

Marian Sołtys*

OKREŚLANIE GŁĘBOKOŚCI ELEMENTÓW PODZIEMNYCH METODĄ GEORADAROWĄ**

1. Wstęp

Metoda radarowa w sposób bezinwazyjny dostarcza informacji o istnieniu, usytuowaniu i wzajemnym rozkładzie struktur i obiektów podpowierzchniowych. Jako technika pomiarowa jest realizowana poprzez wykorzystanie przyrządów nazywanych georadarami. Działanie georadaru polega na emisji i odbiorze impulsów elektromagnetycznych o określonej częstotliwości, które ulegają odbiciu na granicach penetrowanych ośrodków różniących się wartościami stałych dielektrycznych. Podstawowym i bezpośrednim efektem pomiaru jest radargram, który jest radarowym obrazem pionowego przekroju warstw podpowierzchniowych. Jest materiałem źródłowym, którego przetworzenie oraz interpretacja umożliwia przestrzenne ustalenie lokalizacji obiektów i struktur podpowierzchniowych.

W pracy podano zasadnicze elementy kształtujące zakres pomiaru głębokości georadarem z uwzględnieniem uwarunkowań obejmujących czynniki instrumentalne i wybrane parametry penetrowanego ośrodka. Przedstawiono geometryczne zasady określania głębokości obiektów oraz dokonano oceny dokładności przetworzonych radargramów.

2. Charakterystyka wybranych czynników kształtujących pomiar głębokości georadarem

Ustalenie metody i parametrów pomiaru w celu określania głębokości obiektów jest w istocie takie, jak dla celów przestrzennego (sytuacyjnego i głębokościowego) określania ich położenia.

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Zakład Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa

** Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH, umowa nr 11.11.150.312

Zasadnicze elementy postępowania powinny uwzględniać:

- zaprojektowanie właściwej siatki profilów, jej utrwalenie na obszarze pomiarów i dowiązanie do osnowy lub istniejących szczegółów;
- wybór rodzaju i częstotliwości anteny;
- ocenę właściwości dielektrycznych poszukiwanych elementów oraz otaczającego ośrodka (gruntu);
- właściwości tłumiące, wilgotność i niejednorodność gruntu;
- wybór zakresu pomiarów dotyczącego przewidywanej głębokości penetracji, ustalenie innych parametrów, jak: częstotliwość próbkowania, liczba próbek, liczba złożeń, liniowy interwał gromadzenia impulsów.

Profile pomiarowe do celów penetracji radarowej po powierzchni gruntu lub innych powierzchniach (np. podłogach w halach przemysłowych, ścianach, nawierzchniach dróg) są utrwalane na czas pomiaru jako grupy linii, zwykle równoległe i wzajemnie prostopadłe. Wzdłuż tych linii przesuwana jest antena urządzenia radarowego, a powstający wówczas obraz na ekranie komputera polowego (laptopa) nosi nazwę radagram.

W przypadku gdy celem penetracji radarowej jest lokalizacja obiektów wydłużonych, np. przewodów podziemnych i kierunek ułożenia tych przewodów jest w przybliżeniu znany, projektuje się zwykle profile wzajemnie równoległe i w przybliżeniu prostopadłe do przewodów. Jeśli brak informacji o kierunku ułożenia przewodów na badanym obszarze, wówczas na penetrowanej powierzchni projektuje się grupy profilów równoległych i przecinających się z innymi profilami pod różnym kątem, tworząc tzw. gwiazdę. Do wykrywania przewodów podziemnych preferowane są najczęściej anteny radarowe o częstotliwościach od 400 MHz do 500 MHz, rzadziej o częstotliwościach 250 MHz i 800 MHz.

W tabeli 1 zestawiono przybliżone wartości parametrów pomocnych do pomiarów radarowych przewodów podziemnych w odniesieniu do wymienionych wyżej częstotliwości anten [3]. Natomiast głębokość penetracji obiektów z wykorzystaniem różnych anten radarowych produkowanych przez firmę GSSI (USA) zestawiono w tabeli 2 [5].

Istotnym parametrem przy pomiarze głębokości jest wartość tzw. okna czasowego. Wartość ta wyrażona jest w jednostkach czasu i w znacznym stopniu kształtuje głębokościowy zasięg penetracji. W georadarach typu RAMAC/GPR jest funkcją częstotliwości próbkowania i liczby próbek. W tabeli 3 zestawiono wartości dla okna czasowego z uwzględnieniem częstotliwości anten i częstotliwości próbkowania [3].

Tabela 1. Wybrane parametry użytkowe i pomiarowe dla różnych częstotliwości anten

Częstotliwość anteny [MHz]	Rozmiar obiektu [m]	Przybliżony zakres głębokości* [m]	Zalecana częstotliwość próbkowania [MHz]	Zalecany odstęp między trasami [cm]
200	0,05÷0,5	1÷10	1600÷3500	3÷10
250	0,05÷0,5	1÷10	1600÷3500	3÷10
500	0,04	1÷5	4000÷7000	2÷5
800	0,02	0,4÷1	6500÷14000	2÷4

* w normalnym środowisku geologicznym, bez nisko przewodzących warstw

Tabela 2. Głębokości penetracji z wykorzystaniem anten firmy GSSI o różnych częstotliwościach i typowe zastosowania

Grupy anten	Typ anteny	Częstotliwość [MHz]	Maksymalna głębokość penetracji [m]	Typowe zastosowania
Anteny sprzężone nadawczo-odbiorcze, tzw. gruntowe	5100	1500	0,5	badania betonu
	3101D	900	1	badanie betonu, wykrywanie pustek
	5103	400	4	lokalizacja przewodów podziemnych, budownictwo, inżynieria środowiska, lokalizacja pustek
	5104	270	6	lokalizacja przewodów, geotechnika, budownictwo
	5106	200	7	geotechnika, inżynieria środowiska, budownictwo
	3207	100	20	geotechnika, inżynieria środowiska, górnictwo
	3200MLF	16÷80	25÷35	geotechnika
Powietrzne anteny ciągnięte przez samochód	4105	2200	do 0,75 m zależnie od rodzaju ośrodka	pomiar grubości i jakości nawierzchni dróg

Tabela 3. Wielkości dla okna czasowego z uwzględnieniem wybranych częstotliwości anten i częstotliwości próbkowania

Częstotliwość anteny [MHz]	Częstotliwość próbkowania [MHz]	Okno czasu [ns]
100	800÷1800	640÷280
200÷250	1600÷3500	320÷150
500	4000÷7000	130÷75
800	6500÷14000	80÷35
1000	25 000÷110 000	5÷20

Odległość między nadajnikiem i odbiornikiem jest jednoznaczna dla danego typu anten ekranowanych i jest wykorzystywana do przetworzenia czasu tzw. pierwszego wstąpienia na informację o głębokości.

Do innych parametrów kształtujących zakres pomiaru głębokości georadarem należą między innymi: prędkość fali w penetrowanym ośrodku, właściwości tłumiące i przewodność ośrodka.

3. Zasady i ocena określenia głębokości obiektu lokalizowanego georadarem

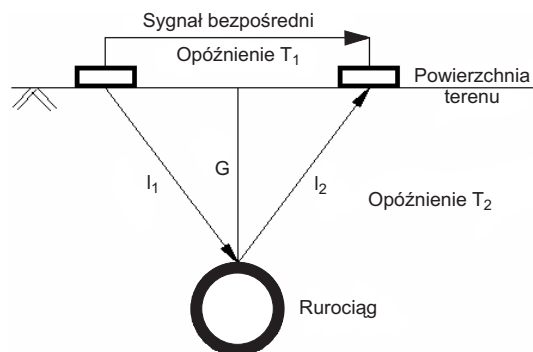
Głębokość G obiektu podpowierzchniowego może być określona wzorem przybliżonym

$$G = \frac{ct}{2\sqrt{\varepsilon}} \quad (1)$$

gdzie:

- $c = 3 \cdot 10^8$ m/s – prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w powietrzu (próżni),
- t – czas przebiegu fali od nadajnika do obiektu i z powrotem do odbiornika,
- ε – stała dielektryczna ośrodka nad lokalizowanym obiektem.

Inny sposób określenia głębokości G – bardziej ścisły niż według wzoru (1) – uwzględnia różnice opóźnień czasu rejestracji odpowiednich sygnałów w odbiorniku, typowych podczas pracy georadarem (rys. 1).



Rys. 1. Uproszczony schemat ilustrujący opóźnienia sygnałów

Sygnał emitowany w momencie T_0 przez nadajnik jest rejestrowany poprzez odbiornik po przejściu dwoma zasadniczo różnymi drogami. Pierwsza z nich obejmuje odcinek najkrótszy – w powietrzu. Tą drogą sygnał bezpośredni jest rejestrowany w odbiorniku w czasie T_1 , opóźnionym względem czasu T_0 . Druga droga sygnału z nadajnika (od momentu T_0) obejmuje odcinki l_1 i l_2 w penetrowanym ośrodku, czyli od nadajnika do obiektu i po odbiciu do odbiornika. Czas T_2 zarejestrowania sygnału po przejściu tych odcinków jest drugim opóźnieniem zarejestrowanym w odbiorniku względem czasu T_0 .

Uwzględniając oznaczenia na rysunku 1 oraz przyjmując, że trójkąty są prostokątne i przystające, otrzymamy:

$$T_1 = \frac{s}{c} \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{1}{v}(l_1 + l_2) \quad (3)$$

$$G^2 = l_1^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2 \quad (4)$$

$$G^2 = l_2^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2 \quad (5)$$

gdzie s jest odstępem (separacją) między antenami.

Ponieważ

$$l_1 = l_2 = \frac{v}{2} T_2 \quad (6)$$

więc ze wzorów (4) i (5) wynika

$$G = \frac{1}{2} (v^2 T_2^2 - s^2)^{1/2} \quad (7)$$

gdzie v jest prędkością rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w badanym gruncie.

Jeśli we wzorze (7) uwzględni się opóźnienia T_1 i T_2 wynikające z relacji

$$T_1 + T_2 = \frac{s}{c} + T_2,$$

wówczas otrzymamy wzór na głębokość G

$$G = \frac{1}{2} \left\{ v^2 \left[T_2 - \left(T_1 - \frac{s}{c} \right)^2 + s^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (8)$$

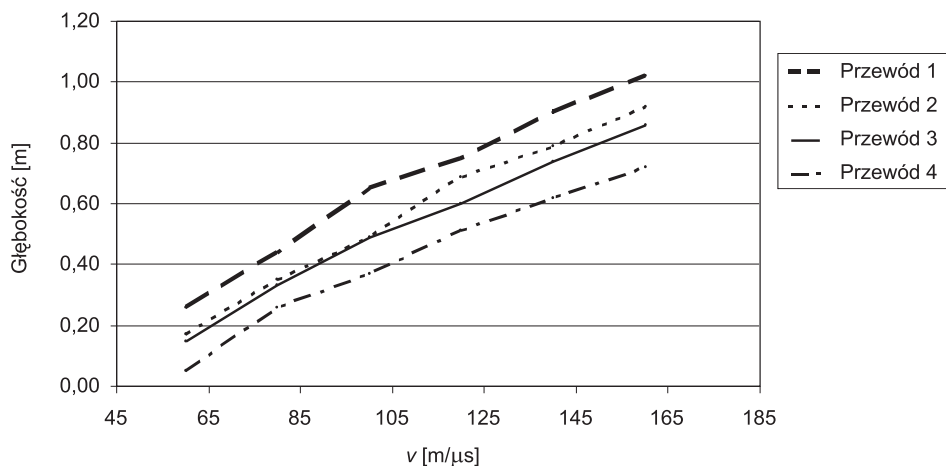
Jeżeli głębokość jest duża względem separacji s , na przykład podczas penetrowania głębokich struktur geologicznych, to wówczas można przyjąć, że $s \cong 0$ i wzór (8) przyjmie formę uproszczoną

$$G = (T_2 - T_1) \frac{v}{2} \quad (9)$$

Produkowane obecnie nowoczesne anteny ekranowane, umieszczone w jednej obudowie, mają niewielkie wartości separacji s . Na przykład separacja s dla anten stosowanych w lokalizacji przewodów podziemnych wynosi kilkanaście centymetrów.

Rejestracja czasów dojścia sygnałów odbitych w aktualnych systemach georadarowych jest automatyczna, bez możliwości ingerencji operatora przyrządu. Natomiast istotne jest, aby podczas opracowania radarogramu wybranym programem właściwie ustalać wartości tzw. pierwszego wstąpienia fali oraz wprowadzić prędkość v właściwą dla penetrowanego ośrodka. Wartość pierwszego wstąpienia w standardowym programie firmy Mała Geoscience [2] jest wyrażana liczbą próbek i odpowiada czasowi rejestracji bezpośredniego sygnału (por. rys. 1). W praktyce ustalenie wartości pierwszego wstąpienia oznacza ustalenie poziomu odniesienia, od którego określana jest głębokość obiektu.

Wprowadzenie niewłaściwej wartości v w sposób istotny zmienia skalę pionową radarogramów i powoduje znacząco błędne określenie głębokości lokalizowanego przewodu. Przykłady wpływu zmiany prędkości v rozchodzenia się fal elektromagnetycznych na wartości określanych głębokości kilku przewodów podziemnych ilustruje tabela 4 i wykresy na rysunku 2.



Rys. 2. Wpływ prędkości v na wartości określanych głębokości przewodów (wg tab. 4)

Wpływy zmian prędkości mogą być znacząco duże, na przykład: zmiana prędkości o 15% powoduje, że dla przewodu o głębokości 1 m określa się ją z błędem od 10% do 20%. Na przykład jeśli zamiast właściwej $v = 160$ m/ μ s wprowadzimy do programu błędną wartość $v = 80$ m/ μ s (w wyniku niepełnej informacji o rodzaju podłoża i jego wilgotności), to zamiast faktycznej głębokości wynoszącej 1,02 m, otrzymamy głębokość 0,44 m (tab. 4).

Tabela 4. Zestawienie głębokości [m] przewodów podziemnych uzyskanych z opracowanych radarogramów przy założeniu różnych prędkości v [m/ μ s] rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w penetrowanym podłożu

Rodzaj przewodu	$v = 60$	$v = 80$	$v = 100$	$v = 120$	$v = 140$	$v = 160$
przewód 1	0,26	0,44	0,65	0,75	0,90	1,02
przewód 2	0,17	0,35	0,49	0,69	0,79	0,92
przewód 3	0,15	0,33	0,49	0,60	0,74	0,86
przewód 4	0,05	0,26	0,37	0,51	0,62	0,72

Należy zaznaczyć, że na skuteczność określania głębokości wpływają także inne czynniki, z których najważniejsze to przewodność i właściwości tłumiące ośrodka. Duża przewodność ośrodka i silne właściwości tłumiące niektórych ośrodków znacznie ograniczają zasięg określania głębokości.

Dokładność wyznaczania głębokości jest także kształtowana przez dokładność odczytu jej wartości z radargramu. Różnice między seriami odczytów z radargramu dotyczącymi położenia sytuacyjnego i głębokości przewodów przedstawiono odpowiednio w tabelach 5 i 6. Różnice te otrzymano z przetworzonych radargramów na podstawie 80 odczytów rzędnych sytuacyjnych (rzędnych profilu) i głębokości dotyczących czterech rodzajów przewodów usytuowanych na głębokościach od 0,6 m do 1,0 m. Skala pozioma radargramów wynosiła 1:100, a pionowa 1:50.

Stwierdzono większe średnie błędy przy odczytywaniu rzędnej wzdłuż profilu w porównaniu z odpowiednimi błędami głębokości. Wynosiły one odpowiednio 3,9 cm oraz 2,2 cm, jako wartości przeciętne średnich błędów z tabel 5 i 6. Wynika to z różnych skal (poziomej i pionowej) radargramów. W przedstawionym przykładzie średni błąd przestrzennego określenia położenia wykazanych na radargramie przewodów wynosi $m = 4,5$ cm. Jest to błąd odczytu z radargramu. Podobne błędy odczytu z radargramu uzyskano przy określaniu położenia zakopanych płyt z PCV, betonu, drewna, żelaza, które były ułożone na głębokości około $0,7 \pm 0,8$ m.

Tabela 5. Różnice d między seriami odczytów rzędnych profilu z radargramu

Rodzaj przewodu	Różnice d [cm] między seriami					Średni błąd [cm]
	1	2	3	4	5	
przewód 1	3	3	3	3	6	3,8
przewód 2	3	0	3	6	0	3,3
przewód 3	3	3	0	3	1	2,4
przewód 4	6	8	0	6	6	5,8

Tabela 6. Różnice między seriami odczytów głębokości z radargramu

Rodzaj przewodu	Różnice odczytów [cm] między seriami					Średni błąd [cm]
	1	2	3	4	5	
przewód 1	2	1	3	0	0	1,7
przewód 2	0	1	6	5	1	3,5
przewód 3	2	1	1	4	3	2,4
przewód 4	1	1	0	0	1	0,8

4. Wnioski

1. Do zasadniczych czynników kształtujących zasięg głębokościowej penetracji ośrodka podpowierzchniowego georadarem należą: częstotliwość wykorzystanej anteny, rodzaj ośrodka, jego przewodność i właściwości tłumiące propagację fal elektromagnetycznych.

Zasięg głębokości przy wykorzystaniu anten o częstotliwościach od 200 MHz do 1000 MHz zmniejsza się od około 5 m do 0,5 m. Do lokalizacji sieci metalowych i niemetalowych przewodów podziemnych preferuje się wykorzystywanie georadarów z antenami o częstotliwościach 400 MHz i 500 MHz.

2. W procesie komputerowego opracowania radargramów i ich wykorzystania do określania głębokości penetrowanych obiektów w warstwach przypowierzchniowych (np. przewodów podziemnych) należy w sposób właściwy uwzględnić etapy filtrowania, dobór filtrów i ustalić poziom odniesienia na radargramie, od którego określana jest głębokość.
3. Na podstawie radargramów o skali poziomej i pionowej z zakresu od 1:100 do 1:50 uzyskano średni błąd odczytu położenia przestrzennego obiektów podpowierzchniowych o głębokości ok. 1 m wynoszący około ± 5 cm.

Literatura

- [1] Karczewski J., Ziętek J.: *Wykorzystanie metody georadarowej w geofizyce środowiska*. Warszawa, Publication of the Institute of Geophysics Polish Academy of Science, M27(352), 2002
- [2] Materiały i broszury firm: GSSI (USA), Mała Geoscience (Szwecja), Seabed (Polska), Zakładu Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa AGH
- [3] RAMAC/GPR. Operating Manual v.3.0, Szwecja, 2000
- [4] Sołtys M.: *Przetwarzanie wyników radarowych pomiarów obiektów podpowierzchniowych* (w druku)
- [5] www.geophysical.com