



MAŁGORZATA WUTKE

TPA Sp. z o. o.
malgorzata.wutke@tpaqi.com

Charakterystyka technologii georadarowej i możliwe kierunki jej doskonalenia

W wielu kręgach technologii georadarową uznaje się za zagadnienie innowatorskie, a interpretację zbieranych danych za proces wciąż nie do końca kontrolowany, warto mieć świadomość, że pierwsze georadary sięgają już początku XX w. Prototypowe urządzenia niemieckich inżynierów znajdowały zastosowanie głównie do działań militarnych, a także eksploracji Księżyca. Pierwsze komercyjne georadary powstały natomiast w latach 70 XX wieku z inicjatywy amerykańskiej firmy GSSI. Ich sprzedaż rozpoczęła się trzy lata później. Kolejne dekady to powstawanie nowych firm i instytucji zajmujących się badaniem i wdrażaniem bezinwazyjnych, radarowych technologii rozpoznawania podłoża i obiektów [1],[2].

Obecnie obszar implementowania techniki georadarowej obejmuje między innymi: badania konstrukcji żelbetowych – płyt mostowych, budynków, tuneli, a także elementów drewnianych, obszarów występowania zanieczyszczeń, lokalizację rur i kabli, niewybuchów, analizę stanu nawierzchni drogowych i podtorza kolejowego, badania geofizyczne, w tym lodowców, poszukiwania archeologiczne, inspekcje otworów wiertniczych, badania medyczne, dochodzenia sądowe, badania planetarne, teledetekcję statków powietrznych i satelit i inne [1], [2].



Fot. 1. Pierwszy georadar montowany na Vanie do pomiarów drogowych, inicjatywa amerykańskiej firmy GSSI [20]

Stosunkowo krótka jest historia zastosowania GPR w badaniach infrastruktury budowlanej, zwłaszcza drogowej – sięga połowy lat 70 ubiegłego wieku, kiedy to amerykańska administracja drogowa (ang. *Federal Highway Administration*, FHWA) testowała użyteczność GPR do oceny stanu tuneli, a później także na obiektów mostowych. Pierwszy montowany na pojeździe GPR został opracowany z inicjatywy

FHWA w 1985 roku. We wczesnych latach 80 rozpoczęto też badania GPR w Kanadzie. Drugim terenem aktywności pod koniec lat 70 i na początku 80 była Skandynawia, gdzie testowano nadajniki sprzężone z ziemią (*ground - coupled*). Nie od razu odniesiono sukces, jednakże po testach przeprowadzonych w 1986 roku w Finlandii metoda georadarowa stała się rutynowym narzędziem badawczym wykorzystywanym przy budowie i rehabilitacji dróg, a później także jako narzędzie do kontrolowania jakości. Pod koniec lat 80 i 90 większość aplikacji infrastrukturalnych skupiała się na pomiarze grubości warstw, wykrywaniu pustek pod płytami betonowymi oraz lokalizacji pogarszających się obszarów nawierzchni na obiektach inżynierskich. Zaczęto także podejmować próby wykorzystywania georadaru jako narzędzia do określania głębokości stalowych kotew, lokalizacji obiektów podpowierzchniowych, detekcji złuszczeń asfaltu i delaminacji, przy czym największym sukcesem cieszył się jednak pomiar grubości warstw. Najmniej zadowolające okazywały się próby wykrywania pustek, spękań i złuszczenia asfaltu. Od tego czasu przeprowadzono szereg badań, koncentrując się na złożonych zagadnieniach [1].



Fot. 2. Georadar wieloantennyowy o częstotliwości krokowej – „3D” [19]

Obecnie mamy trzecią generację systemów GPR. Pierwsza generacja – analogowa – została wyparta w latach 80 przez cyfrową. Dziś na rynku dostępne są już systemy GPR 3D (fot. 2) z wieloma antenami, lepszymi procesorami i większymi możliwościami przechowywania danych, otwierające całą gamę nowych aplikacji do analizy struktur i ich właściwości w formacie 3D [1],[3].

Należy jednak pamiętać, że same urządzenia GPR to nie wszystko. Rozwój urządzeń GPR powinien być zintegrowany z edukacją prowadzącą do umiejętnego i użytecznego wykorzystywania danych [1].

Ograniczenia stosowania metody georadarowej

Przygotowując się do pomiarów georadarowych należy być świadomym kilku zasadniczych aspektów:

- 1) w celu zlokalizowania obiektu na falogramie georadarowym konieczny jest kontrast dielektryczny (różnica w stałych dielektrycznych) pomiędzy badanym ośrodkiem a elementem, który chce się zidentyfikować za pomocą georadaru;
- 2) ośrodki o dużej przenikalności dielektrycznej (mokra glina, słona woda, nasycony piasek, zbrojenie) tłumią sygnał GPR i stanowią barierę dla fal elektromagnetycznych nadawanych przez antenę;
- 3) głębokość penetracji georadaru wzrasta ze spadkiem częstotliwości anteny, mniejsza częstotliwość anteny implikuje jednak słabszą rozdzielczość otrzymanego obrazu;
- 4) możliwość zlokalizowania obiektu za pomocą georadaru jest zależna od rozmiaru tego obiektu i częstotliwości zastosowanej anteny – fale o wysokiej częstotliwości (długie) nie są w stanie zlokalizować małych obiektów;
- 5) w przypadku lokalizacji elementów znajdujących się w bliskim sąsiedztwie może nastąpić nakładanie się zarejestrowanych sygnałów i brak możliwości rozróżnienia pojedynczych ech od poszczególnych elementów; dodatkowo w małych, zamkniętych pomieszczeniach pomiary przy użyciu anten (zwłaszcza nieekranowanych) nie dają pożądanych rezultatów na skutek odbić fal elektromagnetycznych od stropów, ścian i innych elementów [5];
- 6) za pomocą georadaru nie można określić składu badanego elementu – możliwe jest tylko określenie, czy istnieje kontrast pomiędzy napotkanym celem a otaczającym go ośrodkiem; przy czym doświadczeni specjaliści nabywają z czasem umiejętności przeanalizowania składu badanego ośrodka;
- 7) przeszkody naziemne niekiedy uniemożliwiają prowadzenie urządzenia po powierzchni i zachowanie wymaganego styku, koniecznego do prawidłowego wykonania badania;
- 8) anteny częściej używane celem pomiarów drogowych – anteny sprzężone z powietrzem (*air-coupled*) – charakte-

ryzują się podatnością na zakłócenia radiowe nadawane ze stacji FM, TV, bazowych stacji telefonii komórkowych [4]; dodatkowo należy zachować szczególną ostrożność podczas pomiarów na obszarach, gdzie występują linie wysokiego napięcia – efektem dominującym na falogramie mogą okazać się wówczas zakłócenia od przewodów zlokalizowanych w pobliżu [5].

Badanie obiektów o podobnym kontraście dielektrycznym

Badanie georadarowe z powodzeniem wykorzystuje się do określenia grubości warstw badanego ośrodka i jest to jak najbardziej adekwatne zastosowanie. Zagadnienie staje się jednak nieco bardziej złożone, gdy stajemy przed zadaniem określenia grubości warstw o podobnej przenikalności dielektrycznej, jak np. poszczególne warstwy asfaltowe w pakiecie mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA). Poziome refleksy na profilu georadarowym (rys. 3) odpowiadające granicom poszczególnych warstw to amplitudy odbicia fal na granicach ośrodków. Amplituda odbicia jest zależna od współczynnika odbicia R wyrażanego wzorem [4]:

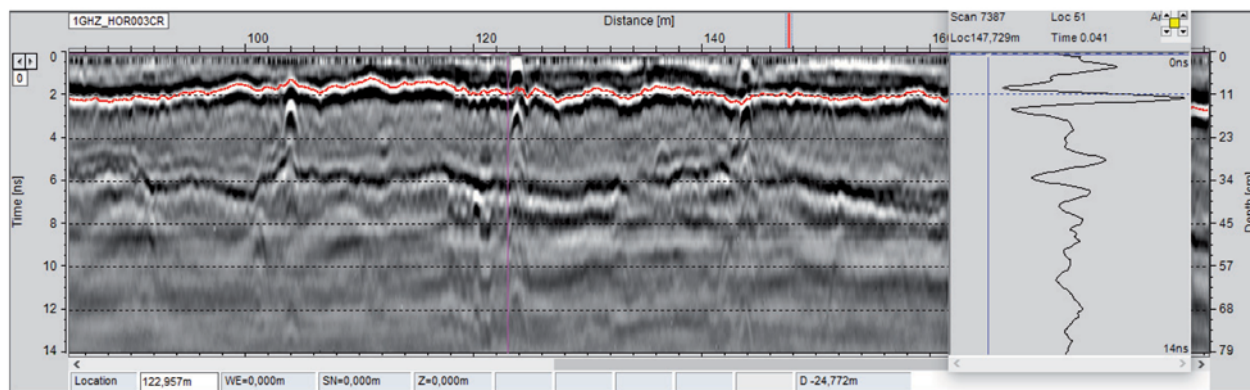
$$R = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}$$

w którym:

v_1 – prędkości fali w pierwszym ośrodku,

v_2 – prędkości fali w drugim ośrodku.

Konieczna jest zatem różnica w prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w poszczególnych ośrodkach, a ta jest wynikiem ich stałych dielektrycznych. Kontrast stałych dielektrycznych może być wywołany między innymi różną zawartością wolnych przestrzeni poszczególnych warstw, czy też rodzajem zastosowanego kruszywa. Stąd, gdy pakiet MMA składa się z warstw o podobnej zawartości wolnych przestrzeni i jednakowego kruszywa, niemożliwe jest zarejestrowanie amplitudy odbicia na granicy ośrodków, a tym samym określenie oddzielnej grubości każdego z nich. Jeśli natomiast ośrodki różnią się przenikalnością dielektryczną, z dużym prawdopodobieństwem grubość poszczególnych warstw pakietu może zostać określona (rys. 1).



Rys. 1. Profil georadarowy zarejestrowany podczas pomiarów nawierzchni drogowej anteną typu *air-coupled* o częstotliwości 1,0 GHz. Czerwoną linią zaznaczono wyraźną granicę w przenikalności dielektrycznej dwóch sąsiadujących ośrodków, interpretowaną jako granicę dwóch warstw zbudowanych z różnych materiałów

Mając na uwadze różnice w stałych dielektrycznych ośrodków badanych za pomocą georadaru, poszukiwane przedmioty, charakterystyki ośrodka, defekty podzielimy zatem na te, które można łatwo znaleźć, oraz te, które będą niekiedy całkowicie niemożliwe do zlokalizowania. Przedmioty, których współczynnik odbicia jest znacznie wyższy niż otaczającego medium są łatwiejsze do wykrycia, natomiast wręcz niemożliwa jest lokalizacja np. przewodów z tworzywa sztucznego przebiegających pod szczelnie rozmieszczoną siatką stalową zbrojeniową – pręt zbrojeniowy powoduje silną pozytywną amplitudę odbicia, natomiast PCV słabą, negatywną.

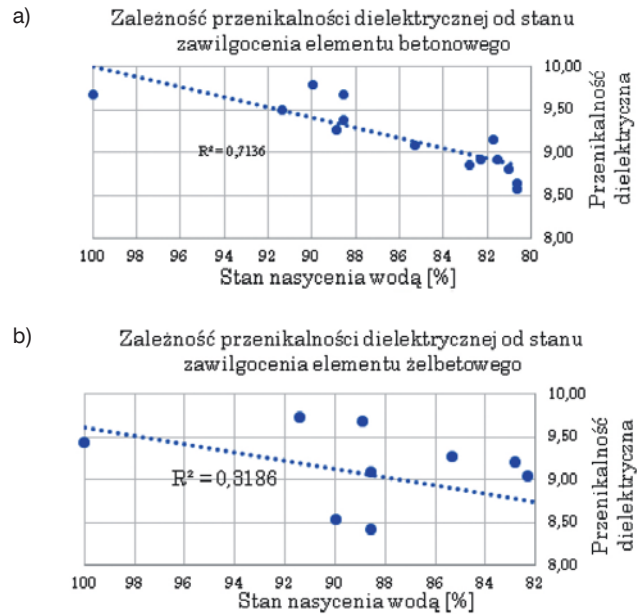
Badanie georadarowe w ośrodkach o dużej przenikalności dielektrycznej

W badaniach georadarowych najbardziej odbijającym materiałem z jakim spotyka się impuls georadarowy jest woda. Wilgotny beton, asfalt czy grunt może zatem być problematyczny do zbadania za pomocą metody georadarowej, ponieważ obecność wilgoci będzie spowalniać przechodzenie impulsu, przy czym obecność zastoiska wody będzie wręcz całkowicie go odbijać. Woda ogranicza penetrację oraz zmniejsza jakość otrzymywanych danych. Z drugiej strony, taka odpowiedź fal elektromagnetycznych na obecność wody umożliwia wykorzystanie ich do lokalizacji miejsc zawilgoconych w obiekcie.

Należy jednak mieć świadomość, że nie tylko wilgoć, ale i skład ośrodka (asfaltowego, betonowego, gruntowego...) ma kluczowe znaczenie w przypadku wartości właściwości ośrodka mierzonych za pomocą georadaru. Reflektory fal elektromagnetycznych, zwłaszcza, gdy jest ich dużo, powodują odbijanie, rozpraszanie i tłumienie sygnału radarowego oraz są przyczyną fluktuacji mierzonych właściwości dielektrycznych. Gdy zatem celem badania georadarowego jest lokalizacja miejsc zawilgoconych, na badanie najbardziej negatywnie wpływa obecność stali zbrojeniowej. Na rysunku nr 2 przedstawiono zależność przenikalności dielektrycznej od wilgotności elementu betonowego i żelbetowego pomierzonego za pomocą georadaru. W przypadku elementu żelbetowego zauważa się dużą fluktuację przenikalności dielektrycznej w zależności od wilgotności. Beton bez zbrojenia w 90% nasycony wodą na podstawie przeprowadzonego badania GPR ma stałą dielektryczną około 9,75, nasycony wodą w 89% – 9,25, 88,5% – 9,30, a więc wraz ze spadkiem wilgotności betonu maleje jego przenikalność dielektryczna (współczynnik dopasowania wynosi 0,7). Natomiast w przypadku betonu zbrojonego na podstawie badania GPR otrzymano współczynnik dopasowania wynosi już tylko 0,3. Dokładność prognozowania wilgotności obiektu zbrojonego za pomocą georadaru jest wobec tego bardzo mała.

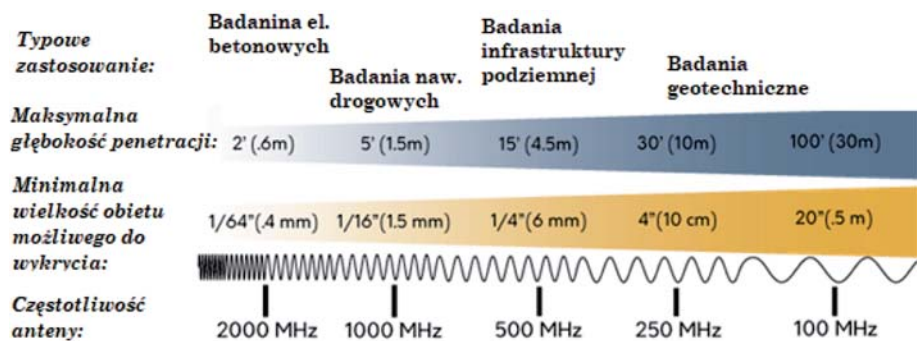
Głębokość penetracji

Zakres głębokości penetracji GPR jest ograniczony nie tylko przez wspomnianą stałą dielektryczną, ale i czę-



Rys. 2. Zależność przenikalności dielektrycznej elementu od jego stanu zawilgocenia [18]: a) element betonowy; b) element żelbetowy

stotliwość centralną anteny. Georadary zazwyczaj pracują w zakresie częstotliwości VHF-UHF (VHF, ang. *very high frequency*, fale metrowe o częstotliwości od 30 do 300 MHz, UHF, ang. *ultra high frequency*, fale decymetrowe o częstotliwości: od 300 do 3000 MHz). Niższe częstotliwości dają dużą głębokość penetracji (niestety skutkują rejestracją obrazu georadarowego o słabszej rozdzielczości). Do badań elementów betonowych – ścian tuneli, wiaduktów, płyt pomostowych; celem wykrywania pustek, spękań, lokalizacji zbrojenia używa się anten o częstotliwości 1 do 2 GHz (rozpoznanie na głębokości od 0,6 m przy zastosowaniu anteny 2,0 GHz do 1,5 m przy zastosowaniu anteny 1,0 GHz). Do lokalizacji elementów infrastruktury najczęściej stosowane są anteny o częstotliwości 0,25–0,5 GHz (rozpoznanie na głębokości od 4,5 m przy zastosowaniu anteny 0,5 GHz do 10 m przy zastosowaniu anteny 0,25 GHz). W badaniach archeologicznych najczęściej stosuje się anteny o częstotliwości 0,1 GHz (rozpoznanie do głębokości około 30 m) [5]. Głębokości penetracji w zależności zastosowanej anteny zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Głębokość penetracji w zależności od częstotliwości zastosowanej anteny georadarowej [5]

Rozmiar lokalizowanego obiektu

W metodzie georadarowej pionowa rozdzielczość jest ograniczona do przedmiotów o pionowej średnicy większej niż jedna czwarta długości fali obliczanej ze wzoru [4]:

$$h = \frac{\lambda}{4}$$

w którym:

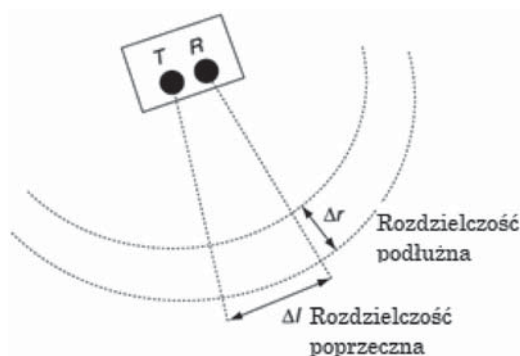
λ – długość fali zależna wprost proporcjonalnie od częstotliwości centralnej anteny i odwrotnie proporcjonalnie do prędkości fali w danym ośrodku.

Do lokalizacji mniejszych obiektów należy wobec tego stosować anteny o wyższych częstotliwościach. Na rysunku 3 przedstawiono szacunkową maksymalną wielkość elementu możliwą do wykrycia przez georadar przy zastosowaniu anteny określonej częstotliwości; i tak w przypadku anteny o częstotliwości 100 MHz jest to element o średnicy 50 cm, w przypadku anteny o częstotliwości 500 MHz – 0,6 cm, w przypadku anteny 1000 MHz – 0,15 cm [5].

Z teoretycznego punktu widzenia, poza zasięgiem detekcji za pomocą GPR okazuje się wykrycie spękań o szerokości mniejszej niż 0,15 cm na głębokości większej niż 1,5 m, czy też rur o średnicy mniejszej niż 0,5 m na głębokości większej niż 30 m. Należy mieć jednak na uwadze fakt, że wyniki przybliżonych kalkulacji na rysunku 5 oparte są o założenie rozchodzenia się fali w suchym ośrodku o niskiej przewodności, gdzie nie ma elementów hamujących penetrację.

Nakładanie się sygnałów od obiektów znajdujących się w bliskim sąsiedztwie

Mówiąc o możliwym stopniu informacji o geometrii lokalizowanego za pomocą georadaru obiektu, obok wspomianej już długości poziomej należy przeanalizować jeszcze długość poprzeczną.



Rys. 4. Rozdzielczość georadaru [3]

Rozdzielczość podłużną Δr i poprzeczną Δl zilustrowane na rysunku 4 wyraża się następująco [1][3]:

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4}, \quad \Delta l \geq \sqrt{\frac{vrW}{2}}$$

w których:

W – jest szerokością impulsu i dla anteny o określonej częstotliwości centralnej f_c wynosi $\frac{1}{f_c}$,

v – jest prędkością fali zależną od stałej dielektrycznej ϵ_r ośrodka penetracji, wyrażoną $\frac{c}{\epsilon_r}$ (c – prędkość światła),

r – jest odległością pomiędzy reflektorem a anteną.

Przykładowa kalkulacja rozdzielczości georadaru

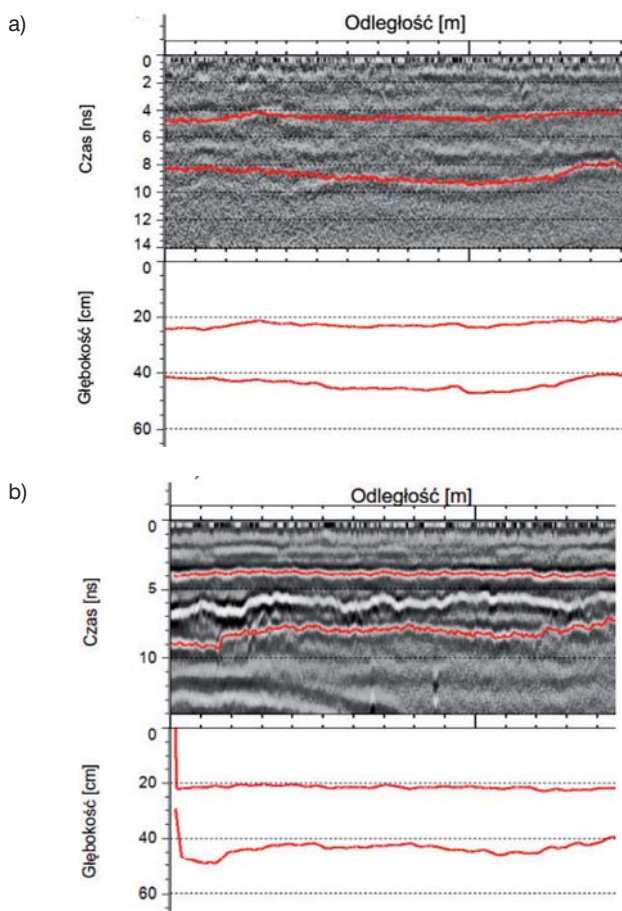
Założmy wykorzystanie anteny typu *ground-coupled* o częstotliwości 1,6 GHz i badanie elementu betonowego o stałej dielektrycznej równej 9. W wyniku obliczeń otrzymujemy wartość rozdzielczości podłużnej równą 2 cm, rozdzielczości poprzecznej dla elementu umieszczonego około 3 cm od anteny równą 4 cm. W przypadku anteny typu *air-coupled* o częstotliwości 1,0 GHz, przy dystansie pionowym pomiędzy anteną a reflektorem powiększonym o odległość anteny od powierzchni, a więc około 60 cm, otrzymujemy rozdzielczość poprzeczną 22 cm. Przy takich założeniach lokalizacja prętów w elemencie betonowym za pośrednictwem anteny 1,6 GHz anteną sprzężoną z gruntem możliwa jest tylko wtedy, gdy pręty są umieszczone w rozstawie większym niż 4 cm, a rzędy prętów są oddalone od siebie o więcej niż 2 cm. Stosując antenę sprzężoną z powietrzem o częstotliwości 1,0 GHz minimalny do rozróżnienia na falogramie rozstaw prętów to już równą 22 cm. W przeciwnym wypadku echa będą nachodzić na siebie i uniemożliwiać poprawną interpretację [1].

Stan powierzchni badanego elementu

Powierzchnia badanego elementu również może być czynnikiem ograniczającym penetrację. Obiekty, na których znajduje się warstwa filmu wodnego, natychmiast odbijają sygnał przed jego wnikiem w ośrodek. Ponadto, powierzchnie szorstkie i nierówne mogą wpływać na zdolność anteny do bezpośredniego łączenia się z powierzchnią, a tym samym na ograniczenia penetracji sygnału do badanego elementu betonu. Najlepsze wyniki skanowania otrzymuje się umieszczając georadar na gładkim, czystym obiekcie, którego wierzchnia powierzchnia jest sucha.

Zakłócenia pomiarów GPR wynikające z obecności innych nadajników radiowych

Anteny sprzężone z powietrzem (*air-coupled*) – charakteryzują się podatnością na zakłócenia radiowe (nadawane ze stacji FM, TV, bazowych stacji telefonii komórkowych)[4]. Interferencja sygnałów z obu urządzeń prowadzi do zakłóceń ograniczających czytelność skanów georadarowych, a niekiedy całkowicie ją uniemożliwia. Na rysunku 5 przedstawiono skany georadarowe wykonane w pobliżu nadajnika radiowego (a) oraz poza zasięgiem interferencji (b).



Rys. 5. Porównanie skanów z pomiarów georadarowych wykonanych anteną typu air-coupled o częstotliwości 1,0 GHz: a) w pobliżu nadajnika radiowego, b) poza zasięgiem interferencji georadaru z nadajnikiem radiowym

Podsumowanie

Mimo wspomnianych ograniczeń georadar jest wciąż najlepszą metodą rozpoznania obszaru podpowierzchniowego w sposób nienaruszający obecnego stanu obiektu – m.in. konstrukcji nawierzchni drogi, dającą niemal natychmiastowy rezultat. Trzecia generacja georadarów to nowoczesne urządzenia i studia nad interpretacją zbieranych danych. Środowiska zainteresowane techniką georadarową (COST Action TU1208 [6], Euro GPR [7]) mają za zadanie uczynić ją jeszcze bardziej efektywną i niezawodną. Z wykorzystaniem tej techniki osiąga się coraz lepsze rezultaty – analiza jakościowa profili georadarowych odnosi się do ilościowych wyników [8], do metodologii interpretacji badań wprowadza się procedury modelowania numerycznego [9], określa się właściwości ośrodka nie tylko na podstawie fali penetrującej, ale także fali bezpośredniej – przemieszczającej się prosto z nadajnika do odbiornika [10], testuje się możliwości budowania sieci neuronowych w odwzorowywaniach za pomocą GPR [11]. Stosuje się różne ustawienie anten podczas wykonywania pomiarów [12], a same anteny to coraz częściej anteny już nie impulsowe, a o częstotliwości krokowej, emitujące szereg fal sinusoidalnych o liniowo rosnącej częstotliwości, pozwalające na optymalizowanie częstotliwości do określonego problemu pomiarowego [13].

Georadary montuje się już nie tylko na samochodach, ale także na dronach [14] i helikopterach [15]. Dobrym podejściem jest także walidacja wyników otrzymanych podczas badania georadarowego rezultatami z pomiarów za pomocą innych urządzeń, np. działającymi w oparciu o fale dźwiękowe (ultradźwięki, Impact echo) [16],[17].

Rozumiejąc naukę leżącą u podstaw metodologii georadarowej i będąc świadomym jej ograniczeń, georadar uważa się za godne zaufania narzędzie do pozyskiwania informacji podpowierzchniowych, o szerokim zakresie zastosowań.

Bibliografia

- [1] M. Wutke, „Zastosowanie metody georadarowej w ocenie stanu elementów budowlanych infrastrukturalnych,” w *Nowoczesna diagnostyka i naprawy nawierzchni drogowych*, Kielce, 2018.
- [2] D. J. Daniels, *Ground Penetrating Radar 2nd Edition*, London: The Institution of Engineering and Technology, 2007.
- [3] H. M. Jol, *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Amsterdam: Elsevier Science, 2009.
- [4] R. Roberts, J. Feigin i R. Parrillo, „Mitigation of RF interference in air-launched 2 GHz GPR antennas,” w *Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar*, Lecce, Italy, 2010.
- [5] J. Karczewski i Ł. P. M. Ortyl, *Zarys metody georadarowej*, Kraków: AGH, 2011.
- [6] „Wikipedia,” 2018. [Online]. Available: https://pl.wikipedia.org/wiki/Profil_georadarowy.
- [7] M. Wutke, *Use of electromagnetic waves combined to resistivity measurement for the characterization of concrete*, Wrocław: Politechnika Wroclawska, 2015.
- [8] „usradar,” 2018. [Online]. Available: <http://www.usradar.com/about-ground-penetrating-radar-gpr/faq/>.
- [9] „Action TU1208,” 2018. [Online]. Available: <http://www.gpradar.eu/>.
- [10] „European GPR Association,” 2018. [Online]. Available: <http://www.eurogpr.org/>.
- [11] G. Klysz i J.-P. Balayssac, „Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar,” *Cement and Concrete Research*, 2007.
- [12] T. Gołębiowski, „Wprowadzenie do metodyki interpretacji badań georadarowych przy użyciu procedury modelowania numerycznego,” *Przegląd Geologiczny*, 2004.
- [13] S. Laurens, E. Barrak M., J.-P. Balayssac i J. Rhazi, „Aptitude of the near-field direct wave of ground-coupled radar antennas for the characterisation of the covercrete,” *Construction and Building Materials*, 2007.
- [14] E. Mazurkiewicz, R. Tadeusiewicz i S. Tomecka-Suchoń, „Application of Neural Network Enhanced Ground-Penetrating Radar to Localization of Burial Sites,” *Applied Artificial Intelligence*, 2016.
- [15] F. Tosti, L. Bianchini Ciampoli i A. S., „A comparative investigation of the effects of concrete sleepers on the GPR signal for the assessment of railway ballast,” w *17th International Conference on GPR*, Rapperswil, 2018.
- [16] G. Tronca, I. Tsalicoglou, S. Lehner i G. Catanzariti, „Comparison of pulsed and stepped frequency continuous wave (SFCW) GPR systems – Applications on,” w *17th International Conference on GPR*, Rapperswil, 2018.
- [17] S. Wu, „Vital sign feature detection method of trapped person by UAV-based UWB radar,” w *17th International Conference on GPR*, Rapperswil, 2018.
- [18] L. Langhammer, L. Rabenstein, H. R. Maurer i A. Bauder, „Development of a novel dual-polarization helicopter-borne GPR system,” w *17th International Conference on GPR*, Rapperswil, 2018.
- [19] A. Garbacz, T. Piotrowski, K. Załęgowski i G. Adamczewski, „UIR-skaner – mobilny, zintegrowany skaner do diagnostyki elementów betonowych za pomocą metod nieniszczących,” Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Warszawa, 2014.
- [20] M. Wutke i M. Konopska-Piechurska, „Nieniszczące metody diagnostyki w budownictwie,” w *Nowoczesna diagnostyka i naprawy nawierzchni drogowych*, Kielce, 2018.
- [21] „3d-radar,” 2018. [Online]. Available: <http://3d-radar.com>.
- [22] „GSSI,” 2018. [Online]. Available: <https://www.geophysical.com>.
- [23] M. Wutke, „Use of Ground Penetrating Radar measurement combined to resistivity measurement for characterization of the concrete moisture,” w *17th International Conference on GPR*, Rapperswil, 2018.