

تصحیح استاتیک با استفاده از تشخیص کانال کور

سیدحسین سیدآقامیری^۱ و حمیدرضا سیاه‌کوهی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک، دانشکده پسران دزفول، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، ایران
^۲ استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۰/۷/۶، پذیرش نهایی: ۹۲/۱۱/۱۵)

چکیده

تغییرات در لایه‌های نزدیک سطح زمین می‌تواند بسیار پیچیده باشد و دامنه و زمان رسید امواج بازتابی از افق‌های هدف را به‌طور کامل به هم بریزد. معمولاً محاسبه و حذف این نوع جابه‌جایی‌های زمانی از امواج بازتابی با تصحیح استاتیک و تصحیح استاتیک باقی‌مانده عملی می‌شود. روش‌های مرسوم تصحیح استاتیک برای محاسبه و حذف این جابه‌جایی‌های زمانی، به اطلاعات سرعت و عمق لایه‌های نزدیک سطح نیاز دارد. لازم به ذکر است که این روش‌ها از مدل‌های ساده، برای تشریح لایه‌بندی نزدیک سطح استفاده می‌کنند که اغلب از واقعیت زمین دور هستند.

در این مقاله شیوه دیگری برای تصحیح استاتیک عرضه می‌شود که به‌لحاظ نظری خیلی شبیه به واهامیخت است ولی برخلاف آن به هیچ‌گونه فرضی در مورد موجک، نحوه توزیع مرز لایه‌ها و نوفه نیاز ندارد و به‌طور کامل از اطلاعات ثبت شده برای تصحیح استاتیک استفاده می‌کند. همچنین در مقایسه با روش‌های مرسوم برای تصحیح استاتیک، نیازی به مدل لایه‌بندی نزدیک سطح زمین ندارد. در این روش آشفتگی‌های نزدیک سطح، به‌منزله کانال‌هایی تلقی می‌شوند که با استفاده از نظریه تشخیص کانال کور (به روش زیرفضای نوفه جزئی) تعیین می‌شوند و جابه‌جایی‌های زمانی لازم برای تصحیح استاتیک از راه محاسبه جابه‌جایی مورد نیاز برای پیشینه شدن همبستگی کانال‌ها به‌دست می‌آید. توانمندی روش روی داده‌های مدل زمین مصنوعی و داده‌های لرزه‌ای صحرایی ارزیابی شد. این روش علاوه بر تصحیح جابه‌جایی‌های زمانی، منجر به بهبود قابل‌توجهی در همدوسی از ردلرزه‌ای به ردلرزه دیگر هم شد. همچنین رخدادهای بازتابی را که قبل از اعمال این روش به سختی قابل شناسایی بودند، تقویت شدند.

واژه‌های کلیدی: تصحیح استاتیک، جابه‌جایی زمانی، تشخیص کانال کور، زیرفضای نوفه

Static correction using blind channel identification

Seyed Aghamiry, H.¹ and Siahkoochi, H. R.²

¹M.Sc. in Geophysics, Physics Department, Faculty of Dezfoul, Technical and Vocational University, Iran

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

(Received: 28 Sep 2011, Accepted: 04 Feb 2014)

Summary

Near-surface variations can be very complex and may distort amplitudes and arrival times of the reflections events from target reflectors. Near-surface complexities include topographic variations, near-surface irregularities, variations in soil conditions and the weathered layer.

These perturbations generally have a significant impact on seismic recordings. Although there is a general agreement that near-surface distortions are very complex and we usually rely on a rather simplified parameterization to compensate for these perturbations. Determination of time shifts is generally referred to as static corrections and

residual static correction. Underlying concept of static corrections is the assumption that a simple time shift of an entire seismic trace will yield the seismic record that would have been observed if the geophones had been placed on the reference datum. Hence, static time shifts corrections are assumed to be surface consistent. Surface consistency means that the effects associated with a particular source or receiver affect all wave types similarly, regardless of the direction of propagation.

Conventional methods of static time shift corrections need information on velocities and depths of near-surface layers to determine and compensate the time shifts. These methods rely on simple models for near-surface layers.

In this paper, we develop an approach to compensate for complex time shift using blind channel identification, as it does not use near-surface information. The blind channel identification deals with the recovery of either the input signal or the channel response from the observed transmitted signal only. This method differs from conventional methods for seismic deconvolution. The latter resolve the undetermined nature of the problem by making assumptions about the reflectivity sequence (whiteness, sparsity) and/or the seismic wavelet (minimum phase/ zero phase). The blind channel identification method does not rely on these assumptions. It uses multichannel recordings to fully constrain the problem and is therefore purely data driven.

Many recent blind channel estimation techniques exploitsubspace structures of observation. The key idea in subspace methods of blind channel identification that the channel vector (or part of the channel vector) is in a one dimensional subspace of a block of noiseless observations. These methods, which are often referred to as subspace algorithms, have the attractive property that the channel estimates can often be obtained in a closed form from optimizing a quadratic cost function.

We use blind channel identification to estimate for near-surface source and receiver perturbations. These perturbations are parameterized as finite-impulse response (FIR) filters, and are referred to as the channels. Because the channels describe the near-surface perturbations, we can estimate time shifts from correlation of the channels.

We applied the method to synthetic data and to part of a field data set acquired in an area with significant near-surface heterogeneity. The application of new static corrections greatly improves the trace-to-trace consistency in prestack data. The procedure delineates reflection events that are difficult to detect prior to the application of new static corrections. Based on these results, we conclude that the new static corrections can successfully remove complex time shifts from land seismic data. The field data example demonstrates that the new static corrections can greatly enhance the imaging capabilities of land seismic data.

Keywords: static correction, time shift, blind channel identification, noise subspace

۱ مقدمه

ثبت‌های لرزه‌ای دارند و باعث به هم ریختن زمان رسیده‌ها و دامنه‌ها می‌شوند (کوکس، ۱۹۹۹). علاوه براین، لایه‌های سطحی بر رفتار چشمه و گیرنده اثر خواهند داشت. برای مثال اثر چشمه متأثر از خواص مواد اطراف آن است و تغییر در شرایط لایه سطحی باعث تغییر در اثر چشمه می‌شود که تکرارپذیری

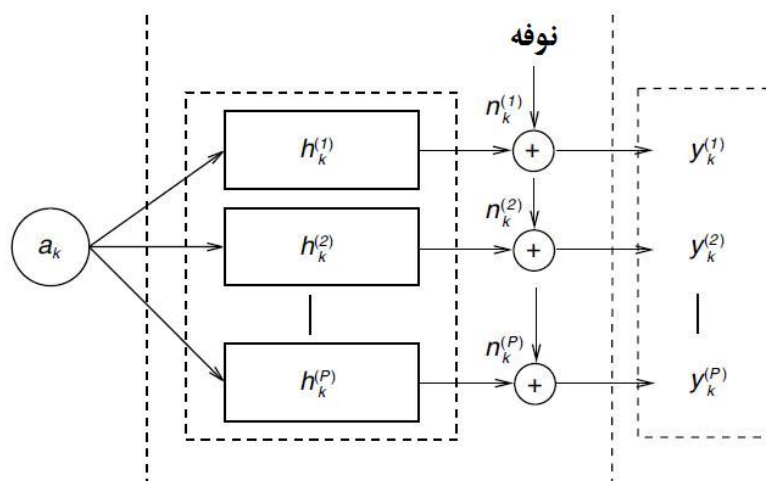
تصحیح اعمال شده بر اطلاعات لرزه‌ای برای حذف اثر تغییر ارتفاع، ضخامت هوازده، سرعت هوازده را تصحیح استاتیک می‌گویند (شریف، ۱۹۹۱). به بیان دیگر، جابه‌جایی زمانی اعمال شده روی ردلرزه‌ها برای انتقال به یک سطح مبنا را تصحیح استاتیک می‌گویند. آشفستگی‌های نزدیک سطح، اثرات پیچیده‌ای روی

نزدیک سطح استفاده می‌شود که بر پایه تشخیص کانال کور است (مولینس و همکاران، ۱۹۹۵). منظور از کانال یک محیط فیزیکی است که ارسال اطلاعات از درون آن صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر بخشی از مسیر ارتباط بین چشمه و گیرنده است. در این مقاله فرض می‌شود که آشفتگی‌های نزدیک سطح زمین، کانال‌های مورد نظر باشند. نظریه تشخیص کانال کور مبانی نظری روش‌هایی است که به بازسازی سیگنال ورودی و یا پاسخ کانال از اطلاعات ثبت شده می‌پردازند (شکل ۱). تشخیص کانال کور با روش‌های معمول واهمامیخت فرق می‌کند. در روش‌های معمول واهمامیخت، مسئله را با فرض‌هایی در مورد سری ضرایب بازتاب (پراکندگی، سفیدی) و یا موجک لرزه‌ای (کمینه فاز، فاز صفر) قابل حل می‌کنند (پورسانی و اورسین، ۱۹۹۸). ولی در تشخیص کانال کور بدون فرض خاصی و یا استفاده از اطلاعات کمکی به حل مسئله می‌پردازند. در عوض این روش برای غالب شدن بر طبیعت ناشناخته مسئله، اندازه‌گیری‌های متعددی روی سیگنال انتشار یافته در محیط صورت می‌دهد.

چشمه را کاهش می‌دهد (کارنیچ، ۱۹۹۴). در مورد گیرنده‌ها نیز به همین صورت است و در جاهایی که تغییر در شرایط لایه سطحی داریم، اختلاف میان پاسخ گیرنده‌هایی که فقط چند متر از هم فاصله دارند دیده می‌شود (برنی و راثور، ۱۹۸۹). آشفتگی‌های نزدیک سطح کارایی عملیات لرزه‌ای را کم می‌کند. برای مثال اثر آرایه‌های چشمه و گیرنده که به‌طور معمول در حذف امواج زمین غلت (Ground roll) از آن استفاده می‌شود، در حضور آشفتگی‌های سطحی کاهش می‌یابد (آنستی، ۱۹۸۶).

با وجود اثرات پیچیده آشفتگی‌های نزدیک سطح بر اطلاعات ثبت شده، روش‌های معمول برای حذف آنها به پارامتری کردن ساده آشفتگی‌ها می‌پردازند. تصحیح جابه‌جایی‌های زمانی با تصحیح استاتیک و تصحیح استاتیک باقی‌مانده صورت می‌گیرد (ایلماز، ۲۰۰۱). تصحیح استاتیک فرض می‌کند که در صورتی که چشمه و گیرنده روی یک سطح مینا باشند، جابه‌جایی زمانی ردلرزه، منجر به مشاهده ردلرزه می‌شود.

در این مقاله روشی برای به‌دست آوردن جابه‌جایی‌های زمانی ایجاد شده از آشفتگی‌های



شکل ۱. مدل SIMO-سیگنال اولیه پس از عبور از کانال‌های متفاوت و اعمال نوفه‌های گوناگون در گیرنده‌ها ثبت می‌شود (واسن و ترمپرت، ۲۰۰۷).

نوفه جزئی که زیرمجموعه روش‌های زیرفضا است استفاده شده است. روش زیرفضای نوفه که مولینس و همکاران (۱۹۹۵) آن را پیشنهاد کردند، دارای ویژگی‌های زیر است:

۱- در فضای زمان محاسبه می‌شود و نسبت به روش‌های دیگر زیرفضا محاسبات بیشتری دارد ولی در عوض امکان تحلیل خطا، پس از به دست آوردن کانال را می‌دهد (واسن و ترمپرت، ۲۰۰۷).

۲- برخلاف روش‌های معمول واهمامیخت، فرض خاصی درباره ضرایب بازتاب لایه‌ها و یا موجک اولیه در نظر نمی‌گیرد (پورسانی و ارسین، ۱۹۹۸).

۳- روش براساس محاسبات درجه دوم است و همگرایی سریع‌تری در مقایسه با روش‌های دیگر تشخیص کانال کور که براساس محاسبات درجات بالاتر هستند، دارد (مندل، ۱۹۹۱).

۴- طول بهینه کانال باید قبل از اجرای فرایند تشخیص کانال کور محاسبه شود.

روش زیرفضای نوفه جزئی علاوه بر ویژگی‌های بالا، باعث کاهش حجم محاسبات و کاهش سطح نوفه در کانال‌های استخراج شده می‌شود (مولینس و همکاران، ۱۹۹۵).

همان‌طور که گفته شد روش‌های تشخیص کانال کور به منظور فایق آمدن بر طبیعت نامفهوم مسئله، اندازه‌گیری‌های متعددی روی سیگنال انتشار یافته در محیط صورت می‌دهند. به منظور افزایش دفعات اندازه‌گیری، از مدل خطی یک ورودی و چند خروجی (Single Input Multiple Output, SIMO) استفاده می‌کنند (شکل ۱). برطبق مدل همامیخت در حالت ماتریس- بردار برای خروجی مدل SIMO خواهیم داشت (پیوست):

$$\vec{y}_q = \mathcal{F}_q(\vec{h})a_{q+L} + \vec{n}_q \quad (1)$$

ریس (۱۹۹۷) و لو ولی (۱۹۹۸) از تشخیص کانال کور برای واهمامیخت لرزه‌ای استفاده کردند. لین و واگ (۲۰۰۲) از تشخیص کانال کور برای پیش‌بینی و تصحیح تغییر امواج صوتی در تصاویر پزشکی استفاده کردند. در این مقاله از تشخیص کانال کور برای به دست آوردن جابه‌جایی‌های زمانی مربوط به چشمه‌ها و گیرنده‌ها که بر اثر تغییرات در ویژگی‌های لایه‌های نزدیک سطح ایجاد شده‌اند، استفاده می‌شود. در این تحقیق ابتدا آشفتگی‌های ایجاد شده از لایه‌های نزدیک سطح به صورت فیلترهای پاسخ ضربه واحد با طول محدود (Finite Impulse Response) پارامتری می‌شوند که همان کانال‌ها هستند. در مرحله بعد با به دست آوردن جابه‌جایی زمانی لازم برای بیشینه شدن همبستگی کانال‌های مجاور، جابه‌جایی زمانی چشمه‌ها و گیرنده‌های گوناگون به دست می‌آیند. در مرحله آخر جابه‌جایی زمانی مربوط به چشمه و گیرنده ردلرزه‌های گوناگون را با هم جمع می‌کنیم و مقادیر به دست آمده را به مثابه تصحیح استاتیک لازم برای آن ردلرزه‌ها در نظر می‌گیریم.

کارایی روش را روی داده لرزه‌ای مصنوعی و داده صحرائی امتحان و نتایج به دست آمده را ارایه می‌کنیم.

۲ مبانی نظری روش تشخیص کانال کور

روش‌های تشخیص کانال کور به دو گروه مبنی بر گشتاور (Moment based) و بیشینه شانس (Maximum likelihood) تقسیم می‌شوند. همچنین روش‌های مبنی بر گشتاور به دو گروه روش‌های زیرفضا و تطبیق گشتاور (Moment matching) تقسیم شده‌اند (تونگ و پیرو، ۱۹۹۸). ایده کلیدی در روش‌های زیرفضا، قرار گرفتن کانال یا بخشی از آن به صورت برداری در یک بُعد از زیرفضای اطلاعات ثبت شده در حالت بدون نوفه است. در این مقاله برای تشخیص کانال کور از روش زیرفضای

که در آن، $R_a = E(a_{q+L} a_{q+L}^T)$ ماتریس خودهمبستگی چشمه با ابعاد $(q+L) \times (q+L)$ و $R_n = E(\vec{n}_q \vec{n}_q^T)$ ماتریس خودهمبستگی نوفه با ابعاد $qp \times qp$ است. فرض می‌کنیم که نوفه، سفید و دارای میانگین صفر و واریانس σ^2 باشد. پس می‌توان گفت رابطه $R_n = \sigma^2 I$ برقرار است (I ماتریس واحد است).

زیرفضای سیگنال و زیرفضای نوفه را می‌توان با استفاده از تجزیه ویژه مقادارها و ویژه بردارهای ماتریس R_y تفکیک کرد. برحسب رابطه تجزیه ماتریس‌ها به ویژه مقادارها و ویژه بردارها خواهیم داشت:

$$R_y = \sum_{i=1}^{pq} \lambda_i \vec{v}_i \vec{v}_i^T \quad (4)$$

که $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{pq}$ ویژه مقادارها R_y و \vec{v}_i ویژه بردارهای وابسته به ویژه مقادارها هستند. برای اینکه بتوانیم زیرفضای سیگنال و زیرفضای نوفه R_y را تفکیک کنیم باید کنترلی روی ویژه مقادارها داشته باشیم. به این منظور جمله اول رابطه ۳ (یعنی $\mathcal{F}_q(\vec{h}) R_a \mathcal{F}_q(\vec{h})^T$) را مرتبه کامل در نظر می‌گیریم. در این صورت ویژه مقادارها تا اندیس $q+L$ مربوط به ماتریس R_y (رابطه ۳) خواهند بود و از ویژه مقادار با اندیس $q+L+1$ تا qp مربوط به جمله دوم رابطه ۳ (R_n) خواهند بود که مساوی و برابر σ^2 هستند. ویژه بردارهای متناظر ویژه مقادارها با اندیس ۱ تا $q+L$ ، زیرفضای سیگنال (Z) و ویژه بردارهای متناظر ویژه مقادارها با اندیس $q+L+1$ تا qp ، زیرفضای نوفه (X) را تشکیل می‌دهند که بر یکدیگر عمودند. زیرفضای سیگنال

$$Z = [\vec{z}_1, \dots, \dots, \vec{z}_{L+q}] \quad (5)$$

با ابعاد $qp \times (L+q)$ و زیرفضای نوفه

$$X = [\vec{x}_{L+q+1}, \dots, \dots, \vec{x}_{qp}] \quad (6)$$

با ابعاد $qp \times (qp-L-q)$ خواهد بود.

که در آن، $\mathcal{F}_q(\vec{h})$ ماتریس فیلتر کانال‌ها، a_{q+L} سیگنال اولیه و \vec{n}_q نوفه اضافه شده است. همچنین اندیس L نشانگر طول کانال و q نشانگر تعداد نمونه‌های انتخابی از موج ثبت شده است.

در مواردی که برای افزایش تعداد اندازه‌گیری محدودیت وجود دارد می‌توان (در صورت امکان) از نمونه برداری اضافی (oversampling) استفاده کرد (مولینس و همکاران، ۱۹۹۵). در این حالت از یک موج با زمان نمونه برداری Δt ، تعداد β موج جدید با زمان نمونه برداری $\beta \Delta t$ تولید می‌شود که در نتیجه می‌توان هنگام تبدیل از محیط گسسته به محیط پیوسته، موج اولیه را به سلامت بازسازی کرد (β فاکتور نمونه برداری اضافی).

۲-۱ روش‌های زیرفضا

هنگامی که دسته‌ای از اطلاعات کمی برای تحقیق گردآوری می‌شود، سازمان‌بندی و خلاصه کردن آنها به طریقی که به صورت معنی داری قابل درک و ارتباط باشند ضروری است. یکی از مفیدترین روش‌ها، محاسبه همبستگی میان اطلاعات است. در اینجا از ماتریس خودهمبستگی (autocorrelation) اطلاعات مورد بررسی (R_y) استفاده می‌کنیم و خواهیم داشت:

$$R_y = E(\vec{y}_q \vec{y}_q^T) \quad (7)$$

که در آن، E عملگر امید ریاضی و T عملگر ترانپوز ماتریس است و R_y ماتریسی با ابعاد $pq \times pq$ متقارن و دارای مرتبه کامل خواهد بود (که در آن، p نشان‌دهنده تعداد کانال است). با فرض مستقل بودن نوفه از سیگنال (فرض غیر همبسته بودن نوفه و سیگنال) و با استفاده از رابطه ۱ می‌توان نوشت (گاردنر، ۱۹۸۶):

$$R_y = \mathcal{F}_q(\vec{h}) R_a \mathcal{F}_q(\vec{h})^T + R_n \quad (8)$$

ماتریسی است) پس از این جابه‌جایی خواهیم داشت:

$$d(\vec{h}) = \sum_{i=q+L+1}^{qp} |h_i^T \mathcal{F}_q(\vec{X}_i)|^2 = h^T D h \quad (11)$$

$$D = \sum_{i=q+L+1}^{qp} \mathcal{F}_q(\vec{X}_i) \mathcal{F}_q(\vec{X}_i)^T \quad (12)$$

ضرایب کانال‌ها را با کمینه کردن $d(\vec{h})$ در حالتی که $|h| = 1$ (قید درجه ۲) است به دست می‌آوریم. در این حالت \vec{h} ویژه‌بردار نرم یک وابسته به کمترین ویژه‌مقدار ماتریس D خواهد بود. همچنین کوچک‌ترین ویژه‌مقدار ماتریس D ، خطای اندازه‌گیری و اختلاف میان کوچک‌ترین و یکی قبل از کوچک‌ترین ویژه‌مقدار، میزان یکتایی کانال برآورد شده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد روش زیرفضای نوفه محاسبات زیادی دارد. مولینس و همکاران (۱۹۹۵) روشن ساختند که در تشکیل ماتریس D می‌توان به جای استفاده از همه ویژه‌بردارهای زیرفضای نوفه، از تعداد کمی از آنها استفاده کرد و کانال‌ها را به درستی تشخیص داد. فرض کنید X_0 یک ویژه‌بردار در زیرفضای نوفه ماتریس R_y باشد. ویژه‌بردار X_0 بر ستون‌های ماتریس $\mathcal{F}_q(\vec{h})$ عمود است. پس $X_0^T \mathcal{F}_q(\vec{h}) = 0$ و یا $h^T \mathcal{F}_q(X_0) = 0$ خواهد بود که $\mathcal{F}_q(X_0)$ ماتریس فیلتر $p(L+1) \times (L+q)$ وابسته به ویژه‌بردار X_0 است. این شرایط منجر به یک دستگاه از $L+q$ معادله خطی و $p(L+1)$ مجهول می‌شود. در حالتی که $(L+q) < p(L+1)$ باشد دستگاه معادلات خطی نامعین است و پاسخ یکتایی ندارد. با انتخاب J ویژه‌بردار از زیرفضای نوفه به شرطی که $J(L+q) \geq p(L+1)$ باشد دستگاه، خطی معین خواهد بود و جواب یکتایی می‌دهد. روش زیرفضای نوفه جزئی علاوه بر کاهش چشمگیر حجم محاسبات، باعث کاهش سطح نوفه در کانال‌های استخراج شده می‌شود (سیدآقامیری، ۱۳۸۸).

برای اینکه بخش اول رابطه ۳ مرتبه کامل داشته باشد

باید:

۱- چندجمله‌ای $z^L \sum_{j=1}^L h_j^{(i)} z^j = h^{(i)}(z)$ ریشه عمومی نداشته باشد و دارای درجه L باشد.

۲- q بزرگ‌تر از L باشد.

۳- a_{q+L} ماتریس Hankel با مرتبه مساوی یا بزرگ‌تر از $q+L$ داشته باشد (سیدآقامیری، ۱۳۸۸).

۲-۲ روش زیرفضای نوفه جزئی

در میان روش‌های زیرفضا، روش زیرفضای نوفه بیشترین حجم محاسبات را دارد. برحسب معادله اساسی تجزیه ماتریس‌ها برای زیرفضای نوفه خواهیم داشت:

$$R_y \vec{X}_i = \sigma^2 \vec{X}_i \quad (7)$$

از طرفی با ضرب \vec{X}_i^T در رابطه (۳) به دست می‌آوریم:

$$R_y \vec{X}_i = \mathcal{F}_q(\vec{h}) R_a \mathcal{F}_q(\vec{h})^T \vec{X}_i + \sigma^2 \vec{X}_i \quad (8)$$

که با برابر قرار دادن طرفین رابطه‌های (۷) و (۸) رابطه (۹) را نتیجه خواهیم گرفت:

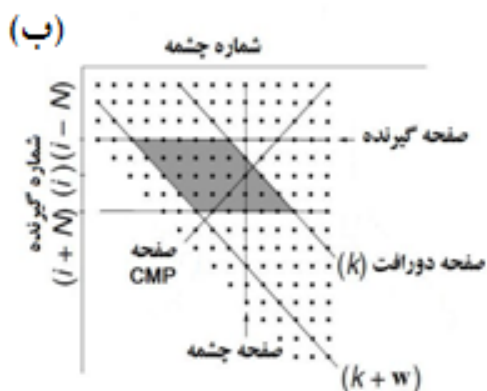
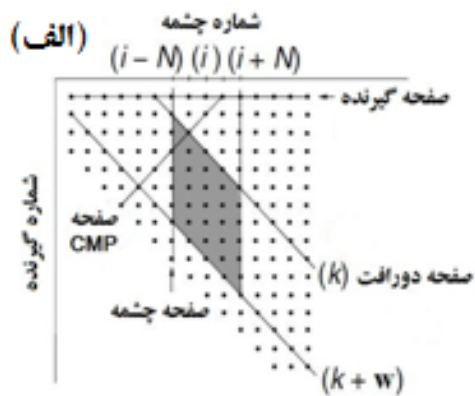
$$\vec{X}_i^T \mathcal{F}_q(\vec{h}) = 0 \quad (9)$$

رابطه (۹) یک رابطه خطی است و امکان شناخت ساده ضرایب کانال‌ها را فراهم می‌کند. در عمل فقط برآوردهایی از R_y و در نتیجه \vec{X}_i وجود دارد و در نتیجه جواب معادله ۹ صفر نخواهد شد. از این رو معادله (۹) را باید به صورت کمترین مربعات حل کرد که در این حالت باید رابطه (۱۰) را کمینه کنیم:

$$d(\mathcal{F}_q(\vec{h})) = \sum_{i=q+L+1}^{qp} \left| \vec{X}_i^T \mathcal{F}_q(\vec{h}) \right|^2 \quad (10)$$

چون هم‌میخت یک عملگر جابه‌جاپذیر است می‌توان ساختار ماتریس فیلتر را که بر کانال‌ها اعمال شده است، روی زیرفضای نوفه اعمال کرد (توجه کنید که ماتریس فیلتر بیانگر عملگر هم‌میخت در صورت

آبرددلرزه‌های چشمه مشترک در شکل ۲-الف نشان داده شده است (هرکدام از خط‌های عمودی نشان‌دهنده ردلرزه‌های استفاده شده برای تشکیل آبرددلرزه چشمه مشترک مربوط به آن موقعیت است). منطقه پُررنگ شده در این شکل نشانگر ردلرزه‌هایی است که آبرددلرزه‌های چشمه مشترک موقعیت $i-N$ تا $i+N$ را تشکیل می‌دهند. این آبرددلرزه‌ها صفحه دورافت مشترکی برابر صفحه ردلرزه مشترک دارند. اولین ردلرزه تشکیل دهنده آبرددلرزه‌ها در دورافت k ، بعدی دورافت $k+1$ و آخرین آنها در دورافت $k+w$ است.



شکل ۲. نمودارهای آبرثبت، (الف) تشکیل آبرددلرزه چشمه مشترک و (ب) تشکیل آبرددلرزه گیرنده مشترک (واسن و ترمپرت، ۲۰۰۷).

۳ اعمال تصحیح استاتیک با استفاده از تشخیص

کانال کور به روش زیرفضای نوفه جزئی

به‌طور کلی زمین را به‌صورت دستگاهی خطی برای انتشار امواج لرزه‌ای در نظر می‌گیریم در این صورت برطبق مدل هم‌میخت، برای ردلرزه ثبت شده خواهیم داشت:

$$y^{(i,j)}(t) = R^{(j,k)}(t) * G^{(i,j)}(t) * S^{(i,k)}(t) + n^{(i,j)}(t) \quad (۱۳)$$

که در آن، $y^{(i,j)}$ دامنه هر نمونه در ثبت لرزه‌ای، i و j به‌ترتیب به موقعیت چشمه و گیرنده اشاره دارد و از $k = |i - j|$ برای نشان دادن دورافت بین چشمه-گیرنده استفاده می‌کنیم. همچنین $R^{(j,k)}(t)$ پاسخ گیرنده موقعیت j با دورافت k از چشمه i است و $S^{(i,k)}(t)$ اثر چشمه در موقعیت i با دورافت k از گیرنده j است. $G^{(i,j)}(t)$ پاسخ محیط و $n^{(i,j)}(t)$ نوفه است. چون هدف ما تصحیح ردلرزه‌های ثبت شده برای جابه‌جایی‌های زمانی ایجاد شده از لایه‌های نزدیک سطح است، هم جابه‌جایی‌های زمانی ایجاد شده در محل چشمه (به اختصار جابه‌جایی زمانی چشمه) و هم جابه‌جایی‌های زمانی ایجاد شده در محل گیرنده (به اختصار جابه‌جایی زمانی گیرنده) باید حساب شوند.

چون در استاتیک هر ردلرزه، اثر چشمه و پاسخ گیرنده سهم دارند پس نمی‌توان اثر چشمه یا پاسخ گیرنده را به‌طور مجزا از ردلرزه محاسبه کرد. برای رفع این مشکل از ردلرزه‌های ترکیبی که اثر چشمه (یا پاسخ گیرنده) در آنها تقویت و پاسخ گیرنده (یا اثر چشمه) تضعیف شده باشد استفاده می‌کنیم. به‌این‌منظور آبرثبت (supergather) را تشکیل می‌دهیم (تنر و کولر، ۱۹۸۱) و از آبرددلرزه‌ها (supertraces) در حکم ورودی برای تشخیص کانال کور استفاده می‌کنیم. آبرددلرزه‌ها از پشت سر هم چیدن ردلرزه‌هایی که چشمه یا گیرنده مشترک دارند به وجود می‌آیند. نحوه تشکیل

چون در هر اَبَردرلزه چشمه مشترک، اثر چشمه ثابت و اثر گیرنده متغیر است فرض می‌کنیم که تغییر بین اَبَردرلزه‌های $i-N$ تا $i+N$ نشانگر تغییر اثر چشمه (S^{i-N} تا S^{i+N}) باشد پس طبق مدل همامیخت برای اَبَردرلزه چشمه مشترک i خواهیم داشت:

$$y_s^{(i)} = S^{(i)}(t) * G_s^{(i)} + n_s^{(i)}(t) \quad (14)$$

که در آن، $G_s^{(i)}$ حاصل همامیخت پاسخ زمین برای دورافت‌های متفاوت $G^{(i,k)}$ تا $G^{(i,k+w)}$ و جمله‌های گیرنده مربوط، و $n_s^{(i)}(t)$ نوفه است. توجه کنید که وابستگی جمله چشمه ($S^{(i)}(t)$) به دورافت را حذف کرده‌ایم زیرا فرض می‌کنیم که در محدوده دورافت k تا $k+w$ این کمیت تغییر نمی‌کند. همچنین با فرض ثابت بودن $G_s^{(i)}$ برای محدوده $i-N$ تا $i+N$ می‌توان مدل SIMO را برای این پنجره از اَبَردرلزه‌ها در نظر گرفت. به این منظور باید:

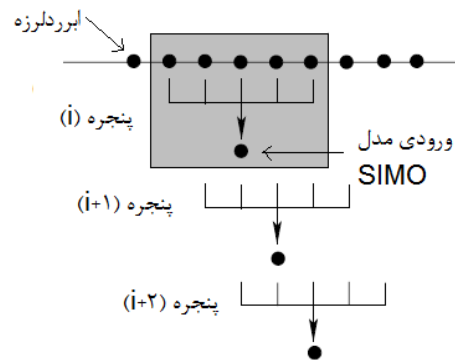
۱- N کوچک باشد تا G_s تغییرات کمی داشته باشد و بتوانیم آن را ثابت در نظر بگیریم. کوچک بودن N در تضاد با تعداد زیاد اندازه‌گیری از سیگنال انتشار یافته در محیط، که شرط لازم روش‌های تشخیص کانال کور بود است. در اینجا برای افزایش تعداد اندازه‌گیری از نمونه‌برداری اضافی استفاده می‌کنیم.

۲- تغییر در بین اَبَردرلزه‌های چشمه مشترک، به‌طور کامل با جملات اثر چشمه شرح داده می‌شود. در نتیجه فرض می‌شود که پاسخ هر کدام از گیرنده‌ها درون جمله‌های اثر چشمه نفوذ نمی‌کند و می‌توان آن را نادیده گرفت. اثر این نفوذ موقعی کم است که تعداد ردلزه‌های هر اَبَردرلزه $(w+1)$ زیاد باشد. البته تعداد زیاد ردلزه باعث تغییر در الگوی انتشار می‌شود که در این صورت جواب دقیقی برای اثر چشمه به دست نمی‌آید. بر طبق این دو قید، تعداد مناسب ردلزه‌های یک اَبَردرلزه انتخاب می‌شود.

قبل از استفاده از تشخیص کانال کور به روش زیرفضای نوفه جزئی، نیاز به دانستن طول بهینه کانال داریم. در اینجا از روش تحلیل خطای طول کانال که هانسن (۱۹۹۲) پیشنهاد کرده است استفاده می‌کنیم. این روش براساس تحلیل خطا، طول بهینه کانال را پیشنهاد می‌دهد. همان‌طور که گفته شد در تشخیص کانال کور به روش زیرفضای نوفه، خطای اندازه‌گیری برابر کوچک‌ترین ویژه‌مقدار ماتریس D خواهد بود. اگر مقدار خطا بر بزرگ‌ترین ویژه‌مقدار ماتریس D تقسیم شود، مقدار پیش‌روی کانال در زیرفضای نوفه (میزان خطا) را نشان می‌دهد. همچنین اختلاف میان کوچک‌ترین و یکی قبل از کوچک‌ترین ویژه‌مقدار ماتریس D ، میزان یکتایی کانال برآورد شده را نشان می‌دهد. اگر این مقادیر را برای طول کانال‌های گوناگون به دست آوریم و روی منحنی ترسیم کنیم منحنی تحلیل خطای طول کانال به دست می‌آید. طول بهینه کانال مقداری است که در آن میزان خطا نسبت به سایر نقاط کمتر باشد و در عین حال، میزان یکتایی جواب صفر نباشد. هرچه میزان خطا کمتر و میزان یکتایی جواب بیشتر باشد، در آن طول کانال جواب بهتری خواهیم داشت (سیدآقامیری، ۱۳۸۸).

پس از به دست آوردن طول بهینه کانال، تشخیص کانال کور را روی پنجره اطلاعات انتخابی (ناحیه پُررنگ شده در شکل ۲- الف) اعمال می‌کنیم و کانال‌ها (یعنی اثر چشمه‌ها) را برای موقعیت‌های $i-N$ تا $i+N$ به دست می‌آوریم. سپس پنجره را به اندازه یک موقعیت جابه‌جا می‌کنیم $(i+1)$ و کانال‌های چشمه مربوط به پنجره جدید، که با پنجره قبلی اشتراک دارد را به دست می‌آوریم (شکل ۳). این کار را برای همه خطوط گیرنده مشترک (شکل ۲- الف) عملی می‌سازیم.

پنجره بعدی است. پس اگر جابه‌جایی زمانی میان دو کانال اول یک پنجره را از راه جابه‌جایی زمانی لازم برای پیشینه شدن همبستگی آنها حساب کنیم، جابه‌جایی زمانی نسبی بین آن پنجره و پنجره بعدی را به دست خواهیم آورد. به منظور به دست آوردن جابه‌جایی زمانی مطلق یک پنجره، فرض می‌کنیم که پنجره اول در موقعیت زمانی صحیح (مبنا) قرار دارد و برای موقعیت‌های دیگر، جابه‌جایی‌های نسبی پنجره‌های قبل از آن را با هم جمع می‌کنیم (سیدآقامیری، ۱۳۸۸).



شکل ۳. پنجره انتخابی برای به دست آوردن کانال‌ها و نحوه جابه‌جایی آن.

۴ اعمال روش جدید روی داده مصنوعی

مدل مصنوعی استفاده شده در شکل ۴-ب نشان داده شده است. این مدل شامل پیچیدگی‌های سطحی (لایه شیب‌دار به همراه یک عارضه تپه‌ای و تباین سرعتی) است. ثبت چشمه مشترک مربوط به این مدل در شکل ۵-ب نشان داده شده است.

از مقایسه ثبت‌های چشمه مشترک نشان داده شده در شکل ۵ اثر استاتیک مربوط به عارضه سطحی به صورت تغییر در زمان رسیدهای امواج بازتابی مشاهده می‌شود. در این مدل فاصله چشمه‌های مجاور و فاصله گیرنده‌های مجاور مساوی و برابر ۱۰ متر انتخاب شده است. چشمه‌ها در عمق ۳۰ متری زیر سطح زمین قرار دارند و چشمه از نوع p است و بسامد مرکزی آن ۵۰ هرتز است و تبدیل موج p به s نداریم. زمان نمونه‌برداری دو میلی‌ثانیه و نسبت سیگنال به نوفه ۴۰ دسی‌بل است.

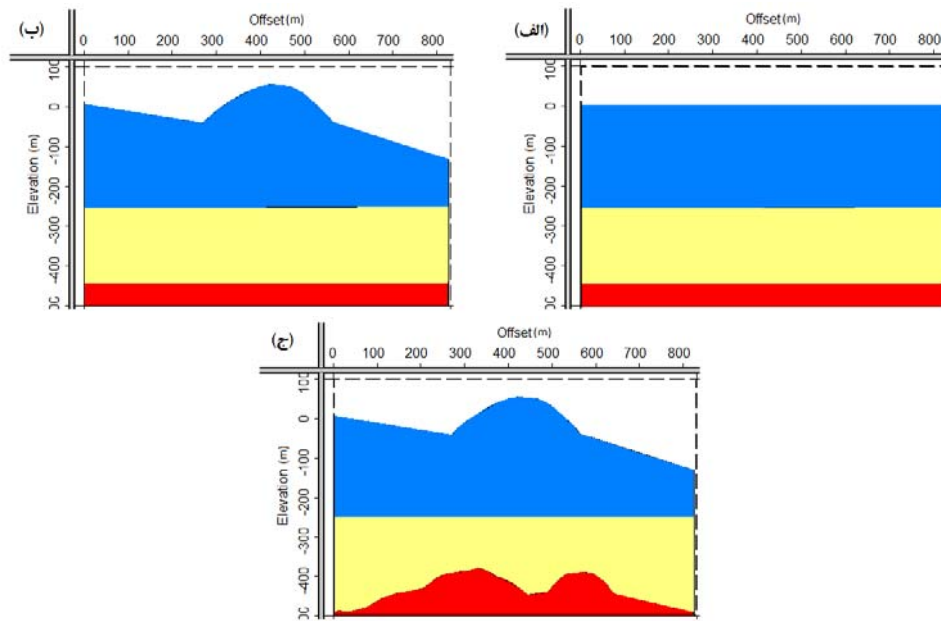
نمودار تحلیل خطای طول کانال مربوط به کانال‌های پاسخ گیرنده این داده مصنوعی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، برای $L=40\text{ms}$ میزان خطا کم و میزان یکتایی جواب مطلوب است. برای این آزمایش از $w=10$ ، $N=2$ ، $J=1$ و نمونه‌برداری اضافی با فاکتور ۴ استفاده شده است.

در ادامه برای به دست آوردن پاسخ گیرنده‌ها، اُبردلرزه‌های گیرنده مشترک را تشکیل می‌دهیم (شکل ۲-ب) و انتظار می‌رود تغییر بین اُبردلرزه‌های گیرنده مشترک از موقعیت $i-N$ تا $i+N$ نشانگر تغییر پاسخ گیرنده R^{i-N} تا R^{i+N} باشد. در این حالت برای یک اُبردلرزه خواهیم داشت:

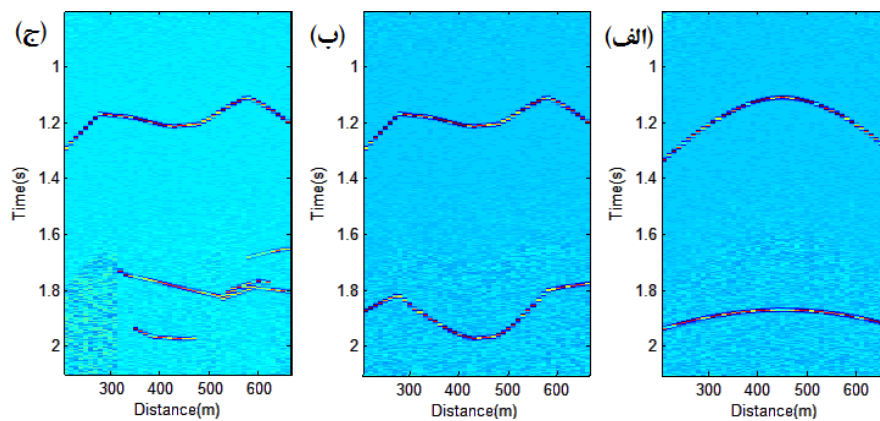
$$y_R^{(i)} = R^{(i)}(t) * G_R^{(i)} + n_R^{(i)}(t) \quad (15)$$

که در آن $G_R^{(i)}$ حاصل هم‌میخت پاسخ زمین برای دورافت‌های گوناگون $G^{(k,i)}$ تا $G^{(k+w,i)}$ و جملات چشمه مربوط است. در این حالت نیز با جابه‌جایی پنجره اطلاعات (شکل ۲-ب)، کانال‌های مربوط به همه خطوط چشمه مشترک را به دست می‌آوریم (پاسخ گیرنده‌ها).

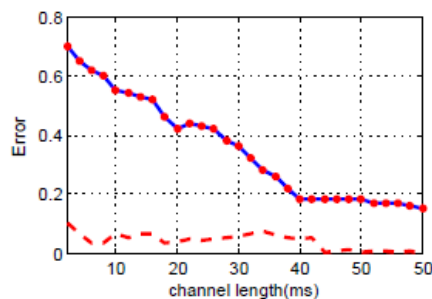
چون تشخیص کانال کور، کانال‌های یک پنجره را در زمان صحیح نسبت به هم به دست می‌آورد لذا اختلاف‌های زمانی موجود در بین پنجره‌های گوناگون به علت آشفتگی‌های نزدیک سطح خواهد بود. پس با به دست آوردن اختلاف‌های زمانی میان پنجره‌های گوناگون، زمان‌های لازم برای تصحیح استاتیک را به دست می‌آوریم. برای به دست آوردن اختلاف زمانی میان پنجره‌های گوناگون به این نکته توجه می‌کنیم که به‌خاطر همپوشانی، کانال دوم هر پنجره، مشابه کانال اول



شکل ۴. مدل مصنوعی سه لایه، (الف) بدون آشفته‌گی لایه سطحی، (ب) وجود آشفته‌گی لایه سطحی و (ج) وجود آشفته‌گی لایه سطحی و زیرسطحی.



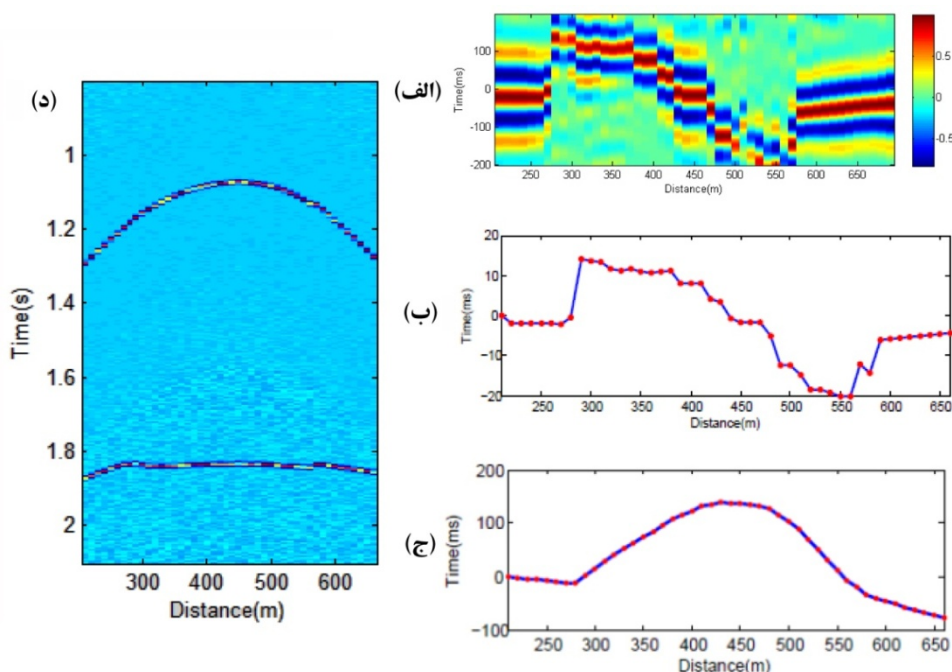
شکل ۵. ثبت چشمه مشترک مربوط به مدل مصنوعی که مقیاس‌گذاری agc روی آن صورت گرفته است، (الف) حالت بدون آشفته‌گی (شکل ۴-الف)، (ب) حالت وجود آشفته‌گی سطحی (شکل ۴-ب) و (ج) حالت وجود آشفته‌گی لایه سطحی و زیرسطحی (شکل ۴-ج).



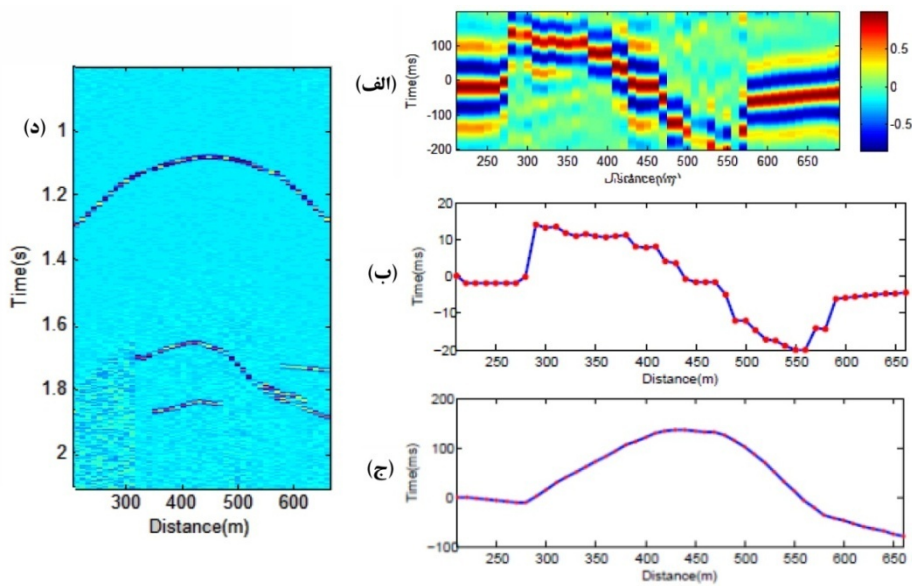
شکل ۶. منحنی تحلیل طول کانال - منحنی بالا میزان خطا و منحنی پایین یکتایی جواب را نشان می‌دهد. در طول ۴۰ میلی‌ثانیه میزان خطا کم و میزان یکتایی جواب مطلوب است.

در ادامه توانایی روش جدید در حفظ آشفتگی‌های لایه‌های زیرسطحی را بررسی می‌کنیم. به این منظور روش جدید را بر مدل شکل ۴-ج که علاوه بر آشفتگی‌های سطحی، دارای پستی و بلندی‌هایی در لایه سوم است اعمال می‌کنیم. نتایج مربوط به این مدل در شکل ۸ نمایش داده شده است که تقریباً مشابه شکل ۷ است. در حالتی که آشفتگی سطحی داریم، همه بازتابنده‌ها از این آشفتگی‌ها متاثر می‌شوند اما در حالتی که آشفتگی‌های زیرسطحی داریم، بعضی از بازتابنده‌ها از آشفتگی‌های زیرسطحی متاثر می‌شوند همچنین به علت فرایندهای جذب، واگرایی کروی و تقسیم انرژی در مرزها، بازتابنده‌های عمیق‌تر تحت تضعیف انرژی بیشتری قرار گرفته‌اند. از این رو در هنگام محاسبه همبستگی ابردرلرزه‌ها، اثر آشفتگی‌های لایه نزدیک سطح به علت تکرار بیشتر و دامنه قوی‌تر غالب خواهد بود.

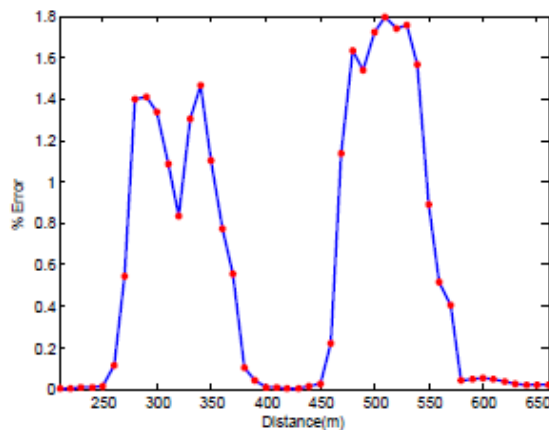
پس از محاسبه پاسخ گیرنده و اثر چشمه توسط تشخیص کانال کور، همبستگی میان دو کانال اول پنجره‌های گوناگون را به دست می‌آوریم (شکل ۷-الف). توجه کنید که محل بیشینه شدن شکل ۷-الف جابه‌جایی نسبی پنجره‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۷-ب). جابه‌جایی زمانی مطلق که از جمع جابه‌جایی‌های زمانی نسبی به دست آمده، در شکل ۷-ج نمایش داده شده است. همان‌طور که می‌بینیم شکل نمودار جابه‌جایی زمانی مطلق، شبیه به عارضه سطحی است که دلیلی برای صحت کارکرد روش است. شکل ۷-د ثبت چشمه مشترک (شکل ۵-ب) را بعد از اعمال جابه‌جایی‌های زمانی نشان می‌دهد. از مقایسه شکل ۷-د با شکل ۵-الف (که مربوط به حالت بدون آشفتگی‌های سطحی بود) می‌بینیم که هذلولی‌های امواج بازتابی که بر اثر آشفتگی‌های سطحی تغییر کرده بودند به حالت عادی برگشته‌اند و اثر عارضه تپه مانند نیز حل شده است.



شکل ۷. (الف) همبستگی میان دو کانال اول پنجره‌های پاسخ گیرنده، (ب) جابه‌جایی زمانی کانال‌های گوناگون نسبت به همدیگر، (ج) جابه‌جایی زمانی مطلق برای فاصله‌های متفاوت و (د) ثبت چشمه مشترک شکل ۵-ب پس از اعمال تصحیح استاتیک که مقیاس‌گذاری agc روی آن صورت گرفته است.



شکل ۸. (الف) همبستگی میان دو کانال اول پنجره‌های پاسخ گیرنده، (ب) جابه‌جایی زمانی کانال‌های گوناگون نسبت به همدیگر، (ج) جابه‌جایی زمانی مطلق برای فاصله‌های متفاوت و (د) ثبت چشمه مشترک شکل ۵-ج پس از اعمال تصحیح استاتیک که مقیاس‌گذاری agc روی آن صورت گرفته است.



شکل ۹. خطای اندازه‌گیری کانال‌های پنجره‌های گوناگون.

۵ اعمال روش روی داده لرزه‌ای واقعی

داده لرزه‌ای واقعی استفاده شده مربوط به یک خط برداشت لرزه‌ای دُو بُعدی در ساختگاه یکی از سدها در جنوب ایران است. در این خط برداشت فاصله چشمه‌های مجاور و فاصله گیرنده‌های مجاور ۱۲ متر است. نقشه توپوگرافی منطقه و نیم‌رخ ارتفاعی ایستگاه‌های گیرنده در شکل ۱۰ آورده شده است.

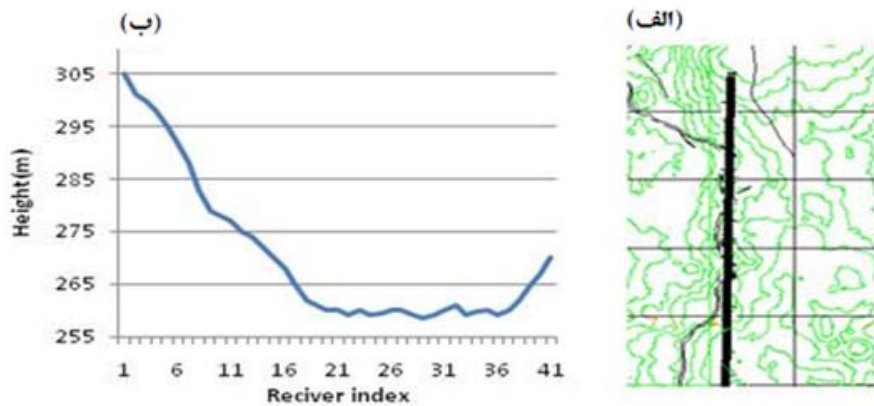
یکی از مزیت‌های تشخیص کانال به روش زیرفضای

نوفه جزئی، امکان به‌دست آوردن خطای اندازه‌گیری است. نمودار مربوط به خطای اندازه‌گیری کانال‌های گیرنده مدل مصنوعی (شکل ۴-ب) در شکل ۹ نشان داده شده است. برطبق این نمودار، بیشینه خطای اندازه‌گیری کانال‌ها ۱/۸٪ و متوسط آن ۰/۵٪ است.

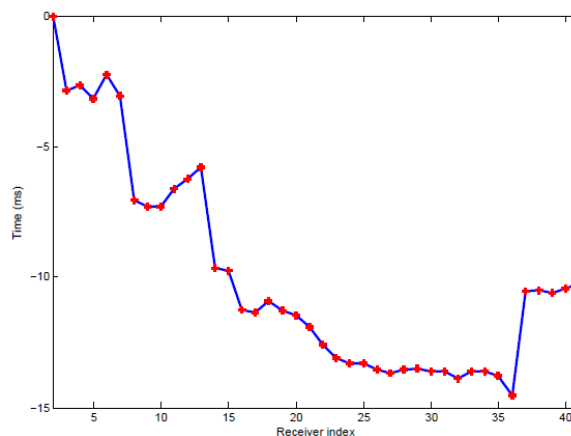
شده است. از مقایسه شکل ۱۱ با شکل ۱۰-ب دیده می‌شود که همخوانی خوبی وجود دارد. در ادامه برای همهٔ ثبت‌ها اثر چشمه و پاسخ گیرنده را به دست می‌آوریم و استاتیک‌های چشمه‌ها و گیرنده‌ها را روی آنها اعمال می‌کنیم. مقطع برانبارش شده مربوط به این داده لرزه‌ای در شکل ۱۲-ب نشان داده شده است. همان‌طور که می‌بینیم نسبت به مقطعی که قبل از برانبارش تصحیح استاتیک روی آن صورت نگرفته است (شکل ۱۲-الف) پیوستگی بازتابنده‌ها بیشتر می‌شود.

چشمه استفاده شده در این عملیات از نوع دینامیتی بوده است که با الگوی تک‌چاله در عمق دو متری زیر زمین قرار داده شده است. همچنین زمان نمونه‌برداری ۰/۵ میلی‌ثانیه است. برطبق نمودارهای گوناگون تحلیل خطای طول کانال، برای $L=32\text{ms}$ میزان خطا کم و میزان یکنایی جواب مطلوب است. برای اعمال روش روی این داده‌ها از $J=1$ ، $w=10$ ، $N=2$ و نمونه‌برداری اضافی با فاکتور ۴ استفاده شده است.

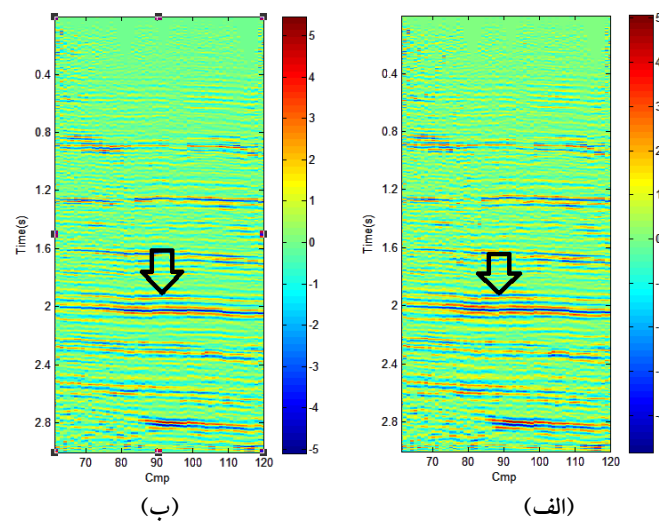
نمودار جابه‌جایی زمانی به دست آمده برای موقعیت‌های گوناگون گیرنده در شکل ۱۱ نشان داده



شکل ۱۰. (الف) نقشه توپوگرافی منطقه و موقعیت خط لرزه‌ای و (ب) نیم‌رخ ارتفاعی گیرنده‌ها.



شکل ۱۱. جابه‌جایی زمانی برای گیرنده‌های متفاوت.



شکل ۱۲. مقطع برانبارش شده مربوط به داده صحرایی (الف) بدون تصحیح استاتیک (ب) با تصحیح استاتیک.

۶ نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای تصحیح استاتیک برپایه تشخیص کانال کور معرفی و کارایی آن روی داده‌های واقعی و مصنوعی نشان داده شد. روش جدید تصحیح استاتیک بدون نیاز به اطلاعات مدل نزدیک سطح زمین روی داده‌ها اعمال می‌شود و جابه‌جایی‌های زمانی را محاسبه و حذف می‌کند. شایان ذکر است که این روش فقط قادر به حذف مولفه طول موج بلند تصحیح استاتیک خواهد بود. برای حذف مولفه طول موج کوتاه استاتیک می‌توان از تصحیح استاتیک باقی‌مانده در کنار این روش استفاده کرد. یکی از معایب عملیاتی روش جدید، نیاز آن به هندسه برداشت با فاصله برابر چشمه‌های مجاور و گیرنده‌های مجاور است (این نوع برداشت اطلاعات برای ساختن ابردرلرزه‌های دورافت مشترک مورد نیاز است).

پیوست

مدل هم‌میخت یک ورودی و چند خروجی (SIMO) در صورت ماتریسی:

برای مدل یک ورودی و p خروجی خطی و گسسته در

زمان (شکل ۱) مدل هم‌میخت به صورت زیر خواهد بود:

$$y^i(t) = a(t) * h^i(t) + n^i(t) \quad (\text{پ-۱})$$

که در آن، $*$ نشانگر عملگر هم‌میخت و اندیس i نشان‌دهنده شماره کانال است که از ۱ تا p تغییر می‌کند. $a(t)$ سیگنال اولیه، $h^i(t)$ پاسخ ضربه کانال i ام، $n^i(t)$ نوفه اضافه شده در مسیر کانال i ام و $y^i(t)$ موج ثبت شده مربوط به کانال i است.

به جای کار کردن با یک نمونه زمانی، می‌توان روابط بالا را در صورت بردار-ماتریسی برای q نمونه پشت سر هم به صورت زیر نوشت:

$$y_q^{(i)}(k) = [y_k^{(i)}, \dots, y_{k-q+1}^{(i)}]^T \quad (\text{پ-۲})$$

$$n_q^{(i)}(k) = [n_k^{(i)}, \dots, n_{k-q+1}^{(i)}]^T \quad (\text{پ-۳})$$

$$a_{q+L}(k) = [a_k, \dots, a_{k-(q+L)+1}]^T \quad (\text{پ-۴})$$

که در آن، T عملگر ترانپوز، q تعداد نمونه انتخابی، k تعداد کل نمونه‌ها و L تعداد نمونه‌های کانال است. برای بیان عملگر هم‌میخت از ماتریس فیلتر استفاده می‌کنیم در این حالت معادله (پ-۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

- Cox, M., 1999, Static corrections for seismic reflection surveys, SEG Book.
- Gardner, W. A., 1986, Introduction to random processes with applications to signals and systems, McGraw-Hill Book Co.
- Hansen, P. C., 1992, Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve, SIAM Review, **34**, 561-580.
- Karrenbach, M., 1994, Multi component source equalization, 64th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1449-1452.
- Lin, F. and Waag, R. C., 2002, Estimation and compensation of ultrasonic wave-front distortion using a blind system identification method, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, **49**, 739-755.
- Luo, H. and Li, Y., 1998, The application of blind channel identification techniques to prestack seismic deconvolution, Proceedings of the IEEE, **86**, 2082-2089.
- Mendel, J. M., 1991, Tutorial on higher-order statistics (spectra) in signal processing and system theory, Theoretical results and some applications, Proceedings of the IEEE, **79**, 278-305.
- Moulines, E., Duhamel, P., Cardoso, J. and Mayrargue, S., 1995, Subspace methods for the blind identification of multichannel FIR filters, IEEE Transactions on Signal Processing, **43**, 516-525.
- Porsani, M. and Ursin, P., 1998, Mixed-phase deconvolution, Geophysics, **63**, 637-647.
- Rietsch, E., 1997, Euclid and the art of wavelet estimation, Part I: Basic algorithm for noise-free data, Geophysics, **62**, 1931-1938.
- Sheriff, R. E., 1991, Exploration seismology 2nd Edition, Cambridge University Press New York.
- Taner, M. T. and Koehler, F., 1981, Surface consistent corrections, Geophysics, **46**, 17-22.
- Tong, L. and Perreau, P., 1998, Multichannel blind identification: From subspace to maximum likelihood methods, Proceedings of the IEEE, **86**, 1951-1968.
- Vossen, R. and Trampert, J., 2007, Full-waveform static corrections using blind channel identification, Geophysics, **72**(4), 55-66.
- Yilmaz, O. Z., 2001, Seismic data analysis, SEG Book, Tulsa, Oklahoma., **1**, 502-830.

$$y_q^{(i)}(k) = \mathcal{F}_q^{(i)}(h^{(i)})a_{q+L}(k) + n_q^{(i)}(k) \quad (5-پ)$$

که در آن، $\mathcal{F}_q^{(i)}(h^{(i)})$ ماتریس فیلتر کانال i با ابعاد $(q+L) \times q$ است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathcal{F}_q^{(i)}(\vec{h}^{(i)}) = \begin{pmatrix} h_0^{(i)} & \dots & h_L^{(i)} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & h_0^{(i)} & \dots & h_L^{(i)} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & & & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & h_0^{(i)} & \dots & h_L^{(i)} \end{pmatrix} \quad (6-پ)$$

سوی $q+L$

معادله (5-پ) مدل همایخت را برای q نمونه پشت سر هم مربوط به موج عبوری از کانال q بیان می کند. حال اگر بخواهیم آن را برای p کانال تعمیم دهیم، خواهیم داشت:

$$\vec{y}_q^T = [y_q^{(1)T}, \dots, y_q^{(p)T}] \quad (7-پ)$$

$$\vec{n}_q^T = [n_q^{(1)T}, \dots, n_q^{(p)T}] \quad (8-پ)$$

$$\vec{h}^T = [h^{(1)T}, \dots, h^{(p)T}] \quad (9-پ)$$

$$\vec{y}_q = \mathcal{F}_q(\vec{h})a_{q+L} + \vec{n}_q \quad (10-پ)$$

که در آن، ماتریس $\mathcal{F}_q(\vec{h})$ به صورت زیر است:

$$\mathcal{F}_q^T(\vec{h}) = [\mathcal{F}_q^{(1)T}, \dots, \mathcal{F}_q^{(p)T}] \quad (11-پ)$$

توجه شود که به منظور بیان ساده تر، اندیس k را حذف کرده ایم.

مراجع

- سیدآقامیری، س. ح.، ۱۳۸۸، تصحیح ایستا با استفاده از شکل موج کامل به روش تشخیص کانال کور، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران.
- Anstey, N., 1986, Whatever happened to ground-roll?, The Leading Edge, **5**, 40-45.
- Berni, A. J. and Roeber, W. L., 1989, Field array performance: Theoretical study of spatially correlated variations in amplitude coupling and static shift and case study in the Paris Basin, Geophysics, **54**, 451-459.