تضعیف نوفه‌های تصادفی از داده‌های برانبارش شدهٔ لرزه‌نگاری در حوزهٔ F-xy

حسین عالی دانشور* و حمیدرضا سیاهکوهی*

*مؤسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

(دریافت مقاله: ۸۳/۶/۳۰ ، پذیرش مقاله: ۸۴/۳/۱۰)

چکیده

حضور نوفه‌ها در لرزه‌نگاری امری اجتناب ناپذیر است. پاره‌ای از این نوفه‌ها ماهیت تصادفی دارند و پاره‌ای همدوس هستند. به منظور ارائهٔ تصویر صحیح از ساختارهای زمین‌شناختی منطقه، لازم است این نوفه‌ها در مراحل پردازشی تضعیف شوند. در این مطالعه برای تضعیف نوفه‌های تصادفی روش ویژه‌تصویر در حوزهٔ F-xy معرفی می‌شود. هدف این مطالعه، تضعیف نوفه‌های تصادفی از مکعب داده‌های لرزه‌ای برانبارش شده در لرزه‌شناسی سه‌بعدی به روش ویژه‌تصویر در حوزه F-xy است. در این روش عمل فیلترکردن با جایگزینی مقاطع بسامد ثابت به‌وسیله مجموع تعداد معینی از ویژه‌تصاویر (دارای بیشترین سهم) انجام می‌شود. این روش در مقاطع با لایه‌بندی افقی و مقاطع با لایه بندی شیب‌دار کارایی خوبی دارد. این روش برخلاف فیلتر پیشگو، مستقل از بسیاری از خواص وابسته به x و y است. مانند: ترتیب و تصحیحات استاتیک. این روش در نقاط مرزی محدودهٔ برداشت سه‌بعدی نیز به خوبی عمل می‌کند. زمان اجرای این فیلتر با استفاده از روش لنکزوس به جای SVD به‌مراتب کاهش یافته و گزینه مناسبی در مقایسه با فیلترهای مشابه خواهد بود. کارایی فیلتر روی داده‌های مصنوعی اجرا و نتایج ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: فیلتر، نوفهٔ تصادفی، ویژه‌تصویر، سه‌بعدی، تجزیه مقدار منفرد، لنکزوس، F-xy

۱ مقدمه

برداشت‌های لرزه‌نگاری به‌منظور مطالعهٔ پوسته، اکتشاف ذخایر هیدروکربوری، تعیین عمق سطح ایستابی یا تعیین عمق پی‌سنگ، صورت می‌گیرند. برداشت‌های لرزه‌ای دوبعدی و سه‌بعدی بازتابی، از متداول‌ترین روش‌های برداشت هستند. داده‌های به‌دست آمده از برداشت همراه با نوفه‌اند و باعث اختلال در امر تفسیر و تشخیص لایه‌بندی‌های واقعی زیرزمینی می‌شوند. نوفه‌ها به دو نوع کلی تصادفی و همدوس تقسیم‌بندی می‌شوند. منشأ نوفه‌های تصادفی عمدتاً باد، رودخانه‌ها، فعالیت‌های انسانی در نزدیکی منطقه برداشت یا حتی اتصال غیر صحیح گیرنده‌ها به زمین است. در واقع به این دلیل به این نوفه‌ها تصادفی اطلاق می‌شود که هیچ نظم و ترتیبی در دامنهٔ آن‌ها یافت نمی‌شود و از تریسی به تریس دیگر قابل ردیابی نیستند. معمولاً طیف دامنهٔ نوفه‌های تصادفی گسترده است. منشأ نوفه‌های همدوس و تکراری‌ها بازتابش‌های ناخواسته است. همچنین، امواج سطحی نیز به صورت نوفه‌های همدوس در داده‌های برداشت شده ظاهر می‌شوند. فیلترهای دوبعدی، کاربرد وسیعی در ژئوفیزیک، به‌خصوص در شاخه لرزه‌نگاری دارند. از مرسوم‌ترین فیلترهای دوبعدی می‌توان فیلتر F-x ، F-k ، τ-p و k-l را نام برد. این فیلترها در حذف نوفه‌های تصادفی، جدایی امواج پایین رونده و بالارونده در عملیات لرزه‌ای درون‌چاهی، کاهش بازتاب‌های تکراری، تضعیف نوفه‌های همدوس، مانند امواج سطحی، امواج هوا و ... در مقاطع لرزه‌ای، کاربرد دارند. خانواده‌ای از فیلترها که در حال حاضر برای تضعیف نوفه‌های تصادفی کاربرد زیادی دارد، فیلترهای پیشگو هستند. این فیلترها روی داده‌های دوبعدی توسط کانالز (۱۹۸۴) و برای داده‌های سه‌بعدی توسط چیز (۱۹۹۲) طراحی شدند. خانوادهٔ دیگری از این گروه تضعیف نوفه‌ها تبدیل کارهونن- لاو (جونز و لوی، ۱۹۸۷) است. به‌طورکلی این روش از نظر محاسباتی پرهزینه و سنگین است (الیحیی، ۱۹۹۱). یک

گزینه بهتر برای داده‌های شیب‌دار استفاده از تبدیل کارهونن- لاو در حوزهٔ F-x است که به فیلترکردن طیفی ماتریس مربوط می‌شود (گونن و همکاران، ۱۹۹۸). روش‌های دیگر پیشگو عبارت‌اند از F-x projection (سوباراس، ۱۹۹۴) و F-xy projection (اوزدمیر و همکاران، ۱۹۹۹).

اندرو و پترسون (۱۹۷۶) نشان دادند که تجزیه مقدار منفرد (singular value decomposition) چگونه برای تضعیف نوفه و همچنین فشرده‌سازی تصاویر دیجیتال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اولریچ و همکاران (۱۹۸۸) نخستین بار از روش ویژه‌تصویر در پردازش مقاطع لرزه‌ای استفاده کردند. همچنین اولریچ و همکاران (۱۹۹۹) تعدادی از کاربردهای تجزیه به ویژه‌تصاویر را در لرزه‌شناسی، از جمله تضعیف نوفه، فیلترکردن شیب، جداسازی جبهه موج‌ها در VSP و تصحیح استاتیک باقی‌مانده (residual static correction) معرفی و بررسی کردند. فن تضعیف نوفه اولریچ و همکاران (۱۹۹۹) در حوزهٔ t-x است و برای بازتابنده‌های شیب‌دار مناسب به نظر نمی‌رسد. فیلتر ویژه‌تصویری در حوزه F-xy را اولین بار تریکت (۲۰۰۳) برای تضعیف نوفه‌های تصادفی معرفی کرد.

۲ روش‌های ریاضی برای تعیین ویژه‌تصاویر

اساس مطالعه حاضر شباهت زیادی به کار تریکت (۲۰۰۳) دارد، با این تفاوت که برای تعیین ویژه‌تصاویر داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده از دو ابزار ریاضی جداگانه استفاده شده است. در این مطالعه، روش‌های ریاضی تجزیه مقدار منفرد و لنکزوس مورد استفاده قرار گرفت. در روش تجزیهٔ مقدار منفرد، ماتریس A با تعدادی از ماتریس‌های هاوس‌هولدر به شکل دوقطری و سپس به شکل قطری تبدیل شدند و روش لنکزوس با استفاده از الگوریتم تکراری، ماتریس A را به شکل دو قطری تبدیل کرد. در ادامه، این روش‌ها به‌طور مختصر معرفی می‌شوند؛ برای جزئیات بیشتر به عالی‌دانشور (۱۳۸۳) مراجعه شود.

۲-۱ روش تجزیه مقدار منفرد

روش تجزیهٔ مقدار منفرد یا SVD، ماتریس A را به سه ماتریس U، Σ و V تفکیک می‌کند. بر اساس تعریف گولاب و ون لون (۱۹۸۹) روش تجزیه مقدار منفرد به صورت زیر است:

$$A = U \Sigma V^{H} \quad (1)$$

در این‌جا فرض شده A یک ماتریس مربعی با ابعاد $n \times n$ باشد. در صورتی که A ماتریس مربعی نباشد نیز می‌توان از تجزیهٔ مقدار منفرد به همان راحتی استفاده کرد.

Σ یک ماتریس حقیقی قطری با عناصر قطری $\sigma_i = [\Sigma]_{i,i}$ است. σ_iها مقادیر منفرد ماتریس A بوده و به ترتیب از بزرگ به کوچک مرتب شده‌اند (رابطه ۳). در روش تجزیهٔ مقدار منفرد در مرحلهٔ نخست با ضرب پی در پی ماتریس‌های تبدیل هاوس هولدر، ماتریس A به شکل دو قطری تبدیل می‌شود و در مرحلهٔ بعدی ماتریس دوقطری حاصل با استفاده از الگوریتم گولاب- راینش به شکل قطری تبدیل می‌شود. در واقع با هر بار ضرب کردن ماتریس A در یک ماتریس تبدیل هاوس هولدر تعدادی از عناصر غیر قطری ماتریس به صفر تبدیل می‌شوند.

U و V ماتریس‌های مربع، یکانی (unitary) و $n \times n$ هستند. ستون‌های u_i و v_i به ترتیب بردارهای منفرد چپ و راست ماتریس A هستند. ماتریس‌های $U = U_1 \cdots U_n$ و $V = V_1 \cdots V_{n-2}$ هر یک حاصل‌ضرب ماتریس‌های هاوس‌هولدری هستند که برای قطری کردن ماتریس به‌کار برده شدند.

همین‌که دو قطری کردن ماتریس A حاصل شد، قدم

$$\begin{bmatrix}\times&\times&\times&\times\\ \times&\times&\times&\times\\ \times&\times&\times&\times\\ \times&\times&\times&\times\\ \times&\times&\times&\times\end{bmatrix}\xrightarrow{U_1}\begin{bmatrix}\times&\times&\times&\times\\ 0&\times&\times&\times\\ 0&\times&\times&\times\\ 0&\times&\times&\times\\ 0&\times&\times&\times\end{bmatrix}\xrightarrow{V_1}\begin{bmatrix}\times&\times&0&0\\ 0&\times&\times&\times\\ 0&\times&\times&\times\\ 0&\times&\times&\times\\ 0&\times&\times&\times\end{bmatrix}\xrightarrow{U_2}\begin{bmatrix}\times&\times&0&0\\ 0&\times&\times&\times\\ 0&0&\times&\times\\ 0&0&\times&\times\\ 0&0&\times&\times\end{bmatrix}\xrightarrow{V_2}$$

بعدی در روش تجزیه مقدار منفرد عبارت است از صفر کردن عناصر بالای قطر در ماتریس دو قطری B.

$$U_\Sigma^H B V_\Sigma = \Sigma = \mathrm{diag}(\sigma_1,\dots,\sigma_n) \in \Re^{m\times n}$$
$$B = U_B^H A V_B$$
$$U = U_B U_\Sigma$$
$$V = V_B V_\Sigma$$
$$U^T A V = \Sigma$$

که در آن $\Re^{m\times n}$ مجموعه ماتریس‌های حقیقی $m\times n$ است.

پس از به اتمام رسیدن روند تجزیه، مقدار منفرد عناصر قطری ماتریس Σ به صورت زیر است.

$$\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3 \ge \cdots \ge \sigma_n \ge 0 \qquad (۳)$$

۲-۲ روش لنکزوس

روش لنکزوس، ابزار ریاضی است که می‌توان به کمک آن معادلات ویژه مقدار متقارن تُنُک و بسیار بزرگ را حل کرد. این روش با سه قطری کردن جزئی ماتریس، کار خود را انجام می‌دهد. وقتی که تعداد کمی از ویژه مقادیر کوچک یا بزرگ مورد نیاز باشد، این روش بسیار خوب و مؤثر عمل می‌کند. روش لنکزوس برای سه قطری کردن ماتریس از تبدیل هاوس‌هولدر استفاده نمی‌کند. استفاده از روش هاوس‌هولدر در صورتی که A بزرگ یا تُنُک باشد، باعث ایجاد ماتریس‌های بزرگ و چگال می‌شود. در چنین شرایطی یا هنگامی که فقط تعداد کمی از مقادیر منفرد مورد نیاز باشند می‌توان از روش لنکزوس کمک گرفت. عناصر ماتریس سه قطری مستقیماً محاسبه می‌شوند.

فرض کنید $U^TAV = B$ باشد که در آن B شکل دوقطری شده ماتریس A است.

$$V = [v_1,\dots,v_n] \qquad V^TV = I_n \qquad (۴)$$
$$U = [u_1,\dots,u_m] \qquad U^TU = I_m$$
$$B = \begin{bmatrix}\alpha_1 & \beta_1 & & \dots & 0\\ 0 & \alpha_2 & \ddots & & \vdots\\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \beta_{n-1}\\ 0 & \dots & & 0 & \alpha_n\end{bmatrix}$$

از فرض مسئله نتیجه می‌شود:

$$AV = UB \qquad (۵)$$
$$A^TU = VB^T$$

با مقایسه ستون‌ها در معادلات فوق به ازای $j=1,\dots,n$ روابط زیر نتیجه می‌شود:

(۶)

$$A^Tu_j = \alpha_j v_j + \beta_j v_{j+1} \qquad \beta_n u_{n+1} \equiv 0$$
$$Av_j = \alpha_j u_j + \beta_{j-1} u_{j-1} \qquad \beta_0 u_0 \equiv 0$$

با تعریف کردن $r_j = Av_j - \beta_{j-1}u_{j-1}$ و $p_j = A^Tu_j - \alpha_j v_j$ نتیجه می‌شود که:

$$\alpha_j = \pm\|r_j\|_2 \qquad (۷)$$
$$\beta_j = \pm\|p_j\|_2$$
$$u_j = r_j/\alpha_j$$
$$v_{j+1} = p_j/\beta_j$$

تکرار این روابط، β را به سمت صفر نزدیک می‌کند و بدین‌صورت ماتریس به شکل قطری در خواهد آمد و ماتریس‌های U و V نیز به‌دست می‌آیند.

۳ فیلتر ویژه‌تصویر

طبق تعریف:

$$A = U\Sigma V^{H} \qquad (۸)$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \cdots \geq \sigma_n \geq 0 \qquad (۹)$$

می‌توان نشان داد که (عالی‌دانشور، ۱۳۸۳):

$$A = I_1 + I_2 + \cdots + I_n \qquad (۱۰)$$

که در آن

$$I_i = \sigma_i u_i v_i^{H} \qquad (۱۱)$$

ماتریس I_i مربوط است به ویژه‌تصویر با وزن iام.
kامین جمع جزئی A یا $F_k(A)$ به ازای $1 \leq k \leq n$، به صورت زیر تعریف می‌شود.

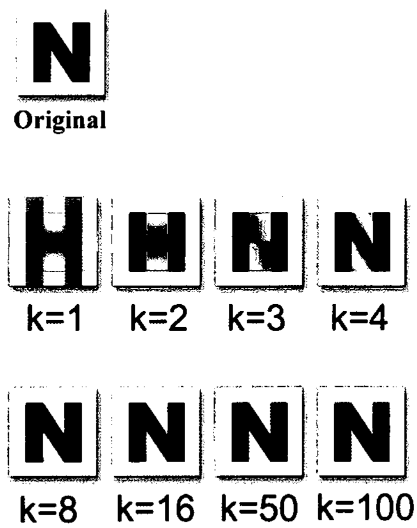
$$F_k(A) = I_1 + \cdots + I_k \qquad (۱۲)$$

این عبارت به عنوان تقریب تجزیه مقدار منفرد قطع شده (truncated SVD) یا ماتریس با مرتبه کاهش یافته (reduced rank matrix) ماتریس A شناخته می‌شود.
هرچه k بزرگ‌تر باشد $F_k(A)$ تقریب بهتری از ماتریس A خواهد بود، تا زمانی که k برابر n شود و آنگاه $F_n(A) = A$.

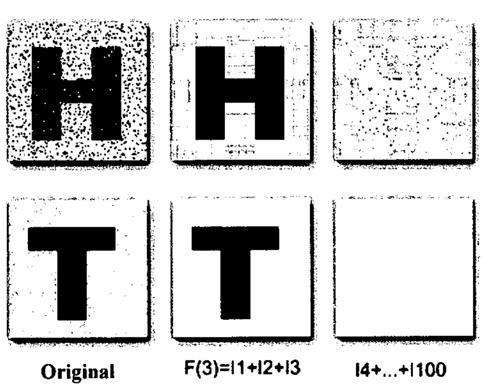
چون تعداد نسبتاً کمی از ویژه‌تصاویر می‌توانند تصویر بازسازی شده قابل قبولی را به‌دست دهند، معمولاً تعداد کمی از آنها مورد نیاز است (شکل ۱).

بسیاری از شیوه‌های تضعیف نوفه، داده‌ها را به حوزه‌ای منتقل می‌کنند که نوفه و سیگنال از همدیگر تفکیک شوند و در دو جای مختلف قرار گیرند. تضعیف نوفه به روش ویژه‌تصویر نیز به همین طریق عمل می‌کند. این به آن علت است که انرژی‌های همدوس در تعداد کمی از اولین ویژه‌تصاویر قرار گرفته‌اند، در حالی‌که انرژی‌های غیرهمدوس بیشتر توزیع شده‌اند و گسترده هستند. شکل ۲ این پدیده را با تصویر نوفه‌داری از حروف H و T انگلیسی نشان می‌دهد.

روش‌های F-xy به دلیل کارایی خوب در تضعیف نوفه، نداشتن اثرات جانبی (artifact) و توانایی اعمال بر روی داده‌های شیب‌دار جالب هستند.
به‌طورکلی روش‌های F-xy سه‌بعدی واقعی هستند. در زیر نشان داده خواهد شد که چگونه فیلترکردن به‌روش ویژه‌تصویر می‌تواند به‌صورت سه‌بعدی واقعی در حوزهٔ F-xy صورت گیرد، در حالی‌که هر مقطع بسامد ثابت (هم بسامد) به طور مستقل پردازش می‌شود.



شکل ۱. مجموع جزئی K ویژه‌تصویر ابتدایی از تصویر حرف انگلیسی N.



شکل ۲. مجموع ۳ ویژه‌تصویر ۱، ۲ و ۳ و همچنین مجموع مابقی ویژه‌تصاویر تصویر نوفه‌دار حروف انگلیسی H و T.

در این حوزه، ویژگی‌های وجود دارد که آن را برای تضعیف نوفه تصادفی مناسب ساخته و آن را تبدیل به یک رقیب قدرتمند برای روش‌های پیشگو کرده است.

۳-۱ عملکرد فیلتر

تجزیه ویژه‌تصویر را می‌توان برای تضعیف نوفه در حجم‌های سه‌بعدی برانبارش شده تریس‌های لرزه‌ای به‌کار برد. یک شبکه $n \times n$ از تریس‌های برانبارش شده مفروض است. فاصله بین خطوط شبکه می‌تواند یکسان نباشد. مراحل مختلف فیلترکردن به روش ویژه‌تصویر به شرح زیر است که در شکل ۳ آمده است.

۱- تهیه DFT هر تریس

۲- به ازای هر بسامد

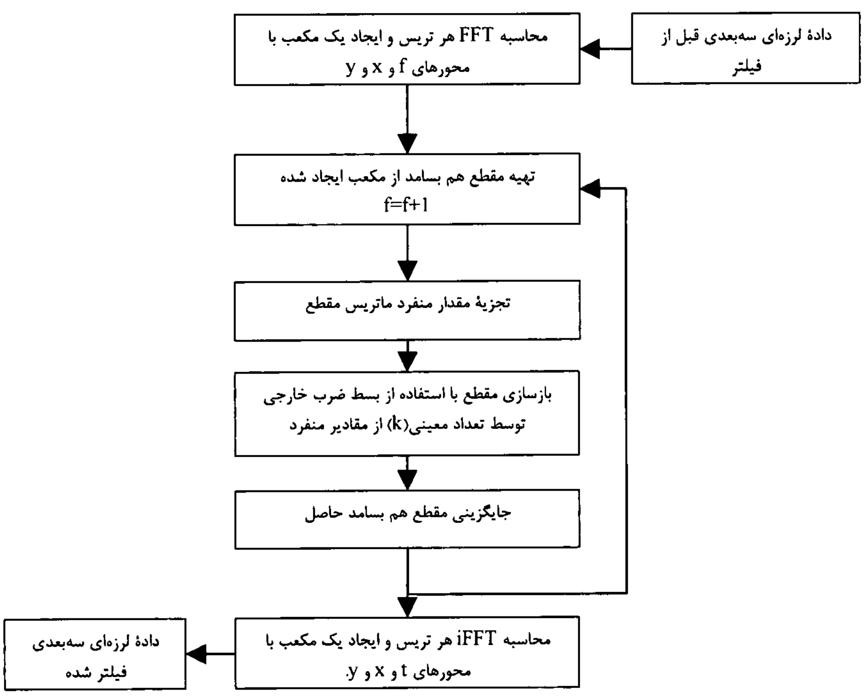
۲-۱- تشکیل ماتریس مختلط $A_{n\times n}$ که المان‌های آن مقادیر DFT تریس‌ها برای این بسامد هستند

۲-۲- محاسبه $F_k(A)$ برای چند مقدار کوچک k

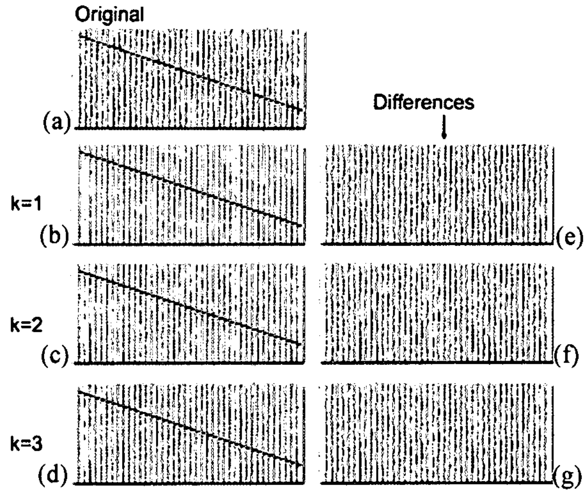
۲-۳- جای‌گذاری مقادیر DFT تریس‌ها با مقادیر $F_k(A)$

۳- انجام عمل معکوس DFT روی هر تریس

مقدار تضعیف نوفه با افزایش اندازه شبکه و همچنین با کاهش k، افزایش پیدا می‌کند. با ادامه افزایش اندازه شبکه یا ادامه کاهش k ممکن است مانند آنچه که در شکل ۴-e دیده می‌شود به سیگنال‌های همدوس نیز آسیب وارد شود. همواره باید اندازه شبکه یا مقدار k را به مقداری بهینه تنظیم کرد. شکل ۴-a برشی از مکعب داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی است. شکل ۴-c سیگنال استخراج شده از شکل ۴-a و شکل ۴-f نوفه حذف شده از آن است. به ازای K=۲ هم عملکرد فیلتر خوب است و هم اینکه هیچ انرژی همدوسی حذف نشده است. افزایش مقدار k عملکرد فیلتر را تضعیف کرده و در نتیجه مقدار نوفهٔ کم‌تری حذف خواهد شد (شکل ۴-g). لازم به اشاره است که در کلیه مقاطع این مقاله داده‌های لرزه‌ای به‌کار رفته مصنوعی و به صورت سه‌بعدی هستند و نوفه‌ها هم به صورت مصنوعی تولید و به داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی افزوده شده‌اند. برای جزئیات بیشتر به عالی‌دانشور (۱۳۸۳) رجوع شود.



شکل ۳. نمودار فرایندی عملکرد فیلتر ویژه‌تصویری در حوزهٔ F-xy.



شکل ٤. عملکرد فیلتر ویژه‌تصویر با مقادیر مختلف k روی یک دادهٔ مصنوعی سه‌بعدی که مقطعی از آن در (a) دیده می‌شود.

در عمل مقادیر معمول k عبارت‌اند از:

K=۱ (عملکرد فیلتر خشن)

K=۲ (عملکرد فیلتر قوی)

K=۳ (عملکرد فیلتر متوسط)

مدت زمان پردازش برای این روش قابل مقایسه با شیوه فیلتر پیشگوی F-xy خواهد بود هرگاه پارامترها برای هر دو یکسان لحاظ شود. با استفاده از روش لنکزوس حتی می‌توان مدت اجرا را تا چند برابر هم کاهش داد.

۲-۳ ویژگی‌ها

روش تجزیه مقدار منفرد که به‌خوبی شناخته شده است، خواص زیر را برای فیلتر ویژه‌تصویر، به ازای مقادیر صحیح k پیش‌بینی می‌کند. این ویژگی‌ها فقط در حوزهٔ F-xy وجود دارند.

الف- خاصیت صحت (exactness property)

اگر مقطع لرزه‌ای بدون نوفه دارای k شیب مختلف بوده و فیلتر ویژه‌تصویر بر روی آن اجرا شود، آنگاه $F_k(A)=A$. به بیان دیگر اعمال فیلتر ویژه‌تصویر روی داده بدون نوفه هیچ کاری انجام نمی‌دهد، به شرطی که تعداد شیب‌ها محدود باشند (شکل ۵). ویژگی مشابهی نیز توسط کانالز (۱۹۸۴) برای فیلتر پیشگوی F-x ارائه شد.

ب- خاصیت استاتیک (static property)

خروجی فیلتر (به ازای k ویژه‌تصویر، $F_k(A)$) مستقل از میزان شیفت استاتیک در امتدادهای x و y است. بدان معنی که این فیلتر را می‌توان قبل یا بعد از تصحیحات استاتیک به کار برد و در هر دو حال نتایج مشابه به‌دست آورد (شکل ۶).

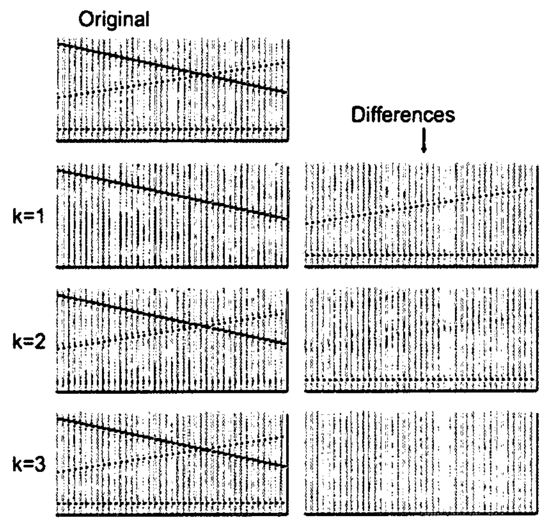
این ویژگی بیان می‌کند که این فیلتر می‌تواند برای تضعیف نوفه از داده‌های قبل از برانبارش، قبل از تصحیحات استاتیک یا حتی قبل از دیکانولوشن نیز به‌کار رود.

ج- خاصیت ترتیب (ordering property)

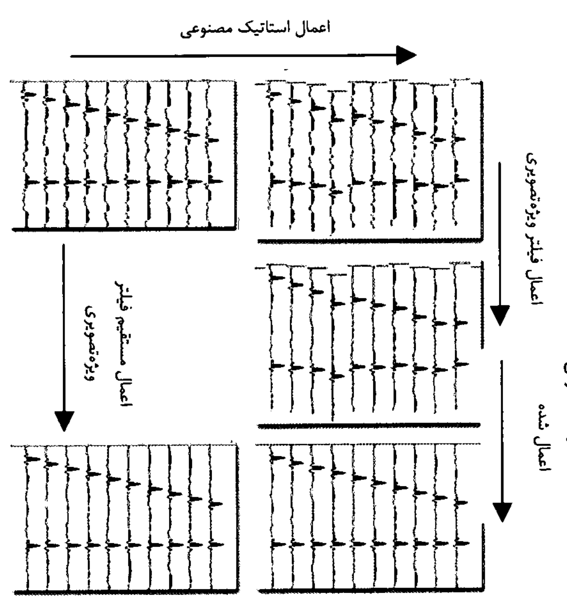
خروجی فیلتر (به ازای k ویژه‌تصویر، $F_k(A)$) از ترتیب x و y ها در ماتریس مستقل است. این بدان معنی است که می‌توان ترتیب مؤلفه‌های ماتریس را در راستاهای x و y به هم ریخت و سپس فیلتر را اعمال کرد. فیلتر این جابه‌جایی‌ها را اصلاح خواهد کرد و نتایجی مشابه با حالتی که فیلتر روی داده‌های مرتب اعمال شده باشد، ارائه خواهد داد (شکل ۷). نتیجه این‌که فیلتر ویژه‌تصویر در لبه‌ها و قسمت‌های حاشیه‌ای شبکه (grid) نیز خوب عمل می‌کند.

د- خاصیت تعامد

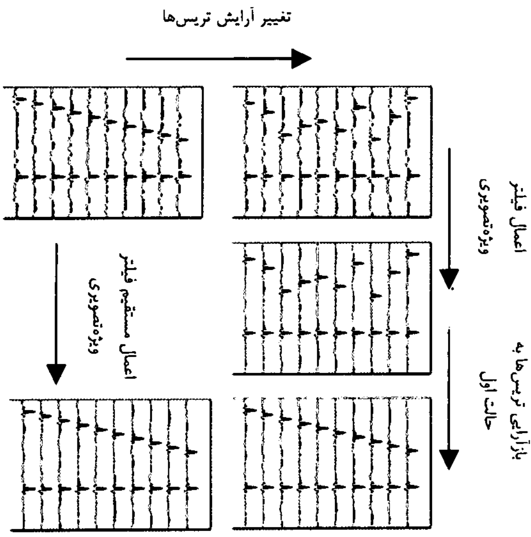
اعمال مجدد فیلتر بدون تغییر دادن پارامترهای آن هیچ تأثیری بر داده‌ها نخواهد گذاشت. از نظر ریاضی دلیل آن این است که $F_k(A)$ تصویر کردنی متعامد روی یک سری ماتریس‌های $n\times n$ از مرتبه k است. به بیان ریاضی: $F_k(F_k(A))=F_k(A)$.



شکل ۵. ویژگی صحت. عملکرد فیلتر ویژه‌تصویر نشان می‌دهد که افزایش مقدار k به مقادیر بیش از تعداد شیب‌ها هیچ تأثیری روی ورودی فیلتر نمی‌گذارد.



شکل ٦. خاصیت استاتیک. شکل سمت چپ بالا یک داده مصنوعی نوفه‌دار را با دو رویداد نشان می‌دهد. با اعمال فیلتر ویژه‌تصویر پس از تغییراتی در استاتیک، همان نتیجه‌ای را به‌دست می‌دهد که بدون اعمال استاتیک به‌دست می‌داد.



شکل ۷. خاصیت ترتیب. شکل سمت چپ بالا یک دادهٔ مصنوعی نوفه‌دار را با دو رویداد نشان می‌دهد. این شکل روشن می‌سازد که ترتیب تریس‌ها هیچ‌گونه تأثیری روی عملکرد فیلتر ویژه‌تصویر نمی‌گذارند.

۳-۳ حفاظت از سیگنال و تضعیف نوفه در فیلتر ویژه‌تصویر

هدف از اعمال این فیلتر حفظ هر چه بیشتر سیگنال و تضعیف هرچه بیشتر نوفه است. برای سنجش این مسئله به طور نظری می‌توان پارامتری با نام SP (signal-preservation) که معرف مانایی سیگنال است تعریف کرد. اگر F_i مقدار نمونه iام از کل تریس‌ها بعد از به کار بردن فیلتر، S_i مقدار اصلی نمونه سیگنال قبل از این‌که به آن نوفه اضافه شده باشد و N_i مقدار نمونه نوفه باشند، آنگاه پارامتر SP به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$SP = 100\frac{\sum_i S_i F_i}{\sum_i S_i^2} \qquad (۱۳)$$

اگر i روی همهٔ نمونه‌ها انجام شود حاصل این کسر عددی بین صفر الی ۱۰۰ است. مقدار ۱۰۰ به معنی ابقاء کامل سیگنال است. همچنین مقدار صفر بدین معنی است که

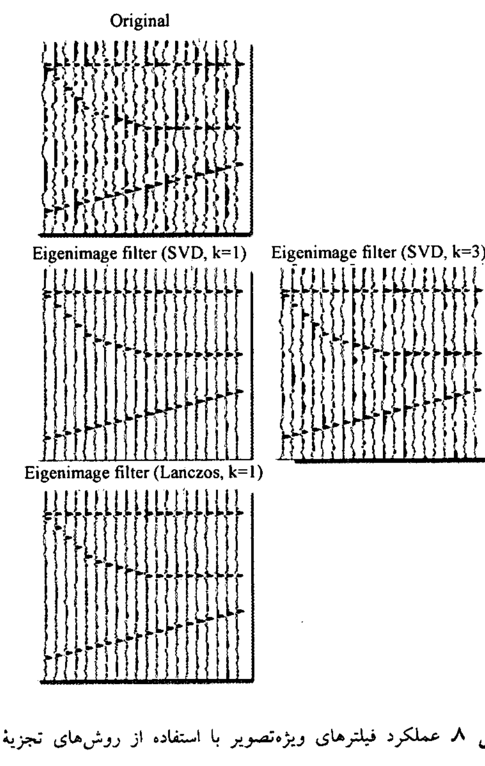
هیچ نوع همبستگی (correlation) بین خروجی فیلتر و سیگنال وجود ندارد.

پارامتر دیگری که می‌توان از آن بهره جست معرف تضعیف نوفه است که NR (noise removal) نام دارد و به صورت زیر تعریف می‌شود.

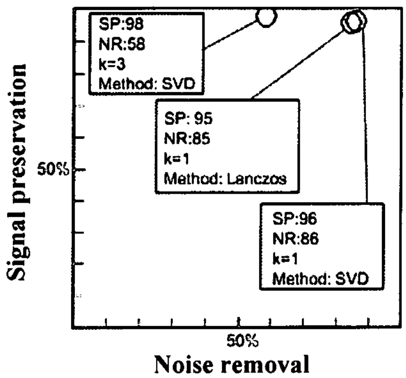
$$NR = 100\left(1 - \frac{\sum_i (F_i - S_i)^2}{\sum_i N_i^2}\right) \qquad (۱۴)$$

وقتی NR، ۱۰۰ باشد بدین معنی است که خروجی فیلتر کاملاً با سیگنال تطابق دارد و صفر بودن آن به آن معنی است که هیچ نوفه‌ای از داده حذف نشده است.

شکل ۸ داده‌ای مصنوعی را نشان می‌دهد که با استفاده از فیلترهای ویژه‌تصویر (با استفاده از روش تجزیه مقدار منفرد و روش لنکزوس) پردازش شده و نوفهٔ آن کاهش یافته است. مقدار تضعیف نوفه و حفظ سیگنال با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴) در شکل ۹ آمده است.



شکل ۸ عملکرد فیلترهای ویژه‌تصویر با استفاده از روش‌های تجزیهٔ مقدار منفرد و لنکزوس روی داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی . در این شکل برشی از مکعب داده‌های سه‌بعدی آورده شده است.



شکل ۹. توانایی فیلترهای ویژه‌تصویر در تضعیف نوفه و حفاظت از سیگنال روی داده‌های شکل ۹.

۴ نتیجه‌گیری

فیلتر ویژه‌تصویر در حوزهٔ F-xy جایگزین مناسبی برای فیلتر پیشگو در تضعیف نوفه تصادفی از مکعب داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای است. در این فیلتر بر خلاف دیگر روش‌های ویژه‌تصویر، به دلیل حوزهٔ خاصی که در آن عمل می‌کند، هیچ مشکلی در مواجهه با بازتابنده‌های شیبدار وجود ندارد. فیلتر ویژه‌تصویر تعداد شیب‌ها را محدود فرض می‌کند. حفاظت از سیگنال و حذف خوب نوفه از مشخصات این فیلتر است. از نظر سرعت، این فیلتر در حالتی که از تجزیه مقدار منفرد استفاده می‌کند با فیلترهای پیشگو برابر است ولی با به‌کارگیری روش لنکزوس می‌توان سرعت آن را تا چند برابر بهبود بخشید. این فیلتر روی لبهٔ مکعب داده‌های لرزه‌ای به خوبی قسمت‌های میانی مکعب داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی عمل می‌کند و این یکی از برتری‌های آن نسبت به فیلترهای پیشگو است. بهبود سرعت در این روش ممکن است در آینده منجر به استفاده از آن در داده‌های قبل از برانبارش نیز شود.

منابع

عالی‌دانشور، ح.، ۱۳۸۳، تضعیف نوفه‌ها از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی در حوزه F-xy، پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Al-Yahya, K. M., 1991, Application of the partial Karhunen-Loeve transform to suppress random noise in seismic sections: Geophys. Prosp., **39**, 77-93.

Andrews, H. C., and Patterson, C, L., 1976, Outer product expansions and their uses in digital image processing: IEEE Trans. Computers., **25**, 140-148.

Canales, L. L., 1984, Random noise reduction: 54th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, Session: S10.1.

Chase, M. K., 1992, Random noise reduction by 3-D spatial prediction filtering: 62nd Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1152-1153.

Golub, G. H., and Van Loan, C. F., 1989, Matrix Computations 2nd ed.: John Hopkins University Press.

Gounon, P. Y., Mars, J. I., and Goncalves, D., 1998, Wideband spectral matrix filtering: 68th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., New Orleans, Louisiana, USA, Expanded Abstracts, 1150-1153.

Jones, I. F., and Levy, S., 1987, Signal-to-noise ratio enhancement in multichannel seismic data via the karhunen-Loeve transform: Geophys. Prosp., **35**, 12-32.

Ozdemir, A., Ozbek, A., Ferber, R., and Zerouk, K., 1999, F-xy projection filtering using helical transformation: 69th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Houston, USA, Expanded Abstracts, 1231-1234

Soubaras, R., 1994, Signal-preserving random noise attenuation by the F-x projection: 64th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1576-1579.

Trickett, S. R., 2003, F-xy eigenimage noise suppression: Geophys., **68**, No. 2 751-759

Ulrich, T. J., Freire, S., and Siston, P., 1988, Eigenimage processing of seismic sections: 58th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, Session: S22. 4.

Ulrych, T. J., Sacchi, M. D., and Freire, S. L. M., 1999, Eigenimage processing of seismic sections, in Kirlin, R. L., and Done, W. J., Eds., covariance analysis for seismic signal processing: Soc. Expl. Geophys., 241-274.