

УДК 550.34

Повышение робастности и устойчивости оценок параметров годографов Рэлея–Шустера с помощью различных способов нормировки векторов

© 2015 г. А.В. Дещеревский, А.Я. Сидорин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Рассматривается метод годографов Рэлея–Шустера, предназначенный для анализа изменений фазы квазипериодического сигнала. Предложен способ условной нормировки вектора, учитывающий амплитуду вектора. Он значительно повышает робастность и устойчивость метода к изменениям характера распределений исходных данных и наличию в них различных дефектов. При анализе каталогов землетрясений этот способ сильно ослабляет влияние кластеризации событий, обусловленной, в частности, наличием роев землетрясений сравнимой магнитуды и афтершоковых последовательностей сильных землетрясений. Сравниваются разные способы нормировки фазового вектора: 1) традиционный, с сохранением амплитуды сигнала; 2) с приведением к единичному вектору и 3) с условной нормировкой, учитывающей амплитуду вектора. Методы сравниваются на примере обработки модельных сигналов и выборок из реальных каталогов землетрясений. Показано, что для хаотизированных рядов все три метода нормировки дают близкие результаты.

Ключевые слова: годограф Рэлея–Шустера, фазовый вектор, методы построения, нормировка, условная нормировка, коррелированные данные, группированные события, робастность, устойчивость алгоритма.

Литература

- Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Гвишиани А.Д., Граева Е.М., Злотники Ж., Родкин М.В. Исследование морфологии сигнала на основе алгоритмов нечеткой логики // Геофизические исследования. 2005. Вып. 1. С.143–155.
- Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 1. Порядок и хаос в литосфере и других сферах. М.: ОИФЗ РАН, 1994. 176 с.
- Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 2. Циклическая динамика в природе и обществе. М.: Научный мир, 1998. 432 с.
- Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. 672 с.
- Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 4. Человек и три окружающие его среды. М.: ООО “Светоч Плюс”, 2009. 336 с.
- Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 5. Человек и три окружающие его среды. М.: Янус-К, 2013. 744 с.
- Гамбурцев А.Г., Александров С.И., Олейник О.В., Гамбурцева Н.Г., Иванов-Холодный Г.С., Новиков А.М., Куценко В.В., Новоселова В.А., Лагунов С.И., Корсак М.Н. Комплексный экологический мониторинг и Атлас временных вариаций // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. С. 160–169.
- Ландер А.В., Левшин А.Л., Писаренко В.Ф. О спектрально-временном анализе колебаний // Вычислительная сейсмология. 1975. С.336–349. (Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных; Вып. 6).
- Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 240 с.

- Сидорин А.Я. Полуденный эффект во временных рядах землетрясений и сейсмического шума // Докл. РАН. 2005. Т. 402, № 6. С.822–827. [Engl. transl.: Sidorin, A.Ya. Midday effect in the time series of earthquakes and seismic noise // Doklady Earth Sciences. 2005. V. 403, N 5. P.771–776].
- Сидорин А.Я. Новый взгляд на проблему годовой периодичности электрического сопротивления земной коры в исследованиях по прогнозу землетрясений изменения // Сейсмические приборы. 2007. Т. 43. С.61–78. [Engl. transl.: Sidorin A.Ya. A new insight into the problem of annual periodicity of the electric resistivity of the Earth's crust in earthquake prediction research // Seismic Instruments. 2007. V. 43, N 1. P.11–20. DOI: 10.3103/S0747923907010021].
- Сидорин А.Я. О применении метода Рэлея–Шустера в исследованиях периодичности землетрясений // Сейсмические приборы. 2009а. Т. 45, № 3. С.29–40.
- Сидорин А.Я. Суточная периодичность землетрясений и ее сезонные изменения // Сейсмические приборы. 2009б. Т. 45, № 4. С.69–84. [Engl. transl.: Sidorin A.Ya. Diurnal periodicity of earthquakes and its seasonal variations // Seismic Instruments. 2010. V. 46, N 3. P.293–305. DOI: 10.3103/S0747923910030114].
- Сидорин А.Я. Причина необычной суточной периодичности сейсмических событий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011а. Т. 38, № 2. С.55–70. [Engl. transl.: Sidorin A.Ya. On the causes of unordinary periodicity of earthquakes // Seismic Instruments. 2012. V. 48, N 2. P.196–207. DOI: 10.3103/S0747923912020090].
- Сидорин А.Я. Изменения параметров суточной периодичности землетрясений Южной Калифорнии в окрестности порога представительности каталога // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011б. Т. 38, № 3. С.69–81. [Engl. transl.: Sidorin A.Ya. Changes in the diurnal periodicity of Southern California earthquakes in the neighborhood of the catalog magnitude of completeness // Seismic Instruments. 2012. V. 48, No. 4. P. 342–350. DOI: 10.3103/S0747923912040044].
- Сидорин А.Я. Связь параметров фазовых диаграмм суточной периодичности и графика повторяемости землетрясений Гармского района // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011в. Т. 38, № 4. С.59–82.
- Сидорин А.Я. Неравномерность внутригодового распределения сильных землетрясений Гармского полигона // Геофизические процессы и биосфера. 2012. Т. 11, № 4. С.58–64. [Engl. transl.: Sidorin A.Ya. Nonuniform intra-annual distribution of strong earthquakes in the Garm region // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. V. 40, N 7. P.780–784. DOI: 10.1134/S0001433813070050].
- Сидорин А.Я. Различия внутрисуточных фазовых диаграмм потоков землетрясений разной энергии // Сейсмические приборы. 2013а. Т. 49, № 2. С.71–84.
- Сидорин А.Я. Особенности суточной периодичности землетрясений Японии // Сейсмические приборы. 2013б. Т. 49, № 3. С.55–84. [Engl. transl.: Sidorin A.Ya. Features of the diurnal periodicity of earthquakes in Japan // Seismic Instruments. 2014. V. 50, N 3. P.246–267. DOI: 10.3103/S0747923914030098].
- Сидорин А.Я. Влияние афтершоков на параметры суточной периодичности землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013в. Т. 40, № 2. С.68–78.
- Сидорин А.Я. Эффект выходного дня в сейсмичности Японии // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 2. С.58–64. [Engl. transl.: Sidorin A.Ya. A weekend effect in the seismicity of Japan // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. V. 50, N 8. P.824–838. DOI: 10.1134/S0001433814080076].
- Сидорин А.Я. Поиск техногенных эффектов в каталоге землетрясений Гармского полигона // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14, № 1. С.80–94.
- Bachelier L. Théorie de la Spéculation // Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure Sér. 1900. V. 3, N 17. P.21–86.
- Bartels J. Random fluctuations, persistence, and quasi-persistence in geophysical and cosmical periodicities // Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity. 1935. V. 40, N 1. P.1–60.
- Beeler N., Lockner D. Why earthquakes correlate weakly with the solid Earth tides: Effects of periodic stress on the rate and probability of earthquake occurrence // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2003. V. 108 (B8).

- Bettinelli P., Avouac J.-P., Flouzat M., Bollinger L., Ramillien G., Rajaure S., Sapkota S.* Seasonal variations of seismicity and geodetic strain in the Himalaya induced by surface hydrology // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. V. 266. P. 332–344.
- Cadicheanu N., Van Ruymbeke M., Zhu P.* Tidal triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone (Romania) // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2007. V. 7, N 6. P. 733–740. <hal-00299472>
- Cochran E.S., Vidale J.E., Tanaka S.* Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes // *Science*. 2004. V. 306. P. 1164–1166.
- Einstein A.* Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen // *Ann. Phys.* 1905. V. 322, N 8. S. 549–560. [Русский перевод: Эйнштейн А. О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты // *Собр. науч. тр. М.: Наука*, 1966. Т. 3. С. 108–117].
- Fisher N.I.* Statistical analysis of circular data. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1996. 296 p.
- Hartzell S., Heaton T.* The fortnightly tide and the tidal triggering of earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1989. V. 79, N 4. P. 1282–1286.
- Hass L., Ellis M., Rydelek P.A.* Minimum magnitude of completeness and rates of seismicity in the New Madrid region // *Seismol. Res. Lett.* 1992. V. 63. P. 395–405.
- Heaton T.H.* Tidal triggering of earthquakes // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1975. V. 43. P. 307–326.
- Heaton T.H.* Tidal triggering of earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1982. V. 72, N 6. P. 2181–2200.
- Kansowa T., Tatnall A.R.L.* A possible link between Earth tides and earthquakes // *Journal of Environmental Sciences*. 2010. V. 39. <http://eprints.soton.ac.uk/153169>.
- Li Q., Xu G.-M.* Tidal triggering of earthquakes in Longmen Shan region: The relation to the fold belt and basin structures // *Earth Planets Space*. 2012. V. 64. P. 771–776. doi: 10.5047/eps.2011.06.037.
- Li Q., Xu G.-M.* Precursory pattern of tidal triggering of earthquakes in six regions of China: the possible relation to the crustal heterogeneity // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2013. V. 13. P. 2605–2618. doi: 10.5194/nhess-13-2605-2013.
- Lindberg C.R., Park J.* Multiple-taper spectral analysis of terrestrial free oscillations: Part II // *Geophys. Jour. Roy. Astron. Soc.* 1987. V. 91, N 3. P. 795–836.
- Lockner D., Beeler N.* Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 1999. V. 104 (B9). P. 20133–20151.
- Mardia K.V., Jupp P.E.* Directional statistics. Chichester; New York: John Wiley & Sons Inc., 2000. 429 p.
- McMurry H.* Periodicity of deep-focus earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1941. V. 31, N 1. P. 33–59.
- Park J., Lindberg C.R., Thomson D.J.* Multiple-taper spectral analysis of terrestrial free oscillations: Part I // *Geophys. Jour. Roy. Astron. Soc.* 1987a. V. 91, N 3. P. 755–794.
- Park J., Lindbera C.R., Vernon III F.L.* Multitaper spectral analysis of high frequency seismograms // *Jour. Geophys. Res. B*. 1987b. V. 92, N 12. P. 12675–12784.
- Pearson K.* The problem of the random walk // *Nature*. 1905. V. 72, N 1865 (July 27). P. 294.
- Pearson K., Blakeman J.* Mathematical contributions to the theory of evolution – XV. A mathematical theory of random walk. Drapers' Company Research Mem. Biometric Series III. London: London Univ., Univ. College, Dept. Appl. Math., 1906.
- Rayleigh, lord.* On the result of a large number of vibrations of the same pitch and arbitrary phase // *Philosophical Magazine*. Ser. 5. 1880. V. 10. P. 73–78.
- Rayleigh, lord.* On the problem of random vibrations and of random flights in one, two or three dimensions // *Philosophical Magazine*. Ser. 6. 1919a. V. 37. P. 321–347.
- Rayleigh, lord.* On the resultant of a number of unit vibrations whose phases are at random over a range not limited to an integral number of periods // *Philosophical Magazine*. Ser. 6. 1919b. V. 37. P. 498–515.
- Rydelek P., Hass L.* On estimating the amount of blasts in seismic catalogs with Schuster's method // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1994. V. 84, N 4. P. 1256–1259.

- Rydelek P.A., Sacks I.S.* Comment on “Seismicity and detection/location threshold in the Southern Great Basin seismic network” by Joan Gomberg // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97, N B11. P.15361–15362. doi: 10.1029/92JB00604
- Rydelek P.A., Sacks I.S.* Testing the completeness of earthquake catalogues and the hypothesis of self-similarity // *Nature*. 1989. V. 337. P.251–253. doi: 10.1038/337251a0.
- Rydelek P.A., Sacks I.S., Scarpa R.* On tidal triggering of earthquakes at Campi Flegrei, Italy // *Geophys. J. Inter.* 1992. V. 109. P.125–137.
- Savage H.M., Marone C.* Effects of shear velocity oscillations on stick-slip behavior in laboratory experiments // *J. Geophys. Res.* 2007. 112, B02301. doi: 10.1029/2005JB004238.
- Schuster A.* On lunar and solar periodicities of earthquakes // *Proc. Roy. Soc. London*. 1897. V. 61. P.455–465.
- Shirley J.H.* Lunar periodicity in great earthquakes, 1950–1965 // *Gerlands. Beitrag. Geophysik*. 1986. V. 95. P.509–515.
- Shlien S.* Earthquake-tide correlation // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1972. V. 28. P.27–34.
- Sidorin A.Ya.* Are the Earth’s resistivity seasonal variations linked to changes in seismic rate? // Геофизические исследования. 2005. Вып. 2. С.83–92.
- Smoluchowski M., von.* Unregelmässigkeiten in der Verteilung von Gasmolekeln und deren Einfluss auf Entropie und Zustandsgleichung // *Boltzmann – Festschrift. Leipzig*. 1904. S.626–633.
- Smoluchowski M., von.* Zarys kinetycznej teorii ruchów Browna i roztworów metnych. Rozprawy i Sprawozdania z Posiedzen // Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Akademii Umiejetnos. 1906. ci. 3. S.257–282. (Smoluchowski M., von. Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen // *Ann. Phys.* 1906. V. 326, N 14. S.756–780).
- Stroup D.F., Bohnenstiehl D.R., Tolstoy M., Waldhauser F., Weekly R.T.* Pulse of the seafloor: Tidal triggering of microearthquakes at 9°50' N East Pacific Rise // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34, L15301. doi: 10.1029/2007GL030088.
- Tanaka S., Ohtake M., Sato H.* Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N B10. 2211. doi: 10.1029/2001JB001577.
- Tanaka S., Sato H., Matsumura S., Ohtake M.* Tidal triggering of earthquakes in the subducting Philippine Sea plate beneath the locked zone of the plate interface in the Tokai region, Japan // *Tectonophysics*. 2006. V. 417. P.69–80.
- Tsuruoka H., Ohtake M., Sato H.* Statistical test of the tidal triggering of earthquakes: Contribution of the ocean tide loading effect // *Geophys. J. Int.* 1995. V. 122. P.183–194.
- Ulbrich U., Ahorner L., Ebel A.* Statistical investigations on diurnal and annual periodicity and on tidal triggering of local earthquakes in Central Europe // *J. Geophys.* 1987. V. 61. P.150–157.
- Wilcock W.S.D.* Tidal triggering of microearthquakes on the Juan de Fuca Ridge // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P.3999–4002.
- Young D., Zürn W.* Tidal triggering of earthquakes in Swabian Jura? // *J. Geophys.* 1979. V. 45, N 2. P.171–182.
- Zürn W., Rydelek P.* Revisiting the phasor-walkout method for detailed investigation of harmonic signals in time series // *Surveys in Geophysics*. 1994. V. 15, N 4. P.409–431.