بازسازی گپ زمانی داده‌های زلزله با ترکیب روش‌های تجزیه مد تجربی و تحلیل طیفی تکین

غزاله اسمعیلی خانسری[۱]، علی غلامی[۲]، حبیب رحیمی[۳]
[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، gh.esmaeili@ut.ac.ir
[۲] استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، agholami@ut.ac.ir
[۳] دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، rahimih@ut.ac.ir

چکیده

دلایل متفاوتی را می‌توان برشمرد که باعث ایجاد گپ یا نبود داده در سری‌های زمانی مربوط به زلزله می‌شود. بسته به طول زمانی گپ تخریب اطلاعات ثبت شده در یک رکورد می‌تواند چنان وسیع باشد که آن رکورد را بی استفاد کند. همچنین بسیاری از نرم افزارهای استاندارد برای پردازش داده‌های زلزله در حضور گپ دچار مشکل می‌شوند. لذا بازسازی گپ زمانی داده‌ها با استفاده از ابزارهای پردازش سیگنال بسیار حایز اهمیت است. در این مقاله با ترکیب روش‌های تجزیه مُد تجربی 6(EMD) و تحلیل طیفی تکین۷ (SSA) روشی جهت بازسازی گپ زمانی در رکوردهای زلزله ارائه شده است. در قدم اول روش EMD موجب تجزیه رکورد پیچیده و ناقص به تعدادی رکورد ساده می‌شود که به دلیل سادگی بهتر قابل پیش بینی هستند. در قدم بعدی از روش SSA جهت بازسازی گپ هر مولفه EMD استفاده می‌شود. نتایج اولیه روش پیشنهادی در بازسازی داده‌های واقعی امیدوارکننده به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: بازسازی گپ، درونیابی، لرزه‌نگاشت، تجزیه مد تجربی، تحلیل طیفی تکین، زلزله

Gap filling in earthquake seismograms by combining Empirical mode decomposition and Singular Spectral Analysis (SSA)

Esmaeili Khansari, Gh.[1] Gholami, A.[2] Rahimi, H.[3]

[1]MSC student, Institute of Geophysics, University of Tehran
[2]Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran
[3]Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran

Abstract

Several reasons can cause a gap in the earthquake time series (seismogram). Depending on the time duration of the gap, the information content of a seismogram may even be useless. Furthermore, most of the standard signal processing tools are only applicable to signals without gaps. In this article, we propose a method that combines the empirical mode decomposition (EMD) and singular spectral analysis (SSA) to infill seismograms. This method first decomposes a complex seismogram into the intrinsic mode functions (IMFs) using EMD and then infills the gaps in the IMF using SSA. Numerical tests show promising results obtained by the proposed method for the reconstruction of the information missed due to the gaps in seismograms.

Keywords: Gap filling, Interpolation, Seismogram, Empirical mode decomposition, Singular spectral analysis, Earthquake

۱ مقدمه

علم ژئوفیزیک به‌دنبال استخراج خصوصیات فیزیکی زمین به صورت متداول با استفاده از پردازش و تحلیل لرزه‌نگاشت‌های

6 Empirical mode decomposition
7 Singular spectral analysis

ثبت شده است. در این راستا، جهت شناخت خصوصیات پیچیده‌ی زمین، تحلیل پدیده‌های طبیعی نظیر زمین‌لرزه از اهمیت بالایی برخوردار است. اطلاعات زمین‌لرزه‌ها معمولاً به صورت سری‌های زمانی که نشان‌دهنده‌ی تغییرات زمانی یک یا چند پارامتر فیزیکی می‌باشد ثبت می‌شوند (میوزیل و همکاران، ۲۰۱۱). با این وجود بنا به دلایلی همانند به روز نبودن دستگاه‌های ثبات و انتقال داده، شرایط نامساعد آب و هوایی، نقص دستگاهی و غیره شاهد نبود داده در توالی سری‌های زمانی مربوطه هستیم که به آن گپ داده اطلاق می‌شود. وجود گپ در این سری‌ها سبب ایجاد عدم قطعیت بالا در نتایج بدست امده از این داده‌ها می‌شود.

روش‌های متعددی برای درونیابی سری‌های زمانی و بازسازی گپ موجود در آنها پیشنهاد شده‌است. در این میان با توجه به نوع داده و گپ موجود، می‌توان از روش‌هایی همانند روش‌های درونیابی خطی، روش میانگین متحرک[8] ، درونیابی با استفاده از چند جمله‌ای‌ها (مانند چند جمله‌ای نیوتون، لاگرانژ و غیره)، درونیابی با اسپلاین‌ها[9] (لِوی، ۲۰۱۷)، الگوریتم *clean* (روبرتز و همکاران، ۱۹۹۸)، تجزیه مُد تجربی بهبودیافته (مقتدری و همکاران، ۲۰۱۲)، و تحلیل طیفی تکین (کندراشو و گیل، ۲۰۰۶) اشاره کرد. در مطالعه حاضر با استفاده از ترکیب روش‌های تجزیه مد تجربی بهبودیافته و SSA به بازسازی گپ لرزه‌نگاشت دورلرز پرداخته شده است.

۲ روش تحقیق

در این مطالعه، با استفاده از روش تجزیه مُد تجربی، سیگنال دارای گپ به مولفه‌های IMF تجزیه می‌شود. در ادامه، با استفاده از روش تحلیل طیفی تکین، گپ هر مولفه پر شده و در نهایت با جمع مولفه‌های IMF مقادیر گپ سیگنال به‌دست می‌آید. این فرایند در دو مرحله صورت گرفته که شرح هریک در ادامه آورده شده است.

مرحله‌ی اول ـ تجزیه سیگنال

روش تجزیه مُد تجربی (EMD) توسط هوانگ و همکاران (۱۹۹۸) معرفی شد. این روش، ابزار قدرتمندی در تحلیل سیگنال‌های غیرخطی و ناپایا است. در این روش، سیگنال طی فرآیند غربالگری[10] به مولفه‌های نوسانی‌اش تجزیه می‌شود. این مولفه‌ها، توابع مُد ذاتی[11] (IMF) نامیده می‌شوند. هرIMF مولفه‌های فرکانسی متفاوتی دارد که بطور بالقوه اطلاعات زمین‌شناسی و چینه شناسی متفاوتی را برجسته می‌کنند. در روش EMD، هر IMF از شرایط زیر پیروی می‌کند (هوانگ و همکاران، ۱۹۹۸):

۱) تعداد بیشینه‌ها و کمینه‌های محلی و عبور از صفر باید برابر باشند و یا تنها یک عدد اختلاف داشته باشند.

۲) میانگین پوش بالایی و پایینی سیگنال باید تقریباً برابر صفر باشد.

با فرض $q>>1$ و Q که به‌ترتیب بیانگر اندیس و طول گپ هستند، می‌توان سیگنال دارای گپ را به‌صورت $X=(X_1,...,X_{q-1},X_{q+Q},...,X_N)$ در نظر گرفت. مراحل غربالگری سیگنال دارای گپ به شرح زیر می‌باشد (مقتدری و همکاران، ۲۰۱۲):

۱) تعیین بیشینه و کمینه‌های محلی سیگنال و محاسبه‌ی پوش بالایی و پایینی با درونیابی این نقاط. با توجه به عدم وجود X_q و X_{q+Q-1} و نیز عدم امکان درنظر گرفتن X_{q-1} و X_{q+Q} به‌عنوان اکسترمم محلی، جهت درونیابی پوش‌ها لازم است دو نقطه ابتدا و انتهای هر قسمت از گپ تعیین شود. یک نقطه ابتدای سیگنال به عنوان اولین اکسترمم محلی در زمان شروع سیگنال، t_1 و نقطه‌ای دیگر به عنوان اولین کمینه محلی در همان

---

8 Moving average
9 Splines
10 Sifting
11 Intrinsic mode functions

اندیس زمانی به ترتیب جهت درونیابی پوش بالا و پوش پایین قسمت اول سیگنال در نظر گرفته می‌شود. به همین ترتیب در زمان t_{q-1}، t_{q+Q} و t_N نقاطی به عنوان بیشینه و کمینه محلی جهت درونیابی پوش‌ها به نقاط اکسترمم اضافه می‌شوند.

۲) با اضافه شدن این نقاط جدید در ابتدا و انتهای هر قسمت از گپ به بیشینه و کمینه‌های محلی، پوش‌بالا و پایین محاسبه شده و میانگین بدست آمده از آنها از داده‌ی اصلی کم می‌شود: $h = X - M$ (M میانگین پوش بالا و پایین است).

۳) بدلیل وجود گپ، امکان بررسی شرط تعیین IMF ها وجود ندارد. در نتیجه از قید زیر استفاده می‌شود: درصورتی که $k \le 100/i$ باشد، آنگاه k شمارش شده و h به عنوان ورودی فرآیند غربالگری در نظر گرفته‌می‌شود (در شروع چرخه $i=1$ در نظر گرفته می‌شود). در غیر اینصورت، i شمارش شده $k=1$ قرارداده می‌شود و h به عنوان IMF انتخاب شده و $h = X - h$ به عنوان ورودی فرآیند در نظر گرفته می‌شود.

۴) این فرایند تا زمانی که i از ۱۰ تجاوز نکند و یا در هر طرف گپ حداقل بیشینه و کمینه محلی لازم جهت درونیابی وجود داشته‌باشد، ادامه می‌یابد. پس از اتمام چرخه، آخرین h به عنوان باقی‌مانده در نظر گرفته‌می‌شود.

مرحله‌ی دوم ـ بازسازی گپ توابع مُد پایه

روش SSA بر مبنای روش تجزیه مقادیر تکین[۱۲](SVD) است که توسط لانکسوز[۱۳] (۱۹۶۱) ارائه شد و در ادامه توسط محققین مختلف توسعه یافت. تحلیل طیفی تکین یکی از این الگوریتم‌ها است که در ژئوفیزیک جهت آنالیز روند و مولفه‌های اصلی، فیلتر و پرکردن گپ داده مورد استفاده قرار گرفته است. روش SSA بر مبنای کاهش رتبه ماتریس کواریانس سری زمانی عمل می‌کند. در تکرار اول مقادیر گپ با صفر جایگزین شده و سپس ماتریس کواریانس آن ساخته شده و مقادیر ویژه و بردارهای ویژه محاسبه می‌شوند. در ادامه، با کاهش رتبه ماتریس تخمینی از سیگنال حاصل می‌شود. با جایگزین کردن مقادیر بازسازی شده‌ی قسمت گپ سیگنال حاصل به عنوان تخمینی از این مقادیر در سیگنال اصلی و با تکرار این چرخه می‌توان به تخمین درست‌تری از مقادیر گپ دست‌یافت.

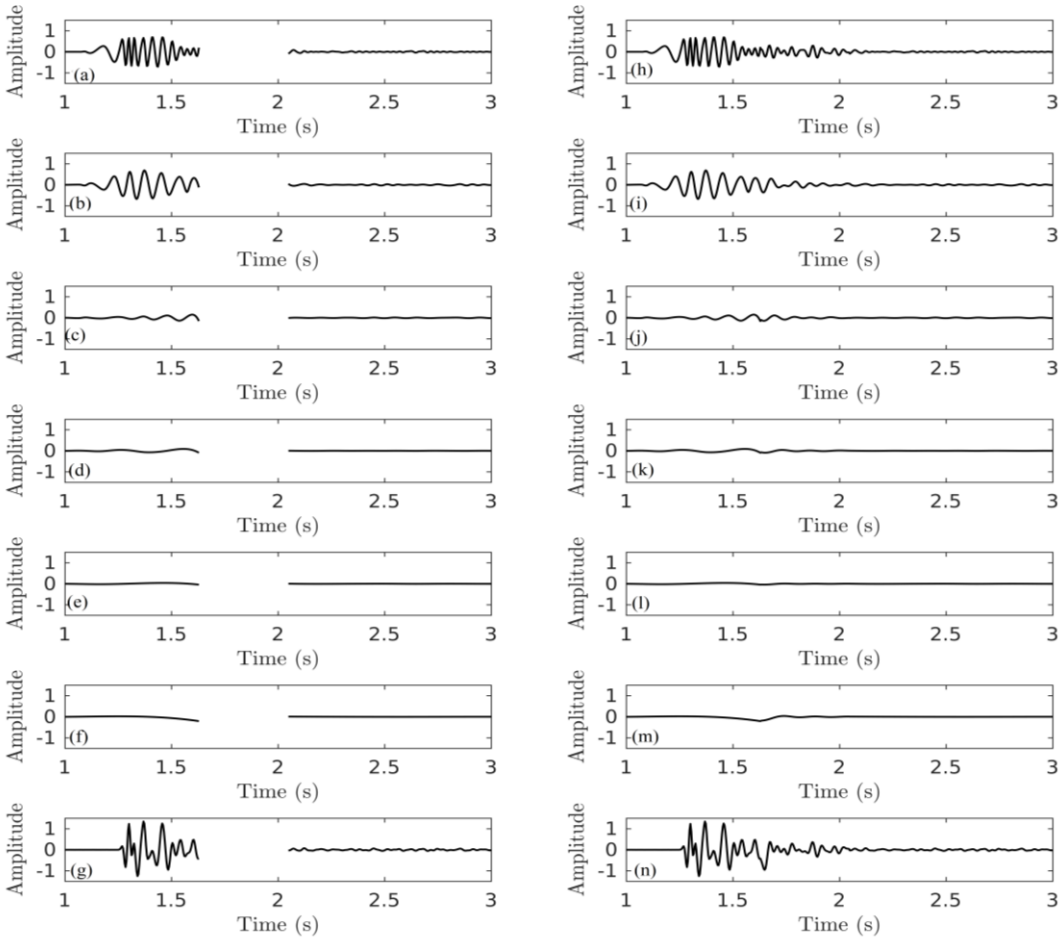
۳ مثال عددی

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی در این مطالعه، از یک لرزه‌نگاشت دورلرز استفاده شده است که به اندازه‌ی ۱۰ درصد طول کل سیگنال در وسط سیگنال دارای گپ است. با استفاده از روش دو مرحله‌ای پیشنهاد شده، گپ مرتبط با هر IMF قابل بازسازی است. در شکل (۱-a-f)، نمایش IMF ها همراه با گپ آورده شده است. در مقابل، در شکل (۱--h-m)، IMF های بازسازی شده متناظر آورده شده است. همچنین در شکل‌های (۱-g) و (۱-n) به ترتیب لرزه‌نگاشت دارای گپ و بازسازی شده نمایش داده شده است.

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله با ترکیب روش‌های تجزیه مُد تجربی و تحلیل طیفی تکین روشی جهت بازسازی گپ زمانی در لرزه‌نگاشت ارائه گردید. با استفاده از تجزیه مُد تجربی ابتدا IMF های گپ‌دار متناظر تشکیل و سپس با استفاده از روش تحلیل طیفی تکین، گپ مربوط به هر IMF بازسازی می‌شود. روش پیشنهاد شده از سادگی پیش‌بینی مقادیر گپ سیگنال در حوزه EMD بهره می‌گیرد.

12Singular value decomposition
13Lonczos



شکل ۱. IMF(a-f) های گپ دار ساخته شده، IMF (h-m) های بازسازی شده، (g) لرزه نگاشت گپ‌دار، (n) لرزه نگاشت بازسازی شده

منابع

Broomhead, D. S., R. Jones, and G. P. King, 1987. Topological dimension and local coordinates from time series data, *J. Phys*. A, **20**, 563–569.

Huang, N.E., Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung and H.H. Liu, 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences* **454**(1971), 903-995

Kondrashov, D., M.Ghil, 2006. Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets. *Nonlin. Processes Geophys*., **13**, pp. 151–159.

Lanczos, C. (1961). Linear Differential Operators. Van Nostrand, New York

Levy, D., 2010. Introduction to numerical analysis. *Department of Mathematics and Center for Scientific Computation and Mathematical Modeling (CSCAMM) University of Maryland*, 2-2.

Moghtaderi, A., P. Borgnat, P. Flandrin, 2012. Gap-filling by the empirical mode decomposition, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 3821-3824,

Musial, J.P., M.M. Verstraete, N. Gobron , 2011. Technical Note: Comparing the effectiveness of recent algorithms to fill and smooth incomplete and noisy time series, *Atmos. Chem. Phys*., **11**, 7905–7923

Roberts, D., J. Lehar, J. Dreher, 1978. Time series analysis with CLEAN. I: Derivation of a spectrum, *Astronomical Journal*, **93** (4), 1987, pp.968-989