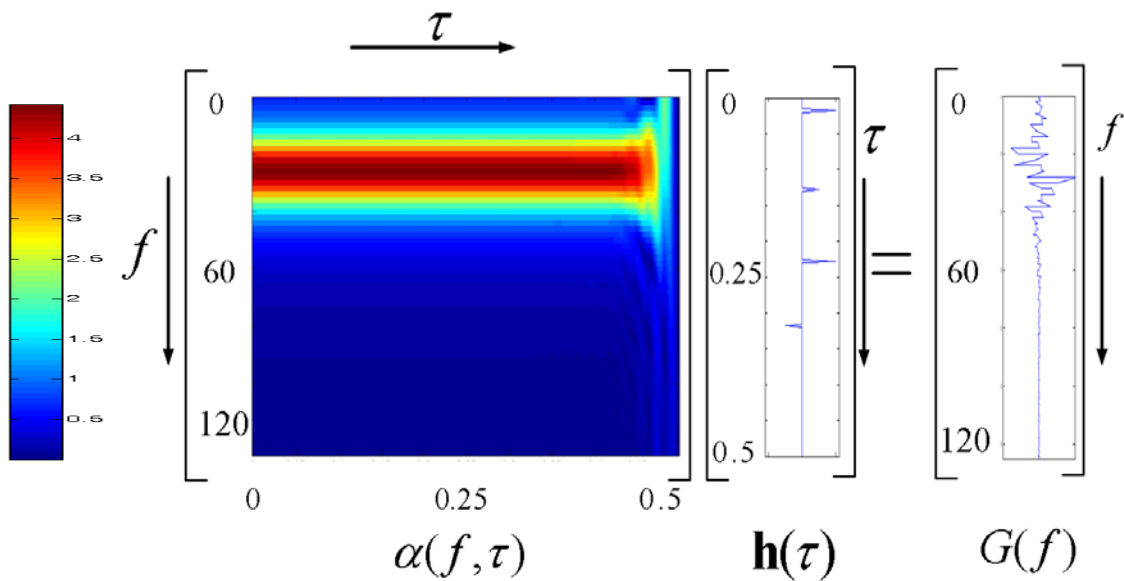
۵ روابط حوزه زمان - بسامد

هم‌میخت غیرپایا را می‌توان در حوزه (f, τ) به صورت زیر بیان کرد (مارگریو، ۱۹۹۸):

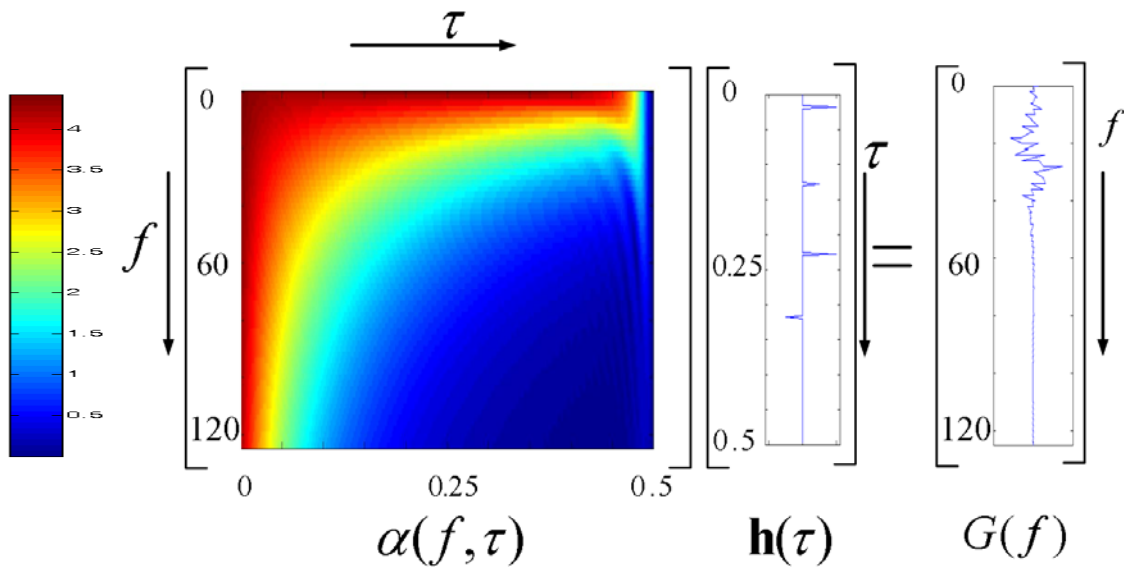
$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha(f, \tau) h(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (15)$$

که در آن $\alpha(f, \tau)$ تابع انتقال غیرپایا است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\alpha(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t, \tau) e^{-2\pi i f t} dt \quad (16)$$



شکل ۶. نمایش هم‌میخت پایا درحکم عملگری ماتریسی در حوزه زمان- بسامد.

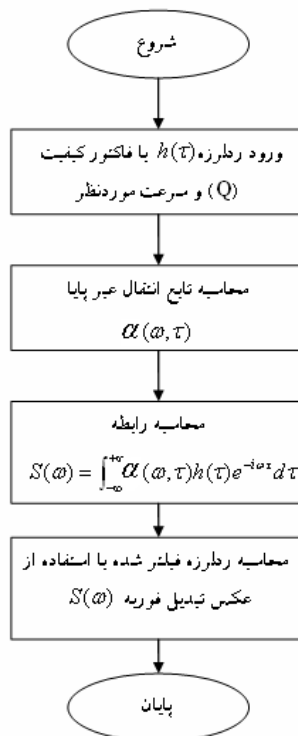


شکل ۷. نمایش هم‌میخت غیرپایا درحکم عملگری ماتریسی در حوزه زمان- بسامد.

به موارد ناهمگن نتیجه می‌شوند. در اینجا $\alpha(f, \tau)$ نماد عملگر شبه دیفرانسیلی است. این روابط برای فیلتر غیرپایا و به‌طور خاص برای مدل مستقیم و فیلتر وارون Q ، کارایی بیشتری دارند. (مونتانا، ۲۰۰۵) روند کارکرد فیلتر وارون Q طراحی شده در این تحقیق که براساس عملگر شبه دیفرانسیلی کار می‌کند در شکل ۸ نشان داده شده است.

۷ بررسی کارایی فیلتر روی داده‌های مصنوعی در این قسمت از مدل زمین با چهار بازتابنده که زمان سیر آنها به‌ترتیب ۱۰، ۶۵، ۱۱۵ و ۱۶۰ میلی‌ثانیه است، برای ایجاد ردلرزه مصنوعی با موجک فاز کمینه و فاصله نمونه برداری ۲ میلی‌ثانیه استفاده شد (شکل ۹). تابع تبدیل موجک به‌کار رفته به‌صورت زیر است (کومار و بیسوال، ۲۰۰۸).

$$V(z) = \frac{0.0378417z^2 - 0.0306517}{z^4 - 3.4016497z^3 + 4.5113732z^2 - 2.7553363z + 0.6561} \quad (18)$$



شکل ۸. نمودار گردش فیلتر وارون Q براساس روش PSO.

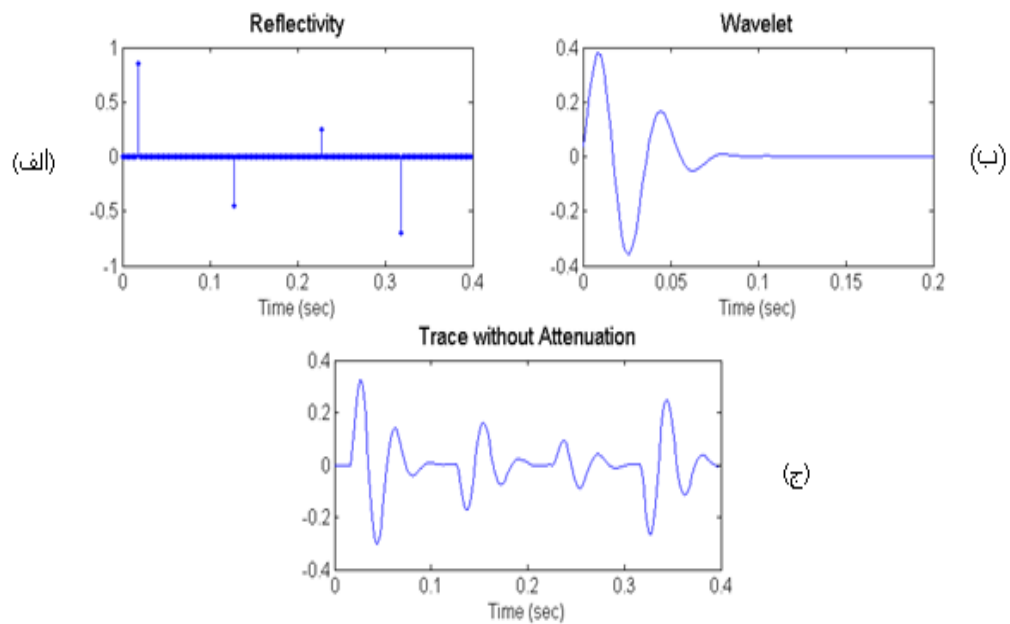
۶ فیلتر براساس عملگرهای شبه دیفرانسیلی (روش PSO)

با توجه به ویژگی تابع انتقال در رابطه همایخت غیرپایا در حوزه زمان - بسامد (رابطه ۱۵)، اگر $H(f)$ ورودی در حوزه بسامد باشد، خواهیم داشت:

$$\tilde{g}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha(f, t) H(f) e^{ift} df \quad (17)$$

که در آن خروجی $\tilde{g}(t)$ در حوزه زمان است. در هر دو تعریف (روابط ۱۵ و ۱۷)، تابع انتقال در حوزه زمان - بسامد $\alpha(f, \tau)$ خصوصیات اساسی فیلتر غیرپایا را در بر خواهد داشت.

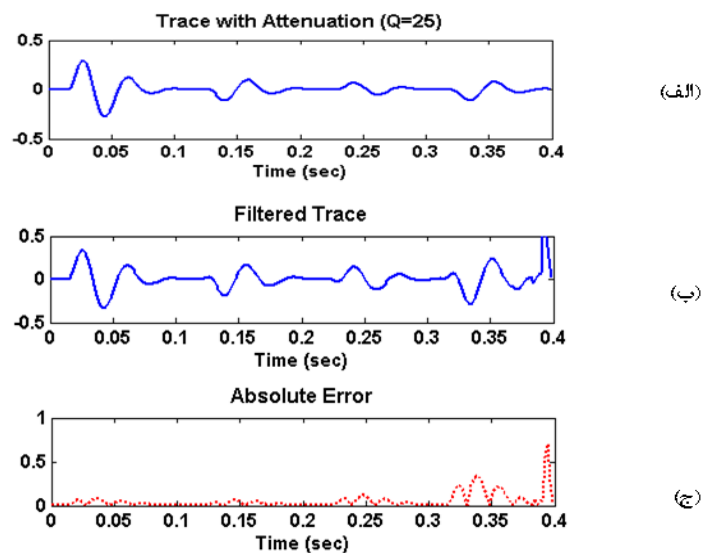
عملگرهای فیلتر تعریف شده با این دو رابطه، به طبقه عملگرهایی که عملگرهای شبه دیفرانسیلی نامیده می‌شوند تعلق دارند (سنت ریموند، ۱۹۹۱) و از بسط تحلیل فوریه



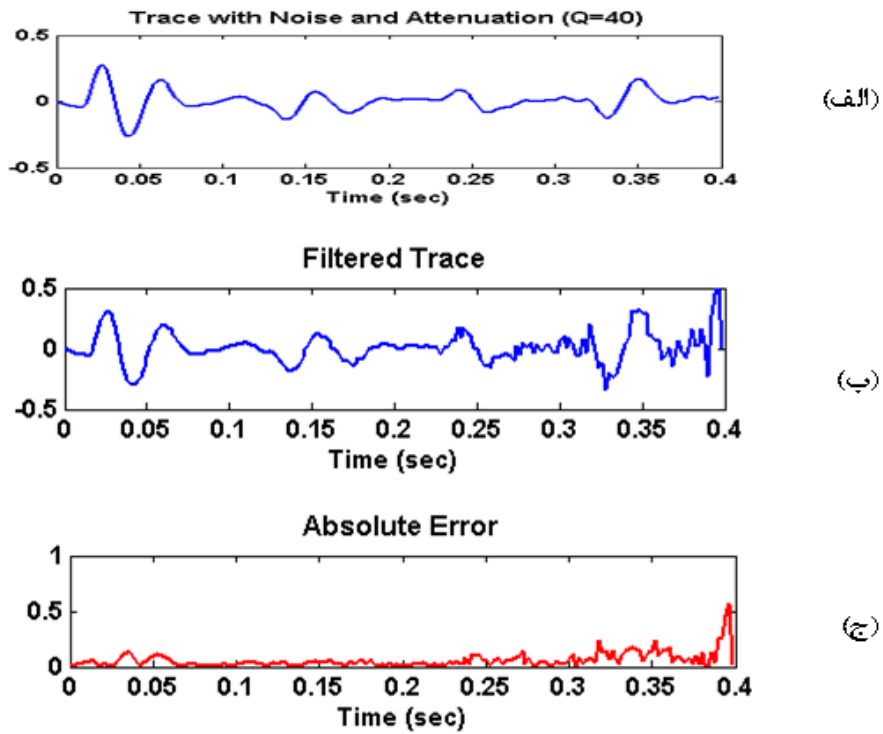
شکل ۹. (الف) سری بازتاب مصنوعی. (ب) موجک فاز حداقل به کار رفته. (ج) ردلرزه مصنوعی بدون میرایی.

همان‌طور که در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود، فیلتر آفت دامنه به واسطه جذب را جبران کرده و اختلاف ردلرزه بازسازی شده با فیلتر و ردلرزه اولیه (شکل ۹-ج) در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است. محاسبات فوق برای مقادیر متفاوت Q (گنجی، ۱۳۸۵) تکرار شد که برای نمونه در شکل ۱۱ نتایج برای حالت $Q=40$ همراه با نوفه آورده شده است. شایان ذکر است که در صورت وجود نوفه، آنها هم‌زمان با تقویت سیگنال‌ها، تقویت خواهند شد. (یانگ، ۲۰۰۵)

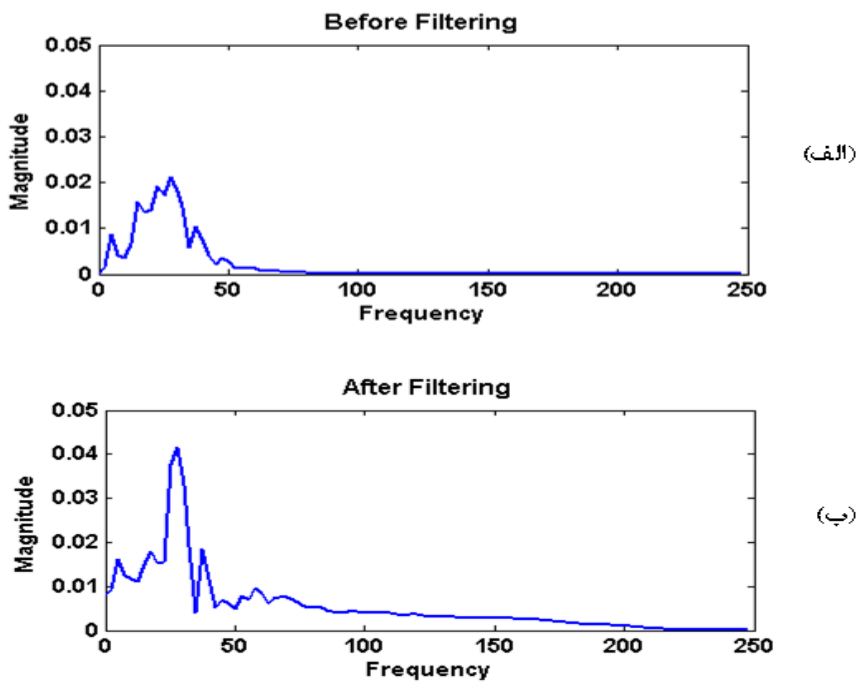
همان‌طور که در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود، فیلتر آفت دامنه به واسطه جذب را جبران کرده و اختلاف ردلرزه بازسازی شده با فیلتر و ردلرزه اولیه (شکل ۹-ج) در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است. محاسبات فوق برای مقادیر متفاوت Q



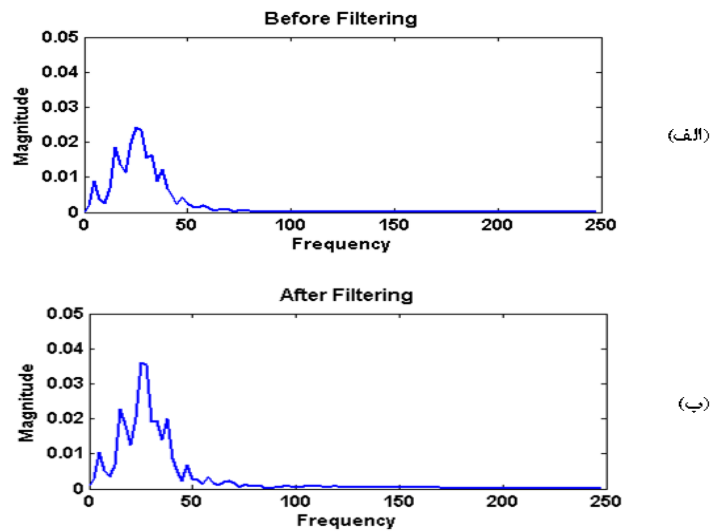
شکل ۱۰. (الف) ردلرزه مصنوعی با فرض فاکتور کیفیت ۲۵ برای لایه‌ها در مدل زمین. (ب) ردلرزه فیلتر شده با PSO . (ج) خطای مطلق میان ردلرزه واقعی (شکل ۹-ج) و ردلرزه فیلتر شده.



شکل ۱۱. (الف) ردلرزه مصنوعی با فرض فاکتور کیفیت ۴۰ همراه با نوفه برای لایه‌ها در مدل زمین (ب) ردلرزه فیلتر شده با PSO. (ج) خطای مطلق میان ردلرزه واقعی (شکل ۹-ج) و ردلرزه فیلتر شده.



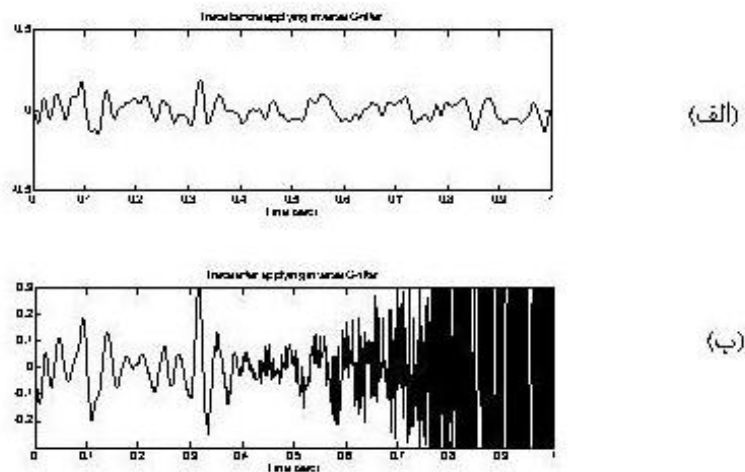
شکل ۱۲. (الف) طیف دامنه ردلرزه مصنوعی با فرض فاکتور کیفیت ۲۵ برای لایه‌ها در مدل زمین (ب) طیف دامنه ردلرزه فیلتر شده با PSO.



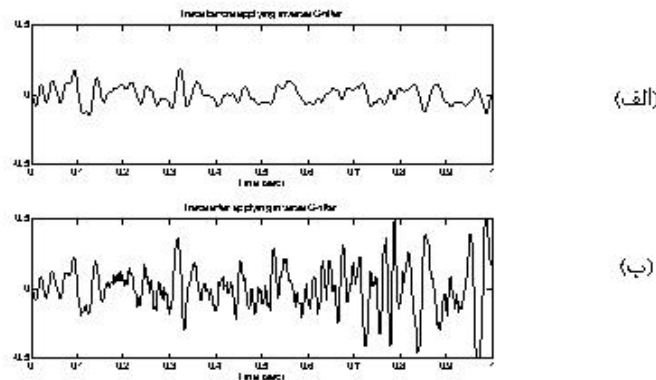
شکل ۱۳. (الف) طیف دامنه ردلرزه مصنوعی با فرض فاکتور کیفیت ۴۰ همراه با نوفه برای لایه‌ها در مدل زمین (ب) طیف دامنه ردلرزه فیلتر شده با PSO

را، روی داده واقعی امتحان کردیم. علت انتخاب داده واقعی برای این منظور آن بود که داده واقعی همیشه همراه با نوفه است و معمولاً نوفه‌های موجود در انتهای ردلرزه همچون سیگنال‌ها متحمل افت دامنه نمی‌شوند و اثر تقویت بیش از اندازه، به وضوح دیده خواهد شد. شکل ۱۴ ردلرزه واقعی و بازسازی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، دامنه در زمان‌های انتهایی ثبت، بیش از اندازه تقویت شده‌اند. مقدار Q برای ردلرزه واقعی از روش پیشنهاد شده ژانگ (۲۰۰۲) استفاده شده است.

همان‌طور که در ردلرزه‌های بازسازی شده مشاهده می‌شود، ایراد این روش این است که افت دامنه در اثر پدیده جذب را برای رخداد‌های انتهایی ردلرزه، بیش از حد جبران می‌کند. برای به دست آوردن دامنه معقول برای این رویدادها، با تعریف آستانه‌ای برای بیشینه دامنه در پاسخ بسامدی فیلتر طراحی شده، از تقویت بیش از حد رخداد‌های انتهایی ردلرزه می‌توان جلوگیری کرد. معمولاً مقدار این آستانه با سعی و خطا تعیین می‌شود (سامرویل و همکاران، ۲۰۰۲).
کارایی این راه‌حل برای جبران تقویت بیش از اندازه



شکل ۱۴. ردلرزه واقعی (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال فیلتر وارون.



شکل ۱۵. ردلرزه واقعی (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال فیلتر وارون با پاسخ بسامدی تعدیل شده.

پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران.

Aki, K. and Richards, P. G., 2002, Quantitative Seismology; Theory and methods: University Science Books.

Hale, D., 1981, An Inverse-Q filter: SEP Report 26.

Kjartansson, E., 1979, Constant-Q wave propagation and attenuation, J. Geophysics. Res., **84**, 4737-4784.

Kumar, S., Kumari, K. and Biswal, A., 2008, Frequency Enhancement of seismic Data- a comparative study, CSEG Recorder, **33**(4), 37-43.

Margrave, G. F., 1998, Theory of nonstationary linear filtering in Fourier domain with application to time-variant filtering, Geophysics, **63**, 244-259.

Margrave, G. F. and Lamourex, M. P., 2002, Gabor deconvolution, CSEG Annual Convention.

Montana, C. and Margrave, G. F., 2005, Comparing three methods for inverse Q filtering, CREWES, D. of Geology and Geophysics, University of Calgary.

Saint-Reymond, X., 1991, Elementary introduction to the theory of pseudodifferential operators, CRC Press.

Somerville, R., Yao, Z. and Pickford, S., 2002, A fast and accurate Q-inverse filter, CSEG.

Strang, G., 1986, Introduction to applied mathematics, Wellesley Cambridge Press.

Wang, Y., 2002, A stable and efficient approach of inverse-Q filtering, Geophysics, **67**, 657-663.

Yilmaz, O., 2001, Seismic data Analysis, Soc. Expl. Geophysics.

حال با استفاده از آستانه بیشینه طیف دامنه ۱۰۰ و اعمال آن روی پاسخ بسامدی فیلتر، ردلرزه بازسازی شده با استفاده از فیلتر وارون طراحی شده در شکل ۱۵ مشاهده می شود. مقایسه شکل های ۱۴-ب و ۱۵-ب حاکی از کارکرد قابل قبول آستانه انتخاب شده است.

۸ نتیجه گیری

در این تحقیق روشی برای جبران افت دامنه به واسطه جذب براساس عملگرهای شبه دیفرانسیلی معرفی و مبانی نظری آنها عرضه شد. کارایی فیلتر روی ردلرزه های مصنوعی و واقعی امتحان شد. از آنجا که فیلتر وارون Q ، یک فیلتر متغیر با زمان است معمولاً رسیدهای دیرتر در ردلرزه بیشتر تقویت می شوند. نوفه های محیطی موجود در ردلرزه نیز هم زمان با سیگنال ها با فیلتر تقویت خواهند شد. میزان تقویت نوفه ها در زمان های انتهایی ردلرزه بیشتر خواهد بود که باعث محو شدن سیگنال ها خواهد شد. نتایج نشان می دهد تا حد امکان می باید قبل از اعمال فیلتر وارون Q ، نوفه ها را از ردلرزه تضعیف کرد. در این تحقیق برای رفع این مشکل انتخاب آستانه برای بیشینه دامنه در پاسخ بسامدی فیلتر معرفی و کارایی آن نشان داده شد.

منابع

گنجی، ا.، ۱۳۸۵، حذف اثر جذب به کمک فیلتر وارون،

- Young, P. and Wild, A., 2005, Cosmatic Enhancement of seismic Data by Loop Reconvolution, CSEG convention.
- Zhang, C., Kelman Technologies Inc. and Ulrych, T., 2002, Estimation of Quality Factors - An Analytical Approach, CSEG.