

Streszczenie

Rozwój wysokoczęstotliwościowych obserwacji Globalnego Systemu Nawigacji Satelitarnej (HR-GNSS) w ostatnich latach bez wątpienia jest imponujący. Począwszy od pierwszych prób opisu trzęsień ziemi z wykorzystaniem obserwacji GPS o częstotliwości próbkowania 1 Hz na przełomie XX i XXI wieku, przez wzrost częstości obserwacji (10 Hz i więcej), a także wypracowanie technik obliczeniowych dedykowanych HR-GNSS i włączanie do obliczeń kolejnych konstelacji systemów satelitarnych, po integrację HR-GNSS z technikami sejsmicznymi i szacowanie parametrów trzęsień ziemi. Ten ogrom badań w szczególności koncentrował się na średnich i wielkich naturalnych trzęsieniach ziemi, wykorzystując również przeróżne symulatory drgań. Jednak trzęsienia ziemi nie ograniczają się jedynie do tych o pochodzeniu naturalnym, lecz mogą być również indukowane, w tym powodowane działalnością człowieka, np. przez aktywność górniczą, której dotychczas nie poświęcono wiele miejsca w sejsmologii GNSS. Opisowi wibracji wywołanych płytkimi trzęsieniami antropogenicznymi o stosunkowo niskiej amplitudzie zarejestrowanych techniką HR-GNSS dedykowana jest niniejsza praca.

W pracy zaproponowano procedury wyznaczania szeregów czasowych przemieszczeń czy prędkości techniką HR-GNSS dostosowane trzęsień ziemi skutkujących małymi wibracjami, ze szczególnym uwzględnieniem wstrząsów antropogenicznych, zwłaszcza pochodzenia górniczego. Przetestowano różne wiodące podejścia do opracowania obserwacji wysokoczęstotliwościowych GNSS (metodę różnicową, metody bezwzględne precyzyjnego pozycjonowania czy wariometryczną), a także wpływ łączenia obserwacji GPS i Galileo. Analizy szeregów czasowych HR-GNSS przeprowadzono w odniesieniu do referencyjnych wartości zarejestrowanych przez sejsmometrię na pobliskich stacjach, jeśli takie były dostępne. Porównywano zarówno maksymalne wartości drgań, jak również korelacje pomiędzy szeregami czasowymi.

Jedną z głównych części badań dotyczyła tematyki dokładności wyznaczania szeregów czasowych HR-GNSS i jej poprawy poprzez wykorzystanie procedur zmniejszania szumów – filtru Butterwortha i analiz falkowych. Wykorzystanie filtracji Butterwortha potwierdziło, że jest możliwe odfiltrowanie szumu z szeregu czasowego, zwiększając tym samym dokładność szeregów czasowych HR-GNSS. Jednak metoda ta wymaga wykorzystania obserwacji ze zlokalizowanej w tym samym miejscu stacji sejsmicznej w celu oszacowania częstotliwości dominujących, aby przy filtracji nie usunąć sygnału zawierającego drgania. Aby uniknąć konieczności wykorzystywania danych ze stacji sejsmicznej, opracowano usprawnioną procedurę opartą na połączeniu analizy falkowej i testu rozstępu kwartylowego – MRA-IQR. Pozwala ona na redukcję szumu w szeregu czasowego HR-GNSS o kilkadziesiąt procent do poziomu 1-2 milimetrów, co jest poziomem wystarczającym dla opisu krótkotrwałych drgań wywołanych wstrząsem.

Przeprowadzono również eksperymentalne wyznaczenie tensora momentu sejsmicznego dla wstrząsów górniczych, w którym do rozwiązania włączono oprócz standardowo stosowanych danych sejsmicznych, również dane ze stacji HR-GNSS. Pokazano, że wykorzystanie obserwacji z różnych źródeł pozwala uzyskać wiarygodne parametry źródła, również dla tak małych i lokalnych drgań, jakie powodują wstrząsy

górnice. Ponadto stwierdzono, że gdy sieć sejsmiczna nie zapewnia odpowiedniego rozmieszczenia przestrzennego względem źródła wstrząsu, dane HR-GNSS mogą stać się istotne dla prawidłowego oszacowania parametrów trzęsienia.

Ponadto, w trakcie badań zweryfikowano możliwość wykrycia krótkotrwałych wstrząsów pochodzenia górnicego w szeregach czasowych HR-GNSS – zarówno poprzez analizę zmienności wartości odchylenia standardowego czy odchylenia przeciętnego, a także opracowanej procedury detekcji pierwszego ruchu przy pomocy testu statystycznego Fishera. Uzyskane wyniki wykazały zgodność pomiędzy określeniem pierwszej epoki pomiędzy danymi sejsmicznymi i HR-GNSS na poziomie 1 sekundy, co potwierdza zarówno skuteczność redukcji szumu jak i procedury detekcji.

Reasumując, przedstawione w niniejszej pracy badania rozszerzają dotychczasowe pole zainteresowania sejsmologii GNSS o wstrząsy antropogeniczne, w tym pochodzenia górnicego. Przedstawione procedury opracowania szeregów czasowych wysokoczęstotliwościowych obserwacji GNSS umożliwiają uzyskanie wiarygodnego zapisu drgań wywołanych przez wstrząsy o magnitudzie 3.4-4.0, zgodnego z sejsmogramami na poziomie 1-2 mm dla przemieszczeń i 5-10 mm/s dla prędkości.

Słowa kluczowe: wysokoczęstotliwościowe obserwacje GNSS, sejsmologia GNSS, trzęsienia ziemi o małej magnitudzie, wstrząsy górnice