

**Zeszyty Naukowe**Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk

rok 2017, nr 101, s. 195–202

Rafał CZARNY*

Fizyczne podstawy metody interferometrii sejsmicznej

Streszczenie: Interferometria sejsmiczna jest dynamicznie rozwijającą się metodą, której pierwsze zastosowania sięgają początków obecnego stulecia. Aktualnie znajduje coraz szersze zastosowanie w zagadnieniach m.in. obrazowania głębokich struktur ziemi oraz utworów przypowierzchniowych, monitorowania procesów wulkanicznych oraz analizowania wpływu silnych trzęsień ziemi na obiekty budowlane. Metoda ta pozwala na odtworzenie odpowiedzi impulsowej tzw. funkcji Greena ośrodka pomiędzy parą odbiorników na podstawie zarejestrowanych w tym samym czasie sejsmicznych pól falowych na tych odbiornikach. W wyniku odpowiednich operacji matematycznych metoda ta zamienia zarejestrowane na odbiornikach koherentne fale sejsmiczne o nieznanym czasie oraz miejscu ich wzbudzenia na układ tzw. wirtualnych źródeł emitujących sejsmiczne pole falowe z dowolnego odbiornika. W artykule przedstawiono fizyczne uzasadnienie wyników eksperymentu akustyki odwróconego czasu (ang. *time-reversed acoustics*) według Derode i in. (2003), które jest zarazem wytłumaczeniem metody interferometrii sejsmicznej. Eksperyment laboratoryjny w pierwszym etapie polegał na rejestracji akustycznego pola falowego wyemitowanego na brzegu naczynia wypełnionego cieczą i stalowymi prętami. Następnie rejestracje zostały odwrócone w czasie i wysłane powtórnie do wnętrza naczynia i odebrany po przeciwnej stronie. Zarejestrowany na końcu sygnał okazał się zbliżony do sygnału wyemitowanego, pomimo przejścia przez ośrodek wielokrotnie rozpraszający. Doświadczenie to uzasadniono wykorzystując technikę korelacji wzajemnej (ang. *cross-correlation*), zasadę superpozycji pola falowego oraz zasadę wzajemności Rayleigha.

Słowa kluczowe: interferometria sejsmiczna, funkcja Greena, korelacja wzajemna, akustyka odwróconego czasu

Physical derivation of the seismic interferometry method

Abstract: Seismic interferometry is a geophysical method which has been developing very rapidly over the last decade. It has been applied to image deep structures of the Earth as well as near-surface, monitor volcanic processes, geothermal reservoirs within exploitation, rock mass deformation induced by mining, landslides, ground water storage, ice sheet or the impact of strong earthquakes to buildings. The vast majority of these applications use ambient seismic noise as a seismic source. This method involves reconstructing the impulse response, the so-called Green's function, between pair of receivers based on the wave field registered by them. Using seismic

* Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: czarny@min-pan.krakow.pl

interferometry with various data processing flows the registered coherent seismic waves by the receivers can be changed to virtual sources which are placed in the receiver locations. In the article, the physical derivation of the time-reversed acoustics experiment which was introduced by Derode et. al. (2003) is presented. This derivation also explains the seismic interferometry method. The laboratory experiment contained two phases. First, an acoustics signal was emitted into the medium with hundreds of scatterers (cube with liquid and rods) and registered on the opposite side of the medium. Then, registrations were reversed and emitted back. Finally, the wave field refocused exactly in the point of initial excitation. Derode et. al. explain these results using the cross-correlation technique, superposition and Rayleigh's reciprocity principles.

Keywords: seismic interferometry, Green's function, cross-correlation, time-reversed acoustics

Wprowadzenie

Interferometria sejsmiczna służy do badania zjawiska superpozycji dwóch sygnałów sejsmicznych w celu uzyskania informacji wynikających z różnic w ich zapisie (Curtis i in. 2006). W interferometrii sejsmicznej do badania różnic w zapisie pomiędzy parą zarejestrowanych sygnałów sejsmicznych wykorzystuje się operację korelacji wzajemnej lub operację konwolucji, przy czym w drugim przypadku zarejestrowany sygnał sejsmiczny wymaga odwrócenia osi czasu (Curtis i in. 2006). Od kilku lat metodyka została poszerzona o możliwość wykorzystywania operacji wielowymiarowej dekonwolucji (ang. *multidimensional deconvolution*) (Wapenaar i in. 2008).

Aktualnie metoda interferometrii sejsmicznej znajduje zastosowanie w wielu zagadnieniach m.in. obrazowania głębokich struktur ziemi (Schaeffer i Lebedev 2014) oraz utworów przypowierzchniowych (Nakata 2016), monitorowania procesów wulkanicznych (Breguier i in. 2016) oraz analizowania wpływu silnych trzęsień ziemi na obiekty budowlane (Nakata i Snieder 2014).

W pracy przedstawiono fizyczne zasady metody interferometrii sejsmicznej na podstawie doświadczenia „akustyki odwróconego czasu”. Fizyczne wytłumaczenie rezultatu eksperymentu zostało oparte na zasadzie niezmienniczości równania akustycznego pola falowego w niezmiennym się ośrodku, zasadzie superpozycji, zasadzie wzajemności Rayleigha oraz korelacji wzajemnej.

Praca ma charakter przeglądowy i została przygotowana na podstawie studium literatury krajowej i zagranicznej w ramach projektu LOFRES.

1. Rys historyczny rozwoju metody interferometrii sejsmicznej

W sejsmologii i sejsmice poszukiwawczej termin „interferometria sejsmiczna” pojawił się w 2001 roku (Schuster 2001), lecz jej podstawy zostały opracowane dużo wcześniej. Za początek metody uznaje się, kiedy Claerbout (1968) przedstawił założenie dotyczące odtworzenia funkcji Greena bez konieczności używania zdeterminowanego sygnału źródła w czasie i przestrzeni. W ośrodku jednowymiarowym, jednorodnym, poziomo warstwowanym, ograniczonym powierzchnią swobodną od góry i otwartą półprzestrzenią od dołu, fala sejsmiczna płaska wygenerowana na powierzchni, odbita od poziomych warstw i odebrana na powierzchni może być uzyskana na drodze autokorelacji fali bezpośredniej propagującej

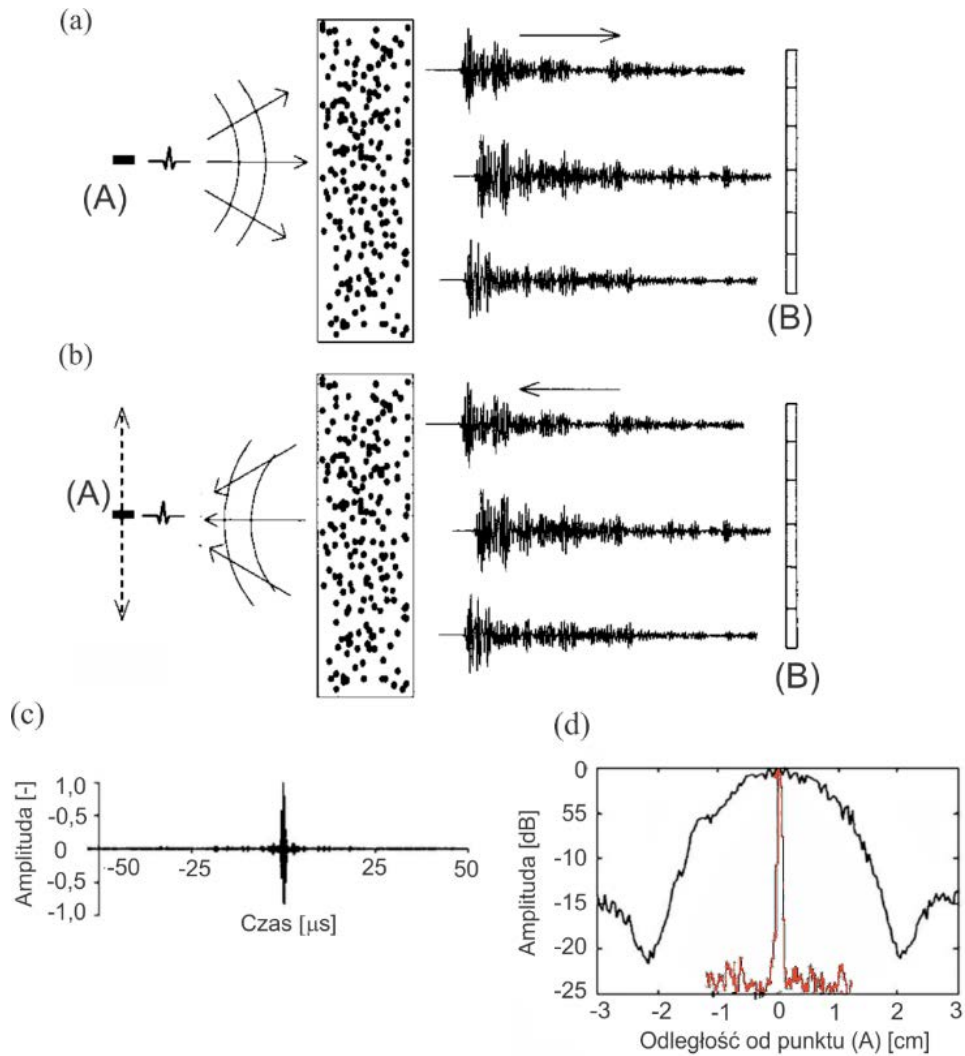
od półprzestrzeni w kierunku powierzchni. Odtworzenie odpowiedzi impulsowej ośrodka mogłoby, przy takim założeniu, odbywać się tylko poprzez korelację wzajemną sygnałów zarejestrowanych w punktach ośrodka. Dowody tego założenia przeprowadzono dopiero po 20 latach, korelując wzajemnie rejestracje przypadkowych fal akustycznych pochodzących od Słońca, co pozwoliło na otrzymanie informacji o jego budowie wewnętrznej (Duvall i in. 1993; Rickett i Claerbout 1999). Kolejne dowody potwierdzające możliwość odtworzenia funkcji Greena pomiędzy parą odbiorników za pomocą korelacji wzajemnej losowego pola falowego zarejestrowanego w tym samym czasie na tych odbiornikach zostały przedstawione dla fal ultradźwiękowych (Weaver i Lobkis 2001). Otrzymane rezultaty tłumaczono niejednorodnością ośrodka oraz niejednorodnością przestrzenną i czasową źródła.

Kolejne doświadczenie dla fal ultradźwiękowych zostało przeprowadzone przez Derode i in. (1995) (rys. 1). Polegało na odwróceniu w czasie zarejestrowanego sygnału akustycznego, który przeszedł przez silnie rozpraszający ośrodek (naczynie wypełnione cieczą i stalowymi prętami) (rys. 1a). Zarejestrowany sygnał został powtórnie wyemitowany do ośrodka oraz zarejestrowany w punkcie pierwotnej emisji (rys. 1b). W efekcie otrzymano sygnał przypominający sygnał początkowej emisji (rys. 1c). Eksperyment nie powiódł się w przypadku usunięcia stalowych prętów z ośrodka (rys. 1d). Fink (1997) nazwał ten efekt akustyką odwróconego czasu. Doświadczenie to zostało uzasadnione od strony fizycznej przez Derode i in. (2003). Pierwsze dowody matematyczne dla efektu interferencji fal akustycznych przedstawili Wapenaar (2004, 2003) oraz Snieder (2004). Z kolei van Manen i in. (2006) oraz Wapenaar i Fokkema (2006) rozszerzyli dowód dla fal sprężystych w ośrodku dwu- i trójwymiarowym. Matematyczne dowody opierały się na zasadzie wzajemności Rayleigha (Rayleigh 1896; Fokkema i van den Berg 1993).

Pierwsze zastosowanie oraz pierwsze użycie terminu interferometrii sejsmicznej zostało przedstawione przez Schustera (2001), który zademonstrował na sejsmicznych danych polowych możliwość dokładniejszego odwzorowania fal odbitych techniką korelacji wzajemnej, porównując rezultaty do wyników standardowej procedury migracji przed składaniem. Badania dotyczyły wykorzystania źródeł aktywnych, jak w przypadku klasycznych metod sejsmiki poszukiwawczej. Metodę opisano szerzej w pracy Schustera i in. (2004).

Campillo i Paul (2003) po raz pierwszy wykorzystali metodę interferometrii sejsmicznej w sejsmologii, odtwarzając za jej pomocą falę powierzchniową z zapisów wstrząsów. Z kolei pierwsze zastosowanie z wykorzystaniem niskoczęstotliwościowego szumu sejsmicznego zostało przedstawione również w sejsmologii przez Shapiro i in. (2005) do obrazowania głębokich struktur Ziemi.

W Polsce pierwsze zastosowanie metody interferometrii sejsmicznej w zagadnieniach sejsmiki inżynierskiej było związane z realizacją projektu LOFRES (Marczak i in. 2014b; Isakow i in. 2014; Pilecki i Isakow 2014). Opracowano algorytmy pozwalające na przeprowadzenie kilku eksperymentów. Wykonano badania na obszarach górniczych kopalń węgla kamiennego i rud miedzi, które dostarczyły informacji o budowie i właściwości ośrodka geologicznego naruszonego procesami osiadania nad rejonami eksploatacji (Marczak i in. 2014a; Isakow i in. 2015; Czarny i in. 2016). Przeprowadzono również badania na aktywnym osuwisku, uzyskując interesujące informacje o rozwoju procesów osuwiskowych (Harba i Pilecki 2017).



Rys. 1. Schemat eksperymentu laboratoryjnego przedstawiającego efekt akustyki odwróconego czasu – na podstawie Derode i in. (1995) oraz Finka (2006, 1997)
 (a) impuls akustyczny wyemitowany w punkcie A przechodzi przez ośrodek rozpraszający i zostaje zapisany przez piezoelektryczne odbiorniki w miejscu B; (b) zarejestrowane akustyczne pole falowe w punkcie B zostaje odwrócone w czasie i wyemitowane z powrotem w kierunku punktu A; (c) zarejestrowane pole falowe w punkcie emisji początkowej (punkt A); (d) porównanie wartości bezwzględnych amplitud zarejestrowanych w punkcie emisji A w przypadku ośrodka ze stalowymi prętami (ośrodek rozpraszający) (czerwona linia) oraz ośrodka pozbawionego stalowych prętów (czarna linia)

Fig. 1. Time-reversed acoustics experiment
 (a) Acoustic impulse was emitted at A and recorded in B (b) Recorded signals were reversed and emitted back to A; (c) Recorded signal at A; (d) Comparison between signal recorded using scattering medium (red curve) and without (black curve)

2. Fizyczne podstawy metody interferometrii

Derode i in. (2003) interpretując rezultat doświadczenia akustyki odwróconego czasu (rys. 1), przedstawili fizyczne uzasadnienie możliwości uzyskania funkcji Greena pomiędzy parą czujników poprzez korelację wzajemną pól falowych zarejestrowanych przez te czujniki w tym samym czasie. W tym celu posłużyli się schematem zaprezentowanym na rysunku 2. Zgodnie z ich rozważaniem, wewnątrz niejednorodnego i bezstratnego ośrodka, z licznymi punktami rozpraszającymi (rys. 2a) zbliżonego do ośrodka przedstawionego na rysunku 1, umieszczone zostały dwa punkty: x_A i x_B (rys. 2a). Źródło w punkcie x_A wygenerowało akustyczne pole falowe w czasie $t = 0$, które zostało zarejestrowane we wszystkich punktach x znajdujących się na obwodzie S (rys. 2b). Odpowiedź impulsową w dowolnym punkcie x na obwodzie S można zapisać jako $G(x, x_A, t)$. Następnie, symulując doświadczenie akustyki odwróconego czasu, odwrócona została oś czasu dla każdej odpowiedzi impulsowej we wszystkich punktach x na obwodzie S i wyemitowana ponownie do ośrodka jako funkcja Greena z ujemnym czasem $G(x, x_A, -t)$ (rys. 2c). Z zasady superpozycji wynika, że w dowolnym punkcie x' znajdującym się wewnątrz obszaru S (rys. 2c) pole falowe $u(x', t)$ może być zapisane jako operacja konwolucji:

$$u(x', t) \sim \int_S G(x', x, t) * G(x, x_A, -t) d^2x \quad (1)$$

gdzie: \sim oznacza proporcjonalność, $*$ oznacza operator splotu pomiędzy odpowiedzią impulsową źródła w punkcie x w jego odwróconej w czasie wersji $G(x, x_A, -t)$, a odpowiedzią impulsową $G(x', x_A, t)$ na drodze od źródła (rys. 2c) w punkcie x na granicy ośrodka do dowolnego odbiornika x' umieszczonego wewnątrz niejednorodnego ośrodka. Operacja całkowania po obwodzie S zapewnia uwzględnienie wszystkich źródeł x (rys. 2c).

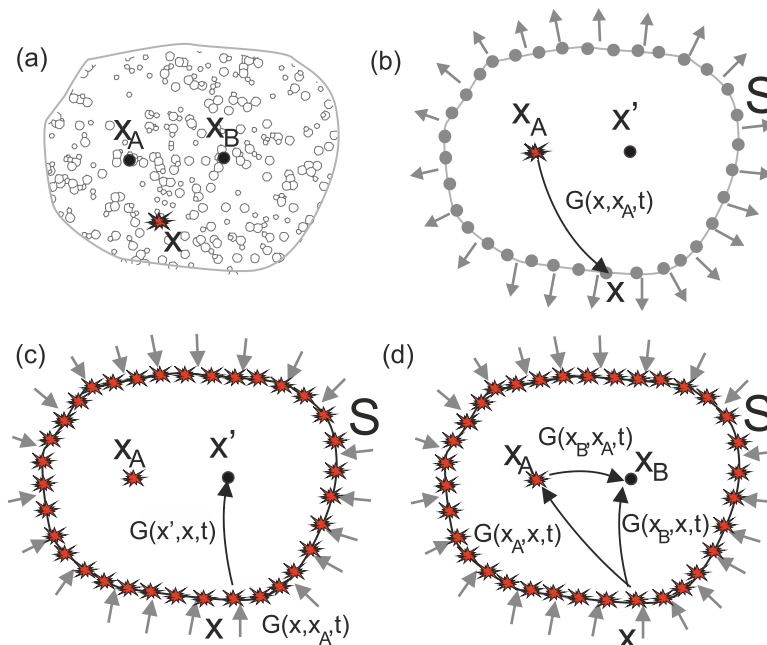
Z uwagi na niezmienniczość równania pola falowego w akustyce ośrodek, przez który propaguje odwrócone w czasie akustyczne pole falowe, jest identyczny jak ośrodek, do którego to pole zostało wyemitowane. Wiadomo, że pole falowe $u(x', t)$ zostanie skupione w punkcie, jeżeli $x' = x_A$ w czasie $t = 0$. Efekt takiego skupienia pola falowego w punkcie źródła został zaobserwowany w doświadczeniu akustyki odwróconego czasu (rys. 1). W związku z tym zarejestrowane pole falowe w dowolnie zlokalizowanym punkcie x' wewnątrz niejednorodnego ośrodka będzie odpowiedzią impulsową ośrodka na zadane źródło w punkcie x_A , zwane wirtualnym źródłem. Pole falowe wygenerowane na obwodzie S , zarejestrowane w pierwszej kolejności w punktach x' , a następnie skupione w czasie $t = 0$ w punkcie x_A będzie polem falowym z ujemnym czasem. Pole falowe skupione w punkcie nie zanika, tylko jest powtórnie emitowane w kierunku x' w czasie dodatnim. W wyniku pole falowe będzie składało się zarówno z funkcji Greena czasu ujemnego, jak i dodatniego:

$$u(x', t) = G(x', x_A, t) + G(x', x_A, -t) \quad (2)$$

Podstawiając równanie (2) do lewej strony równania (1) oraz przypisując konkretną lokalizację punktowi x' w punkcie x_B (rys. 2d), jak również stosując zasadę wzajemności Rayleigha (Fokkema i van den Berg 1993) $G(x, x_A, t) = G(x_A, x, t)$ otrzymujemy:

$$G(x_B, x_A, t) + G(x_B, x_A, -t) \sim \int_S G(x_B, x, t) * G(x_A, x, -t) d^2x \quad (3)$$

Prawa strona równania przedstawia operację korelacji wzajemnej sygnału zarejestrowanego w punkcie x_A i punkcie x_B , uwzględniając wszystkie źródła z punktów x z obwodu S . Lewa strona jest superpozycją sygnału odebranego w punkcie x_B , kiedy źródło fali akustycznej znajduje się w punkcie x_A wraz z jego wersją odwróconą w czasie. Równanie 2 stanowi podstawiony wzór metody interferometrii sejsmicznej.



Rys. 2. Schemat opisujący fizyczną koncepcję doświadczenia akustyki odwróconego czasu (na podstawie Wapenaar i in. (2010b))

Fig. 2. Scheme of time-reversed acoustics experiment explanation

Podsumowanie

Fizyczne wytłumaczenie rezultatu doświadczenia akustyki odwróconego czasu zostało oparte na zasadzie niezmienniczości równania akustycznego pola falowego w niezmiennym się ośrodku, zasadzie superpozycji, zasadzie wzajemności Rayleigha oraz korelacji wzajemnej. Doświadczenie to przedstawione w 2003 roku i opisane w niniejszym arty-

kule przyczyniło się do dalszego, bardzo dynamicznego rozwoju metody interferometrii sejsmicznej.

Estymacja odpowiedzi impulsowej pomiędzy parą czujników bez wiedzy o czasie wzbudzenia i lokalizacji źródła fal sejsmicznych zwiększyła możliwości obrazowania i monitorowania ośrodka geologicznego. Aktualnie metoda interferometrii sejsmicznej znajduje coraz szersze zastosowanie w zagadnieniach m.in. obrazowania głębokich struktur ziemi oraz utworów przypowierzchniowych, monitorowania procesów wulkanicznych oraz analizowania wpływu silnych trzęsień ziemi na obiekty budowlane.

Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr PBS1/A2/12/2013 o akronimie LOFRES uzyskanego w ramach I Konkursu Programu Badań Stosowanych dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- Brenguier i in. 2016 – Brenguier, F., Kowalski, P., Ackerley, N., Nakata, N., Boué, P., Campillo, M., Larose, E., Rambaud, S., Pequegnat, C., Lecocq, T., Roux, P., Ferrazzini, V., Villeneuve, N., Shapiro, N.M. i Chaput, J. 2016. Toward 4D Noise-Based Seismic Probing of Volcanoes: Perspectives from a Large-N Experiment on Piton de la Fournaise Volcano. *Seismological Research Letters* 87(1), s. 15–25.
- Campillo, M. i Paul, A. 2003. Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science* 299(5606), s. 547–549, doi:10.1126/science.1078551.
- Claerbout, J.F. 1968. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. *Geophysics* 33(2), s. 264–269, doi:10.1190/1.1439927.
- Curtis i in. 2006 – Curtis, A., Gerstoft, P., Sato, H., Snieder, R. i Wapenaar, K. 2006. Seismic interferometry – turning noise into signal. *The Leading Edge* 25(9), s. 1082–1092, doi:10.1190/1.2349814.
- Czarny i in. 2016 – Czarny, R., Marcak, H., Nakata, N., Pilecki, Z. i Isakow, Z. 2016. Monitoring velocity changes caused by underground coal mining using seismic noise. *Pure and Applied Geophysics* 173(6), s. 1907–1916. <http://doi.org/10.1007/s00024-015-1234-3>.
- Derode i in. 1995 – Derode, A., Roux, P. i Fink, M. 1995. Robust acoustic time reversal with high-order multiple scattering. *Physical Review Letters* 75(23), s. 4206–4209, doi:10.1103/PhysRevLett.75.4206.
- Derode i in. 2003 – Derode, A., Larose, E., Tanter, M., de Rosny, J., Tourin, A., Campillo, M. i Fink, M. 2003. Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium (L). *The Journal of the Acoustical Society of America* 113(6), 2973–2976, doi:10.1121/1.1570436.
- Duvall i in. 1993 – Duvall, T.L., Jefferies, S.M., Harvey, J.W. i Pomerantz, M.A. 1993. Time-distance helioseismology. *Nature* 362(6419), s. 430–432, doi:10.1038/362430a0.
- Fink, M. 1997. Time-Reversed Acoustics. *Physics Today* 50(3), s. 34–40, doi:10.1109/58.710586.
- Fink, M. 2006. Time-reversal acoustics in complex environments. *Geophysics* 71(4), s. 151–164, doi:10.1190/1.2215356.
- Fokkema, J.T. i van den Berg, P.M. 1993. *Seismic applications of acoustic reciprocity*. Elsevier.
- Harba, P. i Pilecki, Z. 2017. Assessment of time-spatial changes of shear wave velocities of flysch formation prone to mass movements by seismic interferometry with the use of ambient noise. *Landslides* 14(3), s. 225–233, <http://doi.org/10.1007/s10346-016-0779-2>.
- Isakow i in. 2015 – Isakow, Z., Pilecki, Z. i Kubańska, A. red. 2015. *System LOFRES sejsmiki pasywnej z wykorzystaniem szumu sejsmicznego*. Katowice: Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG.
- Isakow i in. 2014 – Isakow, Z., Pilecki, Z. i Sierodzki, P. 2014. Nowoczesny system LOFRES niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej. *Przegląd Górniczy* 70(7), s. 92–96.
- van Manen i in. 2006 – van Manen, D., Curtis, A. i Robertsson, J.O.A. 2006. Interferometric modeling of wave propagation in inhomogeneous elastic media using time reversal and reciprocity. *Geophysics* 71(4), s. 47–60.
- Marcak i in. 2014a – Marcak, H., Pilecki, Z. i Czarny, R. 2014a. *Interferometria sejsmiczna w zagadnieniach górniczych*. Kraków: Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN.

- Marcak i in. 2014b – Marcak, H., Pilecki, Z., Isakow, Z. i Czarny, R. 2014b. Możliwości wykorzystania interferometrii sejsmicznej w górnictwie. *Przegląd Górniczy* 70(7), s. 74–83.
- Nakata, N. 2016. Near-surface S-wave velocities estimated from traffic-induced Love waves using seismic interferometry with double beamforming. *Interpretation* 4(4), SQ23–SQ31, doi:10.1190/INT-2016-0013.1.
- Nakata, N. i Snieder, R. 2014. Monitoring a Building Using Deconvolution Interferometry. II: Ambient-Vibration Analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 104, s. 204–213, doi:10.1785/0120130050.
- Pilecki, Z. i Isakow, Z. 2014. Projekt LOFRES–sejsmika pasywna LFS z wykorzystaniem szumu sejsmicznego. *Przegląd Górniczy* 70(7), s. 69–73.
- Rayleigh, J.W.S.B. 1896. *The theory of sound*. Macmillan.
- Rickett, J. i Claerbout, J. 1999. Acoustic daylight imaging via spectral factorization: helioseismology and reservoir monitoring. *The Leading Edge* 18(8), s. 957–960, doi:10.1190/1.1438420.
- Schaeffer, A.J. i Lebedev, S. 2014. Imaging the North American continent using waveform inversion of global and USArray data. *Earth and Planetary Science Letters* 402, s. 26–41.
- Schuster, G. 2001. Theory of daylight/interferometric imaging-tutorial. *63rd EAGE Conference and Exhibition*.
- Schuster i in. 2004 – Schuster, G.T., Yu, J., Sheng, J. i Rickett, J. 2004. Interferometric/daylight seismic imaging. *Geophysical Journal International* 157(2), s. 838–852, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02251.x.
- Shapiro i in. 2005 – Shapiro, N.M., Campillo, M., Stehly, L. i Ritzwoller, M.H. 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science* 307(5715), s. 1615–1618, doi:10.1126/science.1108339.
- Snieder, R. 2004. Extracting the Green’s function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review E* 69(4), 46610, doi:10.1103/PhysRevE.69.046610.
- Wapenaar, K. 2003. Synthesis of an inhomogeneous medium from its acoustic transmission response. *Geophysics* 68(5), s. 1756–1759, doi:10.1190/1.1620649.
- Wapenaar, K. 2004. Retrieving the elastodynamic Green’s function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation. *Physical Review Letters* 93(25), 254301. doi:10.1103/PhysRevLett.93.254301.
- Wapenaar, K. 2006. Green’s function retrieval by cross-correlation in case of one-sided illumination. *Geophysical Research Letters* 33(19), s. 1–6, doi:10.1029/2006GL027747.
- Wapenaar i in. 2008 – Wapenaar, K., Slob, E. i Snieder, R. 2008. Seismic and electromagnetic controlled-source interferometry in dissipative media. *Geophysical Prospecting* 56(3), 419–434, doi:10.1111/j.1365-2478.2007.00686.x.
- Wapenaar i in. 2010 – Wapenaar, K., Slob, E., Snieder, R. i Curtis, A. 2010. Tutorial on seismic interferometry: Part 2 – Underlying theory and new advances. *Geophysics* 75, 75A211–75A227, doi:10.1190/1.3463440.
- Weaver, R.L. i Lobkis, O.I. 2001. Ultrasonics without a source: thermal fluctuation correlations at MHz frequencies. *Physical Review Letters* 87(13), 134301, doi:10.1103/PhysRevLett.87.134301.