

مهاجرت در حوزه فوریه با وجود تغییرات قائم سرعت

مریم خاکی فیروز^۱ و حمیدرضا سیاهکوهی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد پردازش داده‌های لرزه‌ای، شرکت کدکم، ایران
^۲ دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
 (دریافت: ۸۷۸۲۸، پذیرش نهایی: ۸۹/۱۱/۱۹)

چکیده

مهاجرت (f-k) یک روش مهاجرت در حوزه فوریه است (استالت، ۱۹۷۸) که براساس تغییر بسامد زمانی به بسامد مکانی (یا به بیان دیگر تصویرسازی) بنا نهاده شده است. این الگوریتم طیف مهاجرت‌نیافته را در حوزه فوریه مستقیماً به طیف مهاجرت‌یافته تبدیل می‌کند. این روش ساده و کارا است اما به محیط‌های سرعت ثابت محدود می‌شود. روش مهاجرت v(z)(f-k) که در این مقاله معرفی می‌شود، قادر است مهاجرت را برای محیط‌هایی با تغییرات قائم سرعت توسعه دهد. از آنجاکه روش معرفی شده به صورت فیلتر ناپایا فرمول‌بندی می‌شود، دیگر نیازی به تغییر متغیر ندارد. این روش در حوزه فوریه مستقیماً به‌ازای هر عدد موج، یک فیلتر مهاجرت ناپایا را به نمونه‌های بسامد ورودی اعمال می‌کند تا نمونه‌های بسامد مهاجرت‌یافته را ایجاد کند. این روش در عمل کندتر از روش (f-k) عمل می‌کند اما ساختارهای اضافی را که روش (f-k) به خاطر درونی‌یابی مقادیر موهومی در حوزه بسامد تولید می‌کرد، ایجاد نمی‌کند. تغییرات قائم سرعت در این روش یا به صورت rms و یا با دقت بیشتر به روش WKBJ اعمال می‌شود. در این تحقیق روش v(z)(f-k) روی مدل مصنوعی اعمال و نتایج با روش مهاجرت (f-k) مقایسه می‌شود. همچنین کارایی روش روی یک مقطع لرزه‌ای واقعی نیز نشان داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مهاجرت، مهاجرت حوزه فوریه، فیلتر ناپایا، تغییرات قائم سرعت

Fourier migration for vertical velocity variations

Khakifirooz, M.¹ and Siahkoochi, H. R.²

¹ Geophysicists in Center for seismic data processing, Cadcam Iran P.J.S. Co.

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

(Received: 18 Nov 2008, Accepted: 8 Feb 2011)

Abstract

The Stolt (f-k) migration algorithm is a direct (i.e. non-recursive) Fourier-domain technique based on a change of variables (or equivalently, a mapping) that converts the input spectrum to the output spectrum. The algorithm is simple and efficient but limited to constant velocity. A v(z)(f-k) migration method, capable of very high accuracy for vertical variations of velocity, can be formulated as a non-stationary combination filter that avoids the change of variables.

In this article, we compare the efficiency of Stolt (f-k) migration (eq. 1) with two non-stationary filters based on v(z)(f-k) migration methods.

$$\Phi(k_x, z, \omega) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x, z, t) \exp(-i[\omega t - k_x x]) dx dt \quad (1)$$

The result of applying v(z)(f-k) migration is a direct Fourier-domain process that for

each wavenumber applies a non-stationary migration filter to a vector of input frequency samples to create a vector of output frequency samples (eq. 2).

$$\Psi(k_x, T, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(k_x, 0, \omega) m(k_x, T, \omega) d\omega \quad (2)$$

$$m(k_x, T, \omega) = \exp(i\eta T) = \exp(iT \sqrt{\omega^2 - v^2 k_x^2}) = \exp(i\omega T \sqrt{1 - p^2 v^2})$$

The filter matrix is analytically specified in the mixed domain of input frequency and migrated time. It can be moved to the full Fourier domain of input frequency and output frequency by a fast Fourier transform. When applied for seismic traces the $v(z)(f-k)$ algorithm is slower than the Stolt method but without the usual artifacts related to complex-valued frequency domain interpolation.

We used two different schemes to consider the variations of velocity with depth. Vertical variations through an rms velocity (straight-ray) assumption are handled by $v(z)(f-k)$ method with no additional cost. Greater accuracy at slight additional expense is obtained by extending the method to a WKBJ phase shift integral. We tested the efficiency of these methods on synthetic seismic records. Finally $v(z)(f-k)$ method is applied to a real seismic section and the result are presented.

Key words: Migration, Fourier domain migration, Non-stationary filter, Vertical variation of velocity.

۱ مقدمه

کیرشهوف (اشنایدر، ۱۹۷۸) که از حل انتگرالی معادله موج اسکالر استفاده می‌کند و مهاجرت به روش تفاضل متناهی (کلریت، ۱۹۸۵) که حل دیفرانسیلی معادله موج اسکالر را به کار می‌برد.

۲- روش‌های مهاجرتی که در حوزه فوریه صورت می‌گیرند. دو شیوه اصلی برای مهاجرت در حوزه فوریه و تعدادی زیرمجموعه از آنها وجود دارد. از میان این روش‌ها می‌توان به روش مهاجرت $(f-k)$ ، مهاجرت به روش جابه‌جایی فاز، مهاجرت فوریه‌ای گام‌های گسسته (استوفا، ۱۹۹۰) و مهاجرت فوریه‌ای گام‌های گسسته بسط داده شده (بیوندی، ۲۰۰۵) اشاره کرد.

استالت در ۱۹۷۸ روشی را که مهاجرت به روش $(f-k)$ نامید، معرفی کرد. این روش فقط برای حالتی به کار می‌رود که سرعت ثابت است. البته استالت روش خود را برای حالت‌های با سرعت متغیر هم بسط داد که دقت زیادی نداشت (استالت، ۱۹۷۸ و ایلماز، ۲۰۰۱).

از آنجا که روال تهیه مقاطع لرزه‌ای ایجاب می‌کند که ردلرزه‌های حاصل از برانبارش در محل هر CMP در راستای قائم کنار هم چیده شوند، این امر باعث می‌شود ساختارهای مشاهده شده روی مقاطع لرزه‌ای، نماینده درستی از ساختارهای زمین‌شناسی نباشند. از این رو ضرورت دارد که روی مقاطع لرزه‌ای حاصل از برانبارش، روش‌هایی اعمال شود تا با جابه‌جایی زمانی و مکانی رویدادهای لرزه‌ای، مقاطع درست‌تری ایجاد شود. این روش‌ها در مجموع با عنوان روش‌های مهاجرت شناخته می‌شوند (ایلماز، ۲۰۰۱). البته روش‌های مهاجرتی هم وجود دارند که روی ثبت‌های لرزه‌ای قبل از برانبارش اعمال می‌شوند که موضوع بحث این مقاله نیستند.

به‌طور کلی روش‌های مهاجرت بعد از برانبارش به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند:

۱- روش‌های مهاجرتی که در حوزه‌ای غیر از حوزه فوریه صورت می‌پذیرند. مانند مهاجرت به روش

$\Psi(x, z, t)$ فقط شامل امواج بالا رونده و سرعت V ثابت است. روش استتالت جبهه موج را از $(x-t)$ به (k_x) انتقال می دهد.

$$\Phi(k_x, z, \omega) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x, z, t) \exp(-i[\omega t - k_x x]) dx dt \quad (1)$$

که در آن $\Phi(k_x, z, \omega)$ طیف فوریه دو بُعدی مربوط به $\Psi(x, z, t)$ است و k_z به صورت (۲) تعریف می شود.

$$k_z^2 = \frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 \quad (2)$$

در اینجا فرض شده که Z به سمت پایین افزایش می یابد. با این فرض، حل عمومی معادله هلمهولتز به صورت رابطه (۳) خواهد بود:

$$\Phi(k_x, z, \omega) = A(k_x, \omega) \exp(ik_z z) + B(k_x, \omega) \exp(-ik_z z) \quad (3)$$

که در آن A, B طیف دامنه مربوط به امواج بالا رونده و پایین رونده هستند.

چون جبهه موج فقط شامل امواج بالا رونده است پس $B=0$ فرض می شود و $A(k_x, \omega)$ با $\Phi(k_x, 0, \omega)$ (طیف دامنه مربوط به داده های ثبت شده)، برابر است. در مهاجرت به دنبال تعیین $\Psi(x, z, 0)$ هستیم.

$$\Psi(x, z, 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(k_x, 0, \omega) \exp(ik_z z) \exp(-ik_x x) dk_x d\omega \quad (4)$$

معادله (۴) مقطع عمقی مهاجرت یافته را می دهد. البته مقطع زمانی مهاجرت یافته را با استفاده از $Z=VT$ و تعریف $\eta = vk_z$ می توان از رابطه (۴) به دست آورد.

$$\Psi(x, T, 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int \int \Phi(k_x, 0, \omega) \exp(i\eta T) \exp(-ik_x x) dk_x d\omega \quad (5)$$

گرداگ (۱۹۸۷) شکل دوم از مهاجرت در حوزه فوریه را مطرح کرد، که به روش جابه جایی فاز یا روش بازگشتی معروف است. این روش را برخلاف روش استتالت می توان برای حالتی که سرعت با عمق متغیر است به کاربرد.

در این مقاله از آنجا که سعی بر برطرف کردن کاستی روش $(f-k)$ است، لذا ابتدا مروری بر روش $(f-k)$ استتالت می شود. سپس روش $v(z)(f-k)$ را به صورت عملگر فیلتر ناپایا که روی بردار بسامدها با عدد موج ثابت اعمال می شود، فرمول بندی می کنیم. در این تحقیق مرحله تصویرسازی طیفی روش $(f-k)$ استتالت با عملگر فیلتر ناپایا جایگزین می شود و دو نسل متفاوت از این فیلتر ناپایا که یکی با فرض سرعت rms و دیگری با تقریب WKBJ درجه اول است، معرفی می شوند. در نهایت نرم افزارهای هردو روش $(f-k)$ و $v(z)(f-k)$ که نگارندگان در محیط مطلب (MATLAB) آنها را نوشته اند، روی رویدادهای لرزه ای هذلولی و پاسخ ضربه مصنوعی و مقطع لرزه ای واقعی اعمال و نتایج با هم مقایسه می شوند.

۲ مبانی نظری روش های $(f-k)$ و $v(z)(f-k)$

نظریه مطرح شده از سوی استتالت (۱۹۷۸) از مقطع دورآفت صفر دو بُعدی استفاده می کند. در مدل بازتابنده انفجاری (ایلماز، ۲۰۰۱) مقطع دورآفت صفر، $\Psi(x, 0, t)$ ، به صورت مقدار مرزی جبهه موج، $\Psi(x, z, t)$ که در $z=0$ اندازه گیری شود، در نظر گرفته می شود. $\Psi(x, z, t)$ از حل معادله موج اسکالر دو بُعدی به دست می آید (آکی و ریچارد، ۲۰۰۲). در پردازش داده های لرزه ای بازتابی با اعمال مهاجرت به دنبال به دست آوردن جبهه موج در محل بازتابنده (یعنی $\Psi(x, z, 0)$) هستیم و تنها اطلاعاتی که در اختیار ما هست، جبهه موج ثبت شده در سطح یا $\Psi(x, 0, t)$ است.

دو فرض اساسی روش استتالت این است که

هستند که در آنها بسامد مهاجرت یافته η از حقیقی به مختلط تغییر یافته است. تصویرسازی طیفی در روش (f-k) منطقه نیم‌دایره را از مثلث به وجود آورده است. نقطه p_2 به مختصات (η, k_x) از نقطه p_1 به مختصات (ω, k_x) به دست می‌آید (مارگریو، ۲۰۰۱).

ایده اولیه روش $v(z)(f-k)$ به کاررفته در این مقاله را مارگریو در ۲۰۰۱ پیشنهاد کرد. این روش قادر است با دقت زیاد برای مواقعی که سرعت انتشار موج با عمق تغییر می‌کند، با طراحی فیلتری وابسته به زمان، مقطع مهاجرت یافته را در حوزه فوریه به دست آورد. روش پیش گفته در حوزه فوریه دوبعدی، طیف مقطع مهاجرت یافته را به طور مستقیم از طیف مقطع لرزه‌ای مهاجرت نیافته برای سرعت $v(z)$ مشخص بازسازی می‌کند. فیلتر ناپایا (مارگریو، ۱۹۹۸) در حوزه مختلط را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\Psi(T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\omega) \alpha(\omega, T) \exp(i\omega T) d\omega \quad (۹)$$

که در آن $\Psi(T)$ سری زمانی خروجی، $\Phi(\omega)$ تبدیل فوریه سری زمانی ورودی و $\omega(t, \alpha)$ فیلتر ناپایا در حوزه فوریه است. اگر وابستگی T در معادله (۹) وجود نداشته باشد، این معادله به فیلتر ناپایا در حوزه فوریه تبدیل می‌شود.

اعمال ایده فیلتر ناپایا به روش مهاجرت استالت از معادله (۵) آغاز می‌شود. اولین مرحله در این راستا، حذف عکس تبدیل فوریه k_x است.

$$\Psi(k_x, T, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(k_x, 0, \omega) m(k_x, T, \omega) d\omega \quad (۱۰)$$

که در آن فیلتر مهاجرت $m(k_x, T)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

حل عددی معادله (۵) با اشکال روبه‌رو می‌شود، چون $\omega d \exp(i\eta T)$ همخوانی ندارد. استالت این مشکل را با تبدیل متغیر ω به η حل کرد:

$$\omega(\eta, k_x) = \text{sign}(\eta) \sqrt{\eta^2 + v^2 k_x^2} \quad (۶)$$

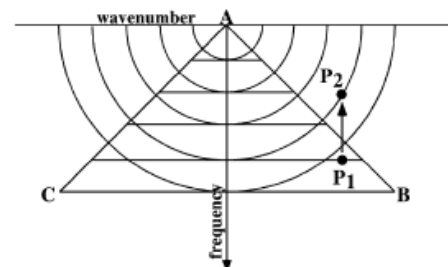
$$\eta(\omega, k_x) = \text{sign}(\omega) \sqrt{\omega^2 - v^2 k_x^2}$$

با جای گذاری رابطه (۶) در (۵) داریم:

$$\theta(k_x, \eta) = \frac{\eta}{\sqrt{\eta^2 + v^2 k_x^2}} \Phi(k_x, 0, \sqrt{\eta^2 + v^2 k_x^2}) \quad (۷)$$

$$\Psi(x, T, 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \theta(k_x, \eta) \exp(i\eta T) \exp(-ik_x x) dk_x d\eta \quad (۸)$$

در این تحقیق به کمک معادلات (۷) و (۸) الگوریتم کامل تبدیل فوریه دوبعدی استالت برای مقطع دورآفت صفر با سرعت ثابت تدوین شد. آنچه در عمل به هنگام مهاجرت به روش استالت روی می‌دهد در واقع منطقه پایدار (nonevanescant) مثلثی شکل در حوزه (f-k) به طیف مهاجرت یافته دایره‌ای تبدیل می‌شود (شکل ۱). هر نمونه از طیف مقطع لرزه‌ای مهاجرت یافته در حوزه (k_x, η) از طیف مقطع مهاجرت نیافته در حوزه $\omega, (k_x)$ به دست می‌آید که در آن ω در معادله (۶) آورده شده است.



شکل ۱. تصویرسازی مهاجرت (f-k) که با معادله (۸) بیان شده است. طیف (f-k) داده‌های دورآفت صفر مهاجرت نیافته در مثلث ABC واقع شده است. اضلاع AC و AB مرزهای منطقه پایدار

است.

همان طور که معادله (۱۶) نشان می دهد، $M(k_x, \zeta, \omega)$ تبدیل فوریه (از T به ζ) $\omega m(k_x, T)$ است. لازم به اشاره است که مقطع مهاجرت یافته نهایی با عکس تبدیل فوریه دو بُعدی به دست می آید:

$$\Psi(x, T, 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \theta(k_x, \zeta) \exp(i\zeta T) \exp(-ik_x x) dk_x d\zeta \quad (17)$$

در این تحقیق دو شیوه متفاوت برای منظور کردن تغییرات قائم سرعت در فرمول بندی فیلتر ناپایا به کار برده شد. در اولین روش یا روش $v(z)(f-k)_{rms}$ ردیابی پرتو با V_{rms} و در دومین روش یا روش $v(z)(f-k)_{WKB}$ ردیابی پرتو انحنادار با استفاده از تقریب WKB برای معادله موج اسکالر در محیط لایه بندی شده صورت گرفت. روش اول (ردیابی پرتو با V_{rms}) مزیت های محاسباتی دارد در حالی که روش دوم دقت بیشتری دارد است.

اِعمال شیوه اول در عمل با تغییر $m(k_x, T, \omega)$ به صورت زیر حاصل می شود.

$$m_{rms}(k_x, T, \omega) = \exp(i\omega T \sqrt{1 - P^2 V_{rms}^2(T)}) \quad (18)$$

که در آن $V_{rms}(T)$ سرعت جذر میانگین به صورت تابعی از زمان سیر قائم موج در لایه است. در اینجا عملگر $\omega m_{rms}(k_x, T)$ به دست آمده می تواند تحت تبدیل رابطه (۱۶) قرار گیرد و مقطع مهاجرت یافته نهایی را ایجاد کند.

همان طور که ذکر شد، دومین شیوه برای منظور کردن تغییرات سرعت با عمق از حل WKB برای معادله موج اسکالر در محیط لایه بندی شده استفاده می کند. در این تقریب جواب به دست آمده به صورت جمله ای با فاز انتگرالی است (آکی و ریچارد، ۲۰۰۲).

$$m(k_x, T, \omega) = \exp(i\eta T) = \exp(iT \sqrt{\omega^2 - v^2 k_x^2}) = \exp(i\omega T \sqrt{1 - p^2 v^2}) \quad (11)$$

معادله (۱۱) چندین صورت از فیلتر مهاجرت را بیان می کند. در آخرین جمله از پارامتر پرتو (یا کندی ظاهری) $\omega p = k_x / v$ استفاده شده است. معادله (۱۰) را می توان به شکل معادله (۹) هم نوشت.

$$\Psi(k_x, T, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(k_x, 0, \omega) \alpha(k_x, T, \omega) \exp(i\omega T) d\omega \quad (12)$$

از مقایسه معادله های (۱۲) و (۱۰) کمیّت $\omega \alpha(k_x, T)$ به دست می آید.

$$\alpha(k_x, T, \omega) = m(k_x, T, \omega) \exp(-i\omega T) \quad (13)$$

بنابراین معادله (۱۰) یا متناظر آن معادله (۱۲) بیان فیلتر ناپایا در حوزه مختلط (ωT) ، است. در واقع حل عددی معادله (۱۰) پایه و اساس روش $v(z)(f-k)$ محسوب می شود. باین حال برای دستیابی به متناظر این روش با استفاده از تصویرسازی طیفی استالت، نیازمند تبدیل فوریه مستقیم روی $\Psi(k_x, T, 0)$ هستیم.

$$\theta(k_x, \zeta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(k_x, T, 0) \exp(-i\zeta T) dT \quad (14)$$

با جای گذاری معادله (۱۰) در معادله (۱۴)، فرمول فیلتر ناپایا در حوزه فوریه کامل به دست می آید.

$$\theta(k_x, \zeta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(k_x, 0, \omega) M(k_x, \zeta, \omega) d\omega \quad (15)$$

$$M(k_x, \zeta, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} m(k_x, T, \omega) \exp(-i\zeta T) dT \quad (16)$$

که در آن $M(k_x, \zeta, \omega)$ فیلتر مهاجرت در حوزه فوریه

بر اساس نظریه‌های موجود، انتظار می‌رود هر اسپایک در مقطع لرزه‌ای، پس از اعمال مهاجرت به صورت نیم‌دایره (در مقطع مکان- مکان یا هذلولی در مقطع مکان- زمان) و هر پراشی در مقطع لرزه‌ای، پس از اعمال مهاجرت تبدیل به یک اسپایک شود. برای نشان دادن توانمندی روش عرضه شده در این مقاله، مقاطع مصنوعی حاوی اسپایک و پراش تهیه و نتایج اعمال روش روی آنها در شکل‌های ۴ تا ۸ آورده شده است. برای ساخت داده‌های مصنوعی از مشتق اول تابع گاوسی به‌منزله موجک با بسامد غالب ۸۰ هرتز و بازه نمونه‌برداری یک میلی‌ثانیه، استفاده شده است.

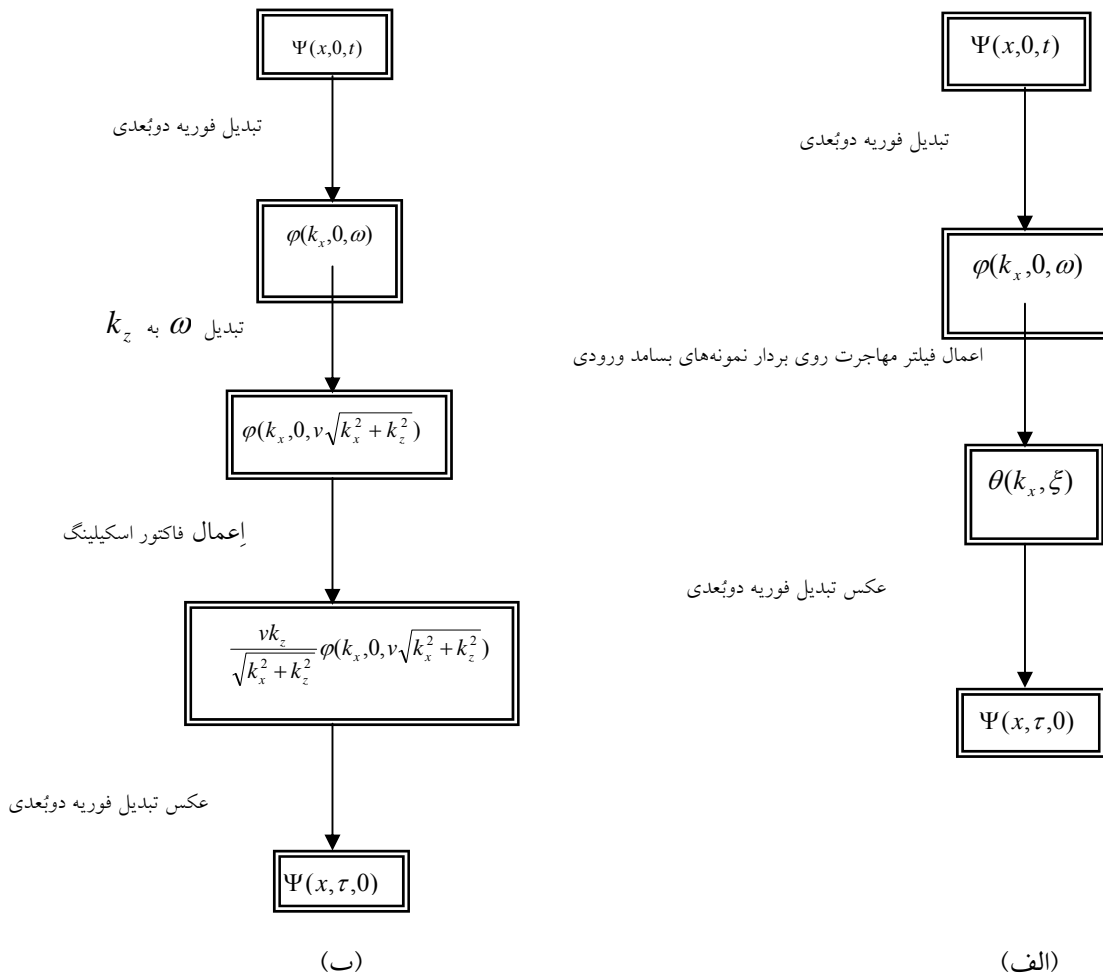
$$m_{WKBj}(k_x, T, \omega) = \exp(i\omega \int_0^T \sqrt{1 - P^2 V^2(u)} du \tag{19}$$

سرعت استفاده شده در معادله (۱۹) سرعت لحظه‌ای است.

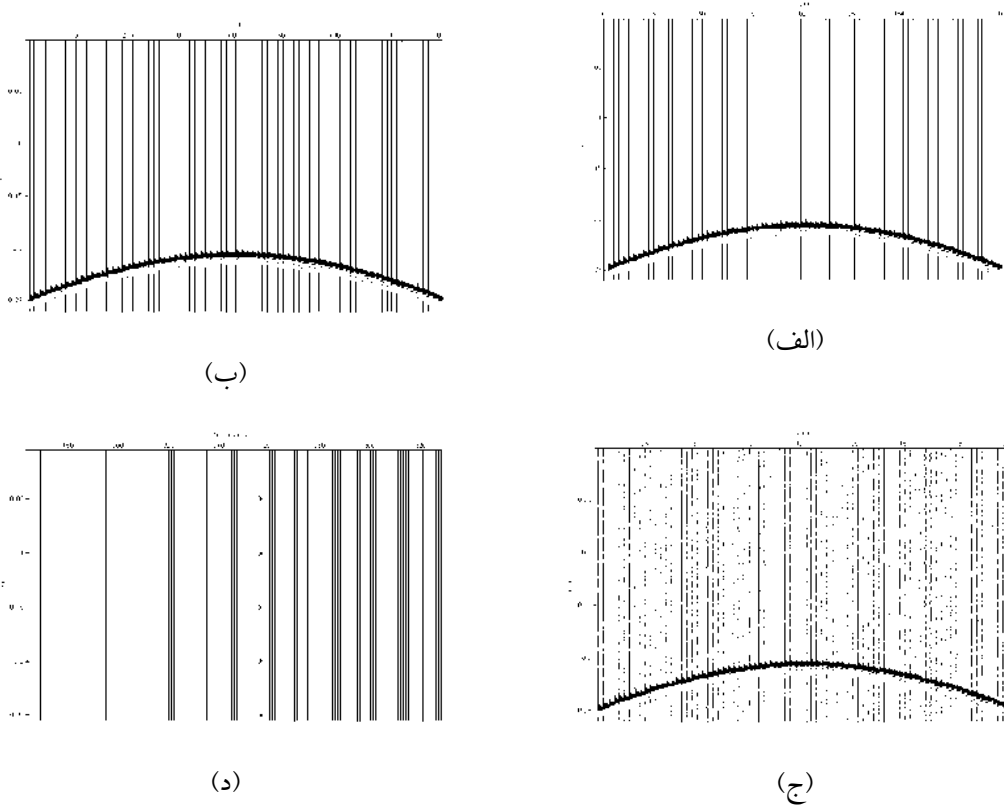
۳ نرم‌افزارهای تدوین شده

نگارندگان به‌منظور مقایسه کارایی دو روش مهاجرت (f-k) و v(z)(f-k)، نرم‌افزارهایی برای هر دو روش در محیط مطلب (MATLAB) نوشتند که نمودار گردش آنها در شکل ۲ دیده می‌شود.

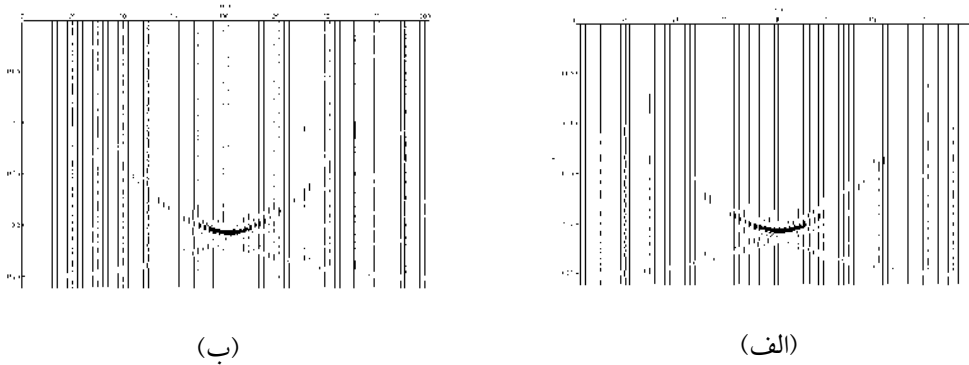
۴ اعمال روش روی مقاطع مصنوعی



شکل ۲. الف) نمودار گردش مهاجرت به روش v(z)(f-k). ب) نمودار گردش مهاجرت به روش (f-k)



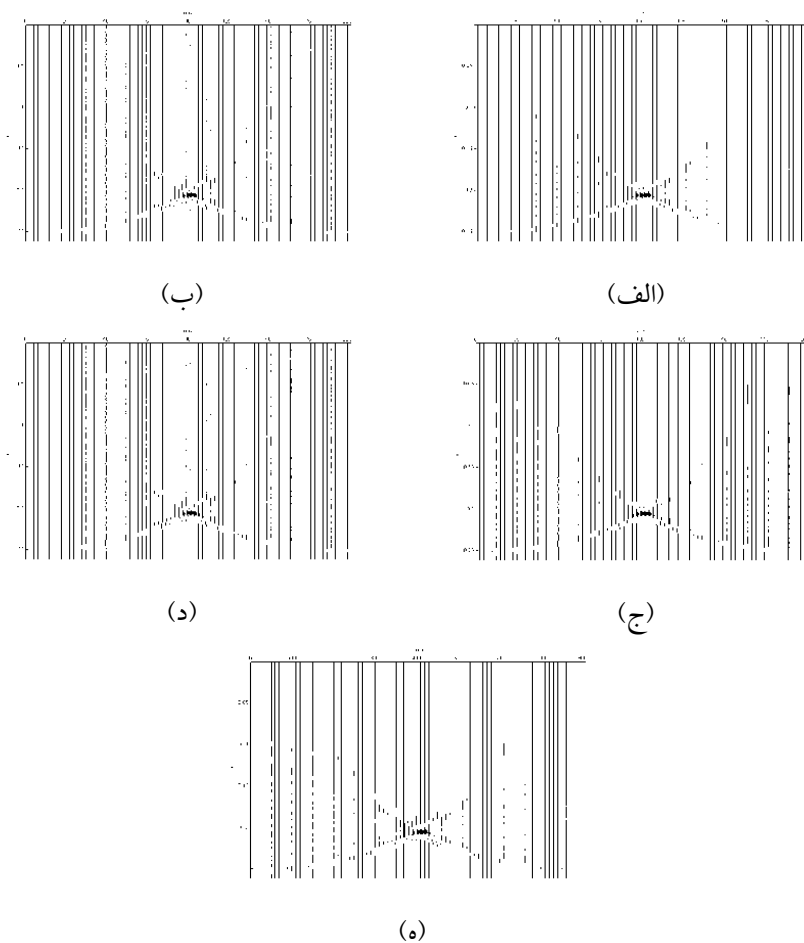
شکل ۳. الف) مقطع دورآفت صفرمصنوعی که شامل یک رویداد هزلولی (پراش) است که از ردیابی پرتو به دست آمده است. ب) مقطع شکل (الف) با بیشینه دورآفت ۸۰۰ متر. ج) مقطع دورآفت صفرمصنوعی شکل الف با ۵٪ نوفه تصادفی. د) مقطع دورآفت صفرمصنوعی که شامل پنج اسپایک است.



شکل ۴. الف) و (ب) شکل‌های حاصل از اعمال مهاجرت (f-k) با سرعت rms تا لایه موردنظر روی مقاطع شکل‌های ۳ الف و ج.

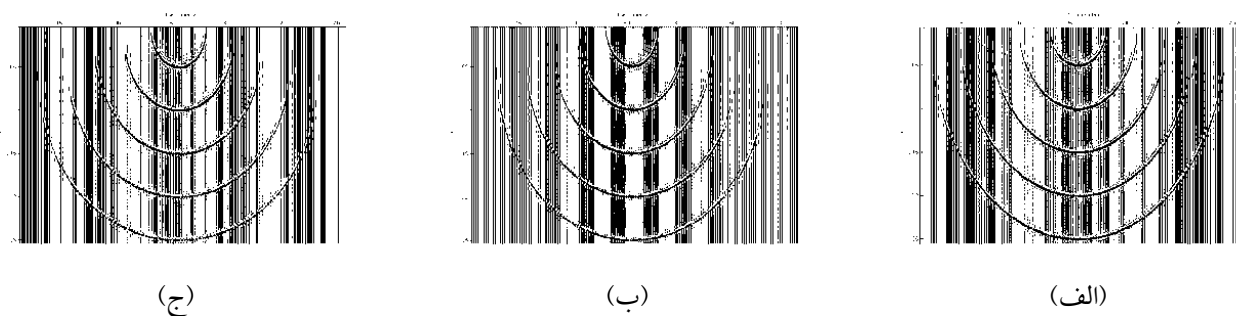
جمع و به نقطه تبدیل کند.

همان‌طور که در شکل‌های بالا می‌بینیم، نتایج عمل مهاجرت به روش f-k نتوانسته است پراش را به خوبی



شکل ۵. الف) (ب) و (ه) شکل‌های حاصل از اعمال مهاجرت $v(z)(f-k)_{rms}$ روی مقاطع شکل‌های ۳ الف، ۳ ب و ۳ ج. (د) شکل‌های حاصل از اعمال مهاجرت $v(z)(f-k)_{WKBJ}$ روی مقاطع شکل‌های ۳ الف و ۳ ج.

شکل ۵ نتایج اعمال مهاجرت به روش مقایسه با روش fk بهتر عمل کرده و پراش‌ها را تا حد مطلوبی جمع کرده است. شکل ۳ نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینیم این روش در



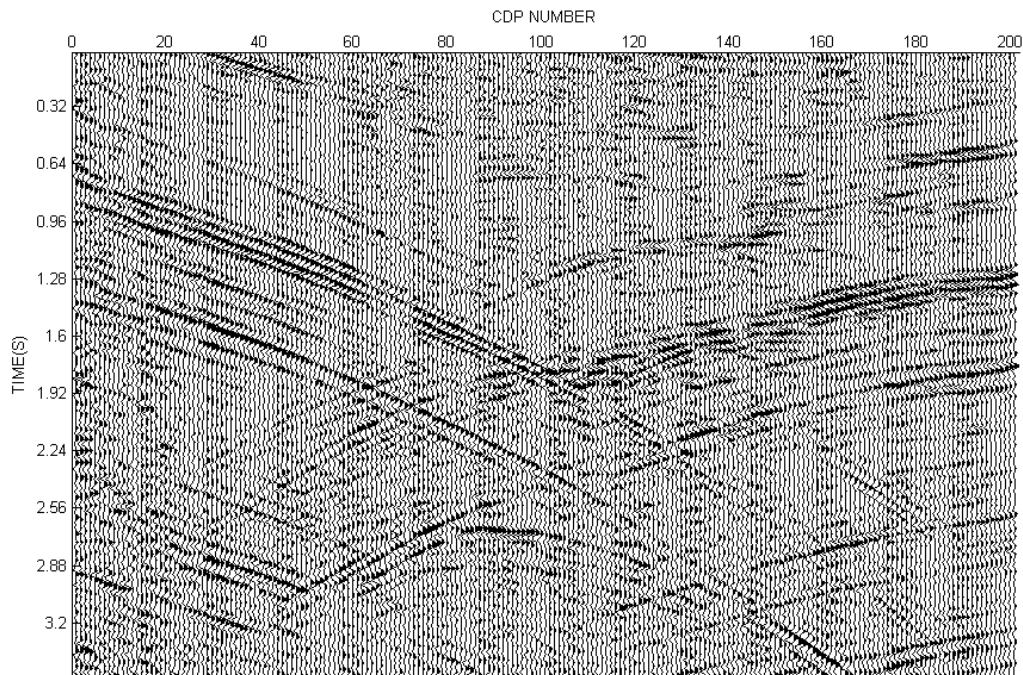
شکل ۶. الف) هذلولی‌های حاصل از اعمال روش $(f-k)$ روی مقطع شکل ۳ ب. هذلولی‌های حاصل از اعمال روش $v(z)(f-k)_{rms}$ روی مقطع شکل ۳ د. ج) هذلولی‌های حاصل از اعمال روش $v(z)(f-k)_{WKBJ}$ روی مقطع شکل ۳ د.

روش مهاجرت $v(z)(f-k)WKB$ و $v(z)(f-k)rms$ روی آن اعمال و نتایج آن در شکل ۸ نشان داده می‌شود. مدل سرعت به کار رفته مطابق جدول ۱ است. نرم‌افزار تدوین شده با درون‌یابی و برون‌یابی بین سرعت‌های به دست آمده از تحلیل سرعت، مدل‌های سرعت rms و WKB را برای همه نمونه‌های زمانی محاسبه و مهاجرت را روی داده ورودی اعمال می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اعمال مهاجرت $v(z)(f-k)WKB$ و $v(z)(f-k)rms$ روی مقطع لرزه‌ای واقعی شبیه به هم عمل کرده است ولی روش $v(z)(f-k)WKB$ نسبت به روش $v(z)(f-k)rms$ بهتر توانسته است اثرات پایبونی (bowtie effect) را در زمان‌های بعد از ۱/۶ ثانیه تصحیح کند.

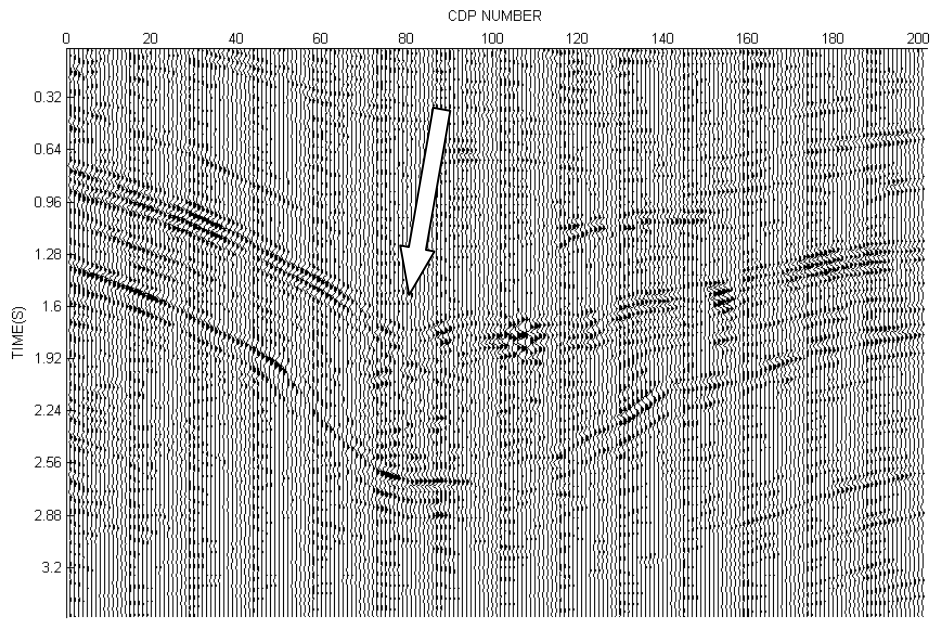
نتایج به دست آمده از اعمال روش‌های مهاجرت $(f-k)$ و $v(z)(f-k)$ روی مقاطع لرزه‌ای دورآفت صفر حاوی پراش، نشان می‌دهد که روش‌های $v(z)(f-k)$ نتایج بهتری نسبت به روش استالت ایجاد می‌کنند. مقایسه نتایج حاصل از اعمال روش‌های $(f-k)$ و $v(z)(f-k)$ (کروی مقطع لرزه‌ای حاوی اسپایک، نشان می‌دهد که الگوریتم $v(z)(f-k)$ نتایجی شبیه به $(f-k)$ دارد اما بدون ساختارهای اضافی معمول که به خاطر درون‌یابی مقادیر موهومی در حوزه فوریه در روش $(f-k)$ ایجاد می‌شود.

۵ اعمال روش روی مقطع واقعی

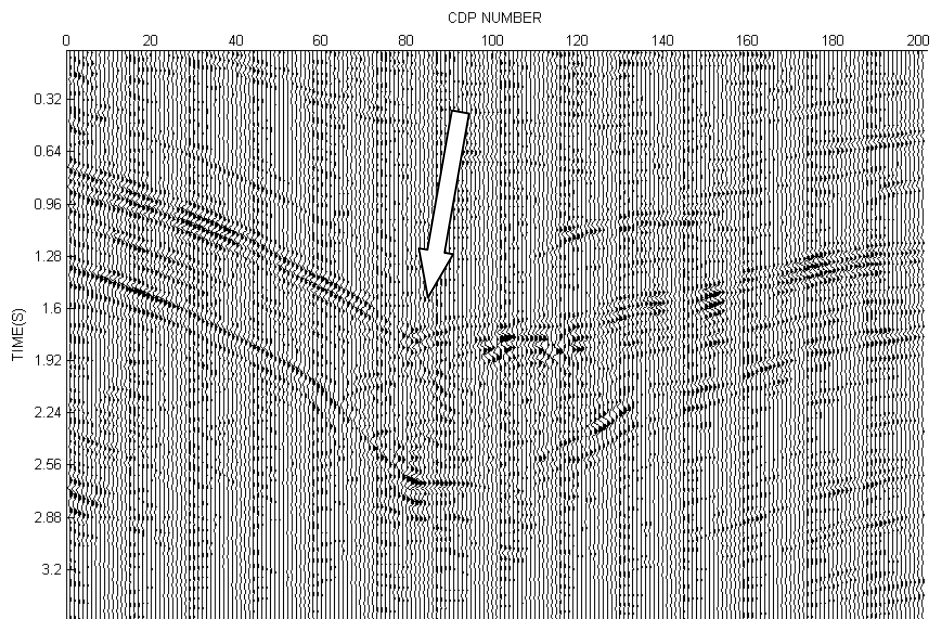
شکل ۷ یک مقطع لرزه‌ای واقعی را نشان می‌دهد (این مقطع قسمتی از یک مقطع لرزه‌ای بزرگ‌تر است). که



شکل ۷. الف) بخشی از یک مقطع لرزه‌ای دورآفت صفر با رویدادهای لرزه‌ای به شکل Bowtie برای مهاجرت.



(الف)



(ب)

شکل ۸ الف) نتیجه حاصل از اعمال مهاجرت به روش WKBJ $v(z)(f-k)$ روی مقطع لرزه‌ای شکل ۷ ب) نتیجه حاصل از اعمال مهاجرت به روش rms $v(z)(f-k)$ روی مقطع لرزه‌ای شکل ۷.

جدول ۱. مقادیر سرعت NMO به دست آمده از تحلیل سرعت در محل CMPهای شماره ۸۰، ۴۰، ۱۸۰، ۱۲۰ که در مهاجرت داده واقعی شکل ۷ به کاررفته است.

CDP=40		CDP=80		CDP=120		CDP=180	
T(S)	V(M/S)	T(S)	V(M/S)	T(S)	V(M/S)	T(S)	V(M/S)
0.8	3610	1.8	3800	1.9	3850	1.5	3885
1	3750	2.5	4250			1.9	4250
1.8	4180						

۶ نتیجه گیری

با اعمال مهاجرت WKBKJ $v(z)(f-k)$ و $v(z)(f-k)$ روی مقطع لرزه‌ای واقعی (شکل ۷) رویدادهای bowtie تا حدود قابل قبولی تصحیح شده‌اند. این قابلیت، کارایی و مزیت روش را نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد.

منابع

- Aki, K. and Richards, P. G., 2002, Quantitative seismology, vol.1: W. H. Freeman and Co.
- Biondi, B., 2005, Adaptive split-step Fourier migration method, Applied Geophysics, 2, 75-77.
- Claerbout, J. F., 1985, Imaging the earth's interior, Blackwell Scientific Publications.
- Gazdag, J., 1987, Wave-equation migration by phase shift, Geophysics, 43, 1342-1351.
- Margrave, G., 2001, Direct Fourier migration for vertical velocity variations, Geophysics, 66, 1504-1514.
- Margrave, G. F., 1998, Theory of nonstationary filtering in the Fourier domain with application to time-variant filtering, Geophysics, 63, 244-259.
- Schneider, w., 1978, Integral formulation for migration in two and three dimensions, Geophysics, 43, 49-76.
- Stoffa, P. L., Fokkema, J. T., Freire, R. M. and Kessinger, W. P., 1990, Split-step Fourier migration, Geophysics, 55, 410-421.
- Stolt, R. H., 1978, Migration by Fourier transform, Geophysics, 43, 23-48.
- Yilmaz, O., 2001, Seismic data processing, Soc. Expl. Geophys.

نظریه مهاجرت به روش $(f-k)$ را می‌توان به تغییرات قائم سرعت به صورت فیلتر ناپایا بسط داد. این روش طیف فوریه مهاجرت یافته را مستقیماً از طیف مهاجرت نیافته برای $v(z)$ دلخواه بازسازی می‌کند. شبیه مهاجرت به روش $(f-k)$ ، الگوریتم مهاجرت به روش $v(z)(f-k)$ با تبدیل فوریه دو بُعدی آغاز و با عکس آن پایان می‌پذیرد. میان این عملگرها، روش مهاجرت $v(z)(f-k)$ جایی که روش مهاجرت $(f-k)$ از تصویرسازی طیفی استفاده می‌کند، فیلتر مهاجرت ناپایا را به کار می‌برد. به کارگیری فیلتر مهاجرت به صورت ضرب بردار ماتریسی برای هر عدد موج افقی است. می‌توان دو بیان جبری متفاوت برای فیلتر در نظر گرفت. (۱) تقریب rms (۲) تقریب WKBKJ درجه اول.

نتایج به دست آمده از اعمال روش‌های مهاجرت $(f-k)$ و $v(z)(f-k)$ روی مقطع لرزه‌ای دورافت صفر حاوی هذلولی، نشان می‌دهد که روش‌های $v(z)(f-k)$ نتایج بهتری را ایجاد می‌کنند.

مقایسه پاسخ ضربه حاصل از روش‌های $(f-k)$ و $v(z)(f-k)$ نشان می‌دهد که الگوریتم $v(z)(f-k)$ نتایجی شبیه به $(f-k)$ در بر دارد اما بدون ساختارهای اضافی معمول که در ارتباط با درون‌یابی با مقادیر موهومی در حوزه فوریه در روش $(f-k)$ است.