

Wprowadzenie do metodyki interpretacji badań georadarowych przy użyciu procedury modelowania numerycznego

Tomisław Gołębiowski*

Introduction to GPR surveys interpretation with procedure of numerical modelling. Prz. Geol., 52: 563–568.

Summary. The paper presents results of numerical modelling of the electromagnetic wave field in the ground based on the Finite Difference Time Domain Method (FDTD). Theoretical background of the electromagnetic wave field in the ground is presented. Techniques of building of the discrete model and the numerical simulation are described. Computer program REFLEX-W, used for modelling, is also briefly characterized. A sample measurement echogram for shallow georadar (GPR, ground penetrating radar) surveys is presented together with the synthetic one. Usefulness of the FDTD procedure in the interpretation of echograms is analysed and evaluated. The main goal of the paper is to introduce a reader into the procedure of numerical modelling, a modern method of the GPR surveys interpretation.

Key words: GPR measurements, numerical modelling

W artykule przedstawiono zastosowanie metody FDTD (Finite Difference Time Domain Method) — metoda różnic skończonych w domenie czasu, do modelowania elektromagnetycznego pola falowego w gruncie. Na świecie metoda ta znajduje zastosowanie m.in. w procesie interpretacji wyników pomiarów georadarowych (Bergmann i in., 1998; Carcione, 1996; Holliger, 2002; Roberts & Daniels, 1997).

Metoda modelowania numerycznego dla celów georadarowych nie była dotychczas stosowana w naszym kraju, więc dokładny opis procedury modelowania zawarty w artykule pozwoli na wprowadzenie nowego narzędzia do interpretacji pomiarów georadarowych. Na etapie interpretacji wyników badań geofizycznych współpracują ze sobą m.in. geofizycy, geolodzy, hydrogeolodzy, z tego też powodu głównym celem artykułu jest wprowadzenie w sposób przystępny czytelnika (nie zawsze geofizyka) do nowoczesnej metody wspomagającej interpretację badań geofizycznych jaką jest procedura modelowania numerycznego.

Odpowiednio dużo uwagi i miejsca w artykule poświęcono opisowi technologii budowy modelu numerycznego i sposobowi prowadzenia obliczeń, co z jednej strony w sposób dość przystępny pozwala zrozumieć samą technikę modelowania, a z drugiej pozwala na odpowiednie odniesienie wyników modelowania (które są zawsze pewną idealizacją rzeczywistości) i ich korelację z wynikami pomiarów.

W artykule pominięto dokładny opis aparatury pomiarowej, podstaw fizyczno-matematycznych metody georadarowej oraz techniki prowadzenia pomiarów georadarowych, a także sposobu ich przetwarzania, ponieważ zagadnienia te wykraczają poza główne założenie artykułu. Bliższe informacje na wyżej wymieniony temat można znaleźć m.in. w pracach: Karczewskiego (1997) i Annana (2001).

Przykładową analizę numeryczną przeprowadzono dla wybranego profilu georadarowego, który po przeprowadzeniu standardowego przetwarzania i interpretacji dał wieloznaczne wyniki. Przy dotychczas stosowanych metodach interpretacyjnych, echogram ten został odrzucony, ze względu na zbyt dużą niejednoznaczność interpretacji. Artykuł pokazuje, że nawet dla tak „słabych” wyników pomiarowych możemy próbować dokonywać ich inter-

pretacji z zastosowaniem procedury modelowania numerycznego.

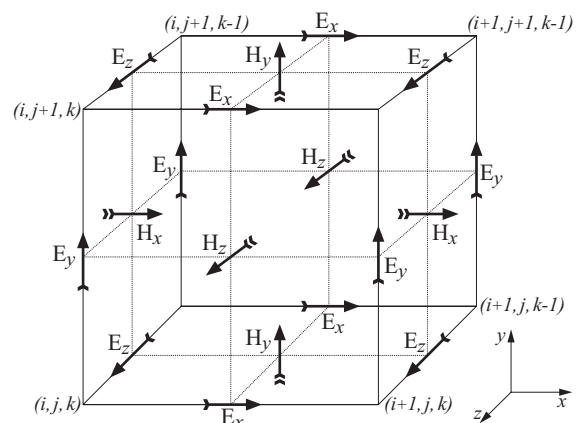
Wybrany jako przykład do modelowania profil pomiarowy jest wynikiem badań miejskiej infrastruktury podziemnej (rury, kable, kanały itp.) we Wrocławiu.

Podstawy teoretyczne numerycznego modelowania pola georadarowego

Matematyczny opis pól elektromagnetycznych jest oparty na funkcjach ciągłych. W celu rozwiązania zadania w sposób numeryczny należy przekształcić model ciągły w model dyskretny o parametrach skupionych. Wprowadzamy następującą notację: rozmiar oczek siatki Δx , Δy , Δz ; krok czasowy Δt ; numeracja węzłów siatki i , j , k ; rozmiar modelu $i \cdot \Delta x$, $j \cdot \Delta y$, $k \cdot \Delta z$.

Aby rozwiązać zagadnienie propagacji fal w modelu o skończonych rozmiarach i w skończonym czasie, dokonujemy dyskretyzacji przestrzennej z krokiem Δx , Δy , Δz oraz dyskretyzacji czasowej z krokiem Δt . W ten sposób otrzymujemy siatkę obliczeniową (ryc. 1), w węzłach której obliczamy wartości składowych pola elektromagnetycznego.

Analiza numeryczna elektromagnetycznego (e.m.) pola falowego wymaga rozwiązania równań Maxwella przy określonych warunkach brzegowych. Równania te



Ryc. 1. Oczko trójwymiarowej siatki obliczeniowej
Fig. 1. One cell of 3-dimensional grid

*Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; goleb@2-0.pl

opisują rozkład składowych pola falowego oraz ich zależność od rodzaju źródła. Ośrodek, w których przewodność $\sigma > 0$ jest ośrodkiem stratnym (Morawski & Gwarek, 1998). W ośrodkach stratnych i anizotropowych, jakimi są utwory geologiczne, równania Maxwella przybierają następującą postać (Bergmann i in., 1998; Carcione, 1996):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{M}_s$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

jeżeli:

$$\mathbf{D} = \varepsilon^* \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\mathbf{B} = \mu^* \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\mathbf{J} = \sigma^* \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}_s$$

to:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu^* \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} + \mathbf{M}_s$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma^* \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon^* \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mathbf{J}_s$$

gdzie:

∇ — operator nabra, \mathbf{E} — składowa elektryczna e.m. pola falowego, \mathbf{H} — składowa magnetyczna e.m. pola falowego, \mathbf{D} — indukcja elektryczna; \mathbf{B} — indukcja magnetyczna, \mathbf{J} — gęstość prądu w ośrodku; \mathbf{J}_s — gęstość prądu w źródle, \mathbf{M}_s — gęstość prądu magnetycznego, μ — przenikalność magnetyczna ośrodka, ε — stała dielektryczna ośrodka, σ — przewodność elektryczna ośrodka, t — czas.

Obliczenia numeryczne e.m. pola falowego mogą być wykonywane albo w domenie czasu lub w domenie częstotliwości. Najczęściej obecnie stosowaną metodą modelowania pola e.m. jest metoda FDTD (metoda różnic skończonych w domenie czasu), a algorytm numeryczny dla tej metody został opracowany przez Yee w 1966 r. (Yee, 1966). W metodzie tej różniczkowanie po zmiennych przestrzennych (x, y, z) i po czasie (t) w równaniach Maxwell'a aproksymowane jest różnicami skończonymi zgodnie z ogólnym schematem (dla dowolnej funkcji F):

$$\frac{\partial F}{\partial x} \rightarrow \frac{dF_{i-1/2,j}}{dx} \approx \frac{F_{i,j} - F_{i-1,j}}{\Delta x} \quad i \quad \frac{dF_{i+1/2,j}}{dx} \approx \frac{F_{i+1,j} - F_{i,j}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \rightarrow \frac{F_{i-1,j} - 2F_{i,j} + F_{i+1,j}}{(\Delta x)^2}$$

Analogicznie dokonujemy zamiany różniczek na różnice skończone dla pozostałych zmiennych tj. y, z i t . Zgodnie z powyższym, możemy obliczyć odpowiednie składowe pola e.m. w układzie 3D tj. $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$, dla dyskretnych wartości położenia i czasu. Pole elektryczne jest obliczane w krokach czasowych $n+1$, natomiast magnetyczne w $n+1/2$. Ze względu na obszerność opisu poniżej podano przykład wyliczenia składowej E_x pola e.m.:

$$E_x^{n+1}(i,j,k) = \frac{\varepsilon_x(i,j,k) - 0,5 \cdot \Delta t \cdot \sigma_x(i,j,k)}{\varepsilon_x(i,j,k) + 0,5 \cdot \Delta t \cdot \sigma_x(i,j,k)} \cdot E_x^n(i,j,k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_x(i,j,k) + 0,5 \cdot \Delta t \cdot \sigma_x(i,j,k)} \cdot \left[\frac{H_z^{n+0,5}(i,j+1,k) - H_z^{n+0,5}(i,j,k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+0,5}(i,j,k+1) - H_y^{n+0,5}(i,j,k)}{\Delta z} \right]$$

gdzie:

$E_x^{n+1}(i,j,k)$ — wartość składowej elektrycznej E_x e.m. pola falowego w węźle siatki obliczeniowej o współrzędnych i,j,k w $n+1$ kroku czasowym.

Analogicznie postępujemy dla wszystkich pozostałych składowych wektorów \mathbf{E} i \mathbf{H} .

Podczas obliczeń w domenie czasu wielkości $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ i Δt są ze sobą powiązane. Rozmiar oczka siatki obliczeniowej (Δl) musi być min. 10-krotnie mniejszy niż najmniejszej długości fali (λ) występującej w sygnale źródłowym. Najmniejszą długość fali (a co za tym idzie największą częstotliwość — f_{max}) sygnału należy odczytać z widma częstotliwościowego tego sygnału. Często dla uproszczenia używa się wzoru:

$$f_{max} = 3 \cdot f_s \quad \lambda = \frac{c}{f_{max} \cdot \sqrt{\varepsilon}} \quad \Delta l = \frac{\lambda}{10}$$

gdzie:

f_s — częstotliwość główna w sygnale źródłowym,
 c — prędkość światła.

Aby zachować zbieżność i stabilność rozwiązania numerycznego należy uwzględnić tzw. warunek Courant-Freidrich-Lewy (CFL):

$$\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} > c \cdot \Delta t = \Delta t \cdot \sqrt{\frac{1}{\mu \cdot \varepsilon}}$$

Na brzegu modelu obliczeniowego ustala się warunki brzegowe. W przypadku modelowania pól falowych przyjmuje się warunki typu ABC (*Absorbing Boundary Condition*) — powodują one tłumienie fali padającej na brzeg modelu (Kosloff & Kosloff, 1986; Mur, 1981). Wzrost przewodności brzegu modelu powoduje tłumienie fali elektromagnetycznej, zgodnie ze wzorem:

$$E(x,y,z,t) = E_0 \cdot e^{j(\omega t - \beta \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \cdot e^{-\alpha \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}$$

$$\alpha = \frac{\mu \sigma \nu}{2} \quad \alpha \approx \frac{1,7e3 \cdot \sigma}{\sqrt{\varepsilon}} [dB/m]$$

gdzie:

E — wartość amplitudy składowej elektrycznej e.m. pola falowego w punkcie x, y, z modelu w chwili t ; E_0 — wartość amplitudy w źródle; β — współczynnik fazy; α — współczynnik tłumienia; \mathbf{k} — wektor kierunku ruchu fali; \mathbf{r} — wektor od źródła do punktu x, y, z ; ν — prędkość fali elektromagnetycznej w gruncie wyznaczana ze wzoru:

$$\nu = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

gdzie:

ε_r — względna przenikalność elektryczna ośrodka.

W programie REFLEX-W, który użyto do modelowania, brzeg modelu jest określony jako obszar wzrostu przewodności od wartości zadanej w modelu do wartości maksymalnej σ_{max} . Wartość σ_{max} oraz szerokość obszaru tłumiącego są wyznaczane z poniższych zależności:

$$\sigma_{max} = A \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0$$

$$\sigma_i = \sigma + \frac{\sigma_{max} - \sigma}{B} \cdot i \quad \text{lub}$$

$$\sigma_i = \sigma \cdot \Delta e^{\left(\frac{i}{B} \ln\left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma}\right)\right)}$$

gdzie:

B — współczynnik określający szerokość brzegu modelu, o wartościach 50 lub 100 oczek siatki; A — współczynnik określający charakter zmian wartości σ w obszarze brzegowym, o wartościach: $B/50$ dla liniowej zmiany lub $B/20$ dla zmiany wykładniczej; ω — częstość drgań, σ_i — wartość przewodności elektrycznej w i -tym węźle wewnątrz obszaru tłumienia na brzegu modelu.

W modelu dyskretnym budowę geologiczną, niejednorodność i anizotropowość uzyskujemy poprzez przypisywanie różnych parametrów materiałowych:

ε_r [-] — względna przenikalność elektryczna ośrodka,

μ_r [-] — względna przenikalność magnetyczna ośrodka,

σ [S/m] — przewodność elektryczna ośrodka,

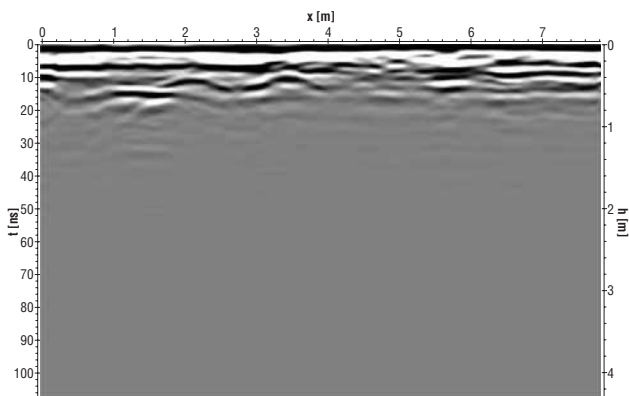
do odpowiednich oczek siatki obliczeniowej. Na górnym brzegu modelu wprowadza się warstwę o parametrach powietrza. Dla próżni wielkości powyższe mają określoną wartość:

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ [F/m]} \quad \mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ [H/m]} \quad \sigma = 0 \text{ [S/m]}$$

W ośrodku materialnym jakim jest górotwór wartości ε , μ , σ , określamy następująco:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad \mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad \sigma > 0$$

Źródło wymuszające propagację fali (źródło punktowe lub fala płaska), modelowane jest poprzez zaczepienie wektorów prądowych w określonych oczkach siatki, a ich zachowanie sterowane jest przez odpowiednią funkcję źródła np. sygnał sinusoidalny, sygnał Gaussa, sygnał Rickerera, sygnał Blackmana-Harrisa. Najbardziej zaawansowaną techniką budowy źródła wymuszającego propagację fali jest budowa dodatkowej gęstej siatki obliczeniowej



Ryc. 2. Echogram pomiarowy po przetworzeniu
Fig. 2. Real echogram after processing

tw. *sub-grid* i skonstruowanie w niej odpowiedniego źródła wielowektorowego symulującego rzeczywistą radiację energii z anteny — tzw. *radiation pattern* (Carcione, 1998). W programie REFLEX-W dysponujemy kilkoma typami źródeł fal e.m.: źródło punktowe, fala płaska, *exploding reflector*. Rozwiązanie numeryczne dla źródła typu *exploding reflector* jest oparte na zasadzie Huygensa i w uproszczeniu polega na przeniesieniu odpowiednio przeliczonego źródła na granicę odbijającą i modelowanie propagacji fali od momentu jej odbicia. Dokładny opis tego typu źródła można znaleźć m.in. w pracy Carcione i in. (2002).

Przykładowy echogram pomiarowy

Jak wspomniano we wstępie do przetestowania zaproponowanej technologii modelowania numerycznego wybrano „słaby” echogram pomiarowy, który został odrzucony w procesie interpretacji badań georadarowych. Badania te przeprowadzono we Wrocławiu w celu inwentaryzacji podziemnych kabli, rur i kanałów pod chodnikiem i jezdnią.

Pomiary wykonano aparaturą RAMAC szwedzkiej firmy MALA GeoScience. W badaniach używano anteny ekranowanej 500MHz. Biorąc pod uwagę wysoką częstotliwość sygnałów wysyłanych z tej anteny oraz średnią wartość prędkości dla badanego ośrodka ($v_{sr}=0,08$ m/ns) można próbować lokalizować ciała anomalne o rozmiarach kilkunastu centymetrów do głębokości kilku metrów. Ze względu na występowanie utworów ilasto-gliniastych w badanym rejonie należy spodziewać się dużego tłumienia w ośrodku.

Na echogramie odległość między trasami wynosi 0,04 m, sygnał został spróbkowany z krokiem 0,2ns, i zastosowano 16-krotne składanie. Po przeprowadzeniu wstępnego przetwarzania z użyciem procedur (REFLEX-W Manual, 2003):

usunięcie przesunięć tras	usunięcie ringingu
usunięcie dudnień	wygładzenie medianowe
dobór wzmocnień	użycie funkcji kroskorelacji
przesunięcie czasowe 0	korekcja faz

wyznaczono z echogramu prawdopodobne położenie kanałów, kabli i rur. Wstępna analiza echogramu pozwoliła na budowę modelu numerycznego, który następnie użyto w procesie interpretacji.

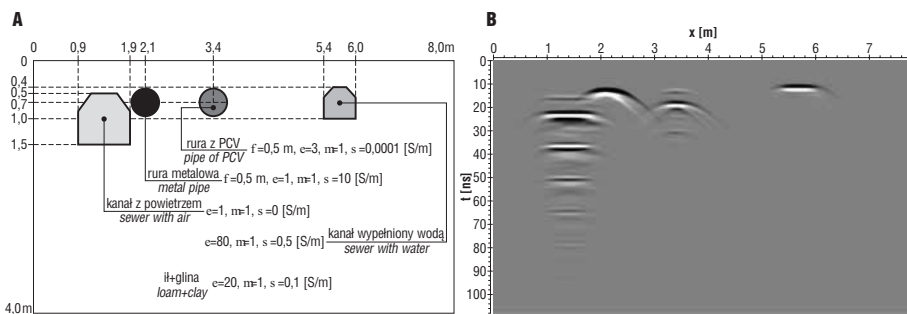
Wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych

Wyniki modelowania numerycznego prezentowane w artykule uzyskano przy użyciu programu REFLEX-W niemieckiej firmy Sandmeier-Geo.

Pakiet oprogramowania REFLEX-W, pozwala na przetwarzanie danych georadarowych i sejsmicznych, prowadzenie analiz CMP, interpretację 3D danych georadarowych i sejsmicznych, modelowanie numeryczne przy pomocy metody FDTD oraz na analizę danych tomograficznych i refrakcyjnych (REFLEX-W Manual, 2003). Moduł do symulacji numerycznych pozwala na modelowanie pola w układzie dwu- i trójwymiarowym, z uwzględnieniem w analizach numerycznych anizotropii i niejednorodności modelowanego ośrodka. Program daje możliwość modelowania różnych pól falowych: elektromagnetycznego, sejsmicznego (wraz z polem fali SH) oraz

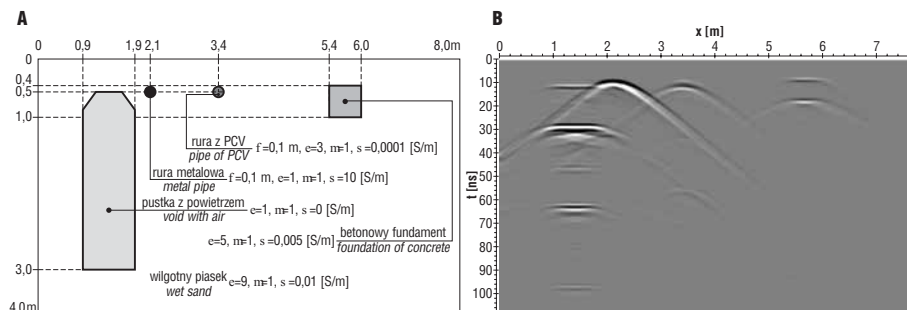
akustycznego. W analizowanym modelu można uwzględnić topografię, informacje otworowe oraz można umieścić w nim dowolną strukturę geologiczną i ciało anomalne o dowolnym kształcie. Program pozwala na obliczenie echogramów syntetycznych jak również obrazu propagacji fali w ośrodku (REFLEX-W Manual, 2003).

Przeprowadzone symulacje miały za zadanie pokazać możliwości narzędzi jakim jest modelowanie numeryczne w procesie interpretacji wyników georadarowych. Na przykładowym echogramie pomiarowym (ryc. 2) próbowano z pomocą modelowania numerycznego identyfikować rodzaj obiektów infrastruktury podziemnej oraz określić ich położenie i rozmiary.



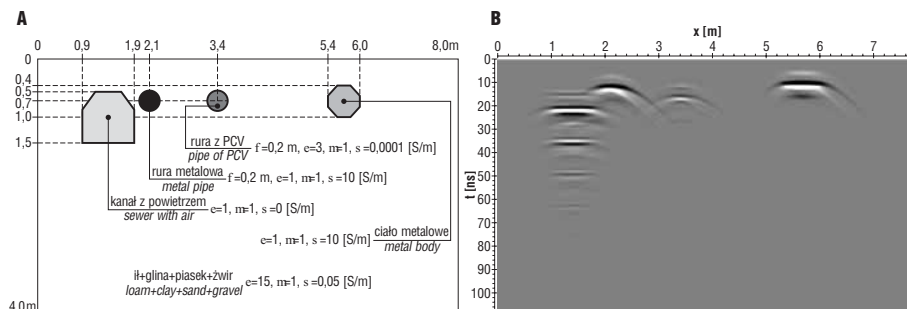
Ryc. 3. A — model testowy o parametrach gruntu ilasto-gliniastego, z ciałami anomalnymi, B — echogram syntetyczny dla modelu (A)

Fig. 3. A — numerical model of a loam and clay ground with anomaly bodies, B — synthetic echogram for the model (A)



Ryc. 4. A — model testowy o parametrach gruntu piaszczystego, z ciałami anomalnymi; B — echogram syntetyczny dla modelu (A)

Fig. 4. A — numerical model, wet sand ground with anomaly bodies, B — synthetic echogram for the model (A)



Ryc. 5. A — model testowy o parametrach gruntu będącego mieszaniną łu, gliny, piasku, żwiru, z ciałami anomalnymi, B — echogram syntetyczny otrzymany dla modelu (A)

Fig. 5. A — numerical model: loam, clays, and gravel ground with anomaly bodies, B — synthetic echogram for the model (A)

W czasie analiz numerycznych przeprowadzono kilkanaście symulacji dla wybranego profilu, dobierając odpowiednio geometrię modelu i stałe materiałowe. W symulacjach numerycznych badano wpływ różnych ciał anomalnych tj. rur, kabli i kanałów o różnych przekrojach i położeniu, aby określić ich obraz na echogramie syntetycznym.

Modelowanie było prowadzone w dwuwymiarowej tarczy obliczeniowej w układzie x-y (układ 2D). Do analizy przyjęto model o wymiarach $x = 8$ m (odpowiednio do długości profilu) oraz $y = 4$ m (odpowiednio do głębokości dla wyznaczonej prędkości średniej). Model został zdyskretyzowany siatką obliczeniową o oczkach kwadratowych, o wymiarze $\Delta x = \Delta y = 0,01$ m, zgodnie z zależnościami opisanymi w części teoretycznej. Górny brzeg modelu opisano jako warstwę powietrza o parametrach: $\epsilon_r=1$, $\mu_r=1$, $\sigma=0$ [S/m]. Na dolnym, lewym i prawym brzegu modelu przyjęto tłumiące warunki brzegowe — stref szerokości 50 oczek z liniowym wzrostem przewodności od wartości zadanej w modelu do σ_{max} .

W czasie symulacji testowych analizowano różne dostępne w programie typy źródeł fal elektromagnetycznych, opisane w części teoretycznej. W obliczeniach końcowych źródło fali e.m. (symulacja anteny nadawczej) było modelowane poprzez procedurę *exploding reflector*, która daje najlepsze wyniki dla zastosowanego układu pomiarowego. Parametry źródła dobrano tak, aby odpowiadały sygnałom wysyłanym przez antenę 500 MHz.

Opis właściwości gruntu oraz ciał anomalnych (rury, kable, kanały) przeprowadzono poprzez przypisanie do węzłów siatki odpowiednio dobranych stałych materiałowych ϵ_r , σ i μ_r . Dla wszystkich materiałów w modelu przyjęto stałą wartość $\mu_r=1$. Parametry materiałowe dla elementów stalowych — rury oraz kable elektryczne — przyjęto jako: $\epsilon_r=1$, $\sigma=10$ [S/m]. Na bazie informacji geologicznych określono, że utwory budujące przypowierzchniową warstwę gruntu to mieszanina łu, piasku gruboziarnistego, gliny i żwiru. Dla uwzględnienia wyraźnego przechodzenia jednych utworów w inne np. gliny w żwir, testowano w analizach numerycznych zmienne parametry materiałowe w odpowiednich częściach modelu lub stosowano gradientową zmianę tych wartości.

Wyznaczono krok czasowy do obliczeń $\Delta t=0,01\text{ns}$ — odpowiedni do częstotliwości, zgodnie z wcześniejszym opisem (warunek CFL), a obliczenia prowadzono w oknie czasowym $T=100\text{ns}$.

Na rycinach 3–5 przedstawiono kilka wybranych modeli testowych oraz model końcowy (ryc. 6) dla przedstawionego na ryc. 2 echogramu pomiarowego. Na końcu rozdziału zamieszczono wyniki symulacji dla modelu końcowego w postaci echogramu syntetycznego dla składowej E_y elektromagnetycznego pola falowego.

Analiza wyników symulacji numerycznych

W analizach numerycznych pomijamy modelowanie fal bezpośrednich tj. fali powietrznej i gruntowej, ponieważ fale te nie niosą informacji o obiektach podziemnych. Dodatkowo fale te skutecznie utrudniają interpretację płytko położonych ciał anomalnych.

Zastosowanie w badaniach anteny 500 MHz daje niewielką możliwość rejestracji niejednorodności w pasie przypowierzchniowym (ok. 0,5 m) — w asfalcie i podsypce żwirowej. Dla potwierdzenia zarejestrowanych w tym

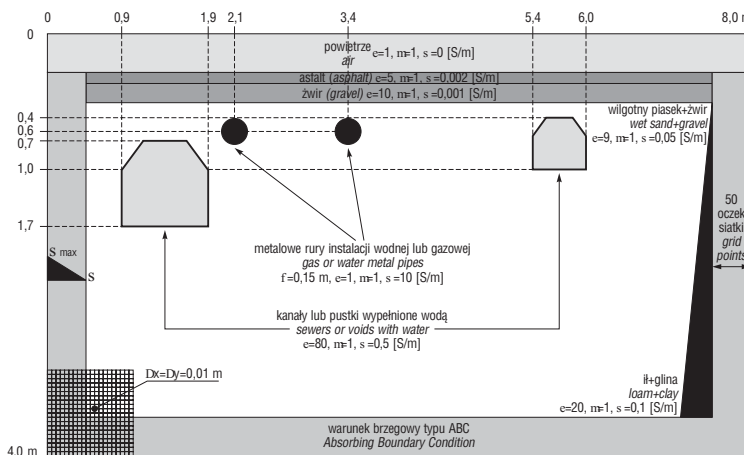
pasie niejednorodności należy przeprowadzić pomiary antenami wysokoczęstotliwościowymi np. 1GHz, co da możliwość interpretacji ilościowej i jakościowej.

Aby najlepiej dopasować parametry materiałowe modelu numerycznego do skąpych informacji geologicznych, testowano różne modele górotworu: wilgotny, zailony piasek (ryc. 4), ił i glina (ryc. 3), model o parametrach uśrednionych (ryc. 5), model z gradientową zmianą parametrów od zailonego piasku do mieszaniny iłu i gliny (ryc. 6). Badano także efekt od modeli warstwianych. Dobierano odpowiednio wartości materiałowe ośrodka w przedziale: $\epsilon_r = 6-20$, $\sigma = 0,001-0,1[\text{S/m}]$ aby nachylenie ramion hiperbol na echogramie syntetycznym było zgodne z echogramem pomiarowym. Wszystkie dodatkowe refleksy o małych amplitudach na echogramie pomiarowym są wynikiem niejednorodności ośrodka (np. wkładki żwirowe w piasku czy glinie), ale nie posiadając dokładnych informacji geologicznych nie można ich zamodelować.

Na echogramie pomiarowym widać silne tłumienie ośrodka ze względu na jego budowę (iły, gliny), a także zauważa się niewielki zasięg głębokościowy badań (do ok. 1 m) co wynika z silnego tłumienia fal wysokoczęstotliwościowych. Efekty te potwierdzają się na echogramach syntetycznych, co wskazuje na poprawny dobór parametrów materiałowych modelu.

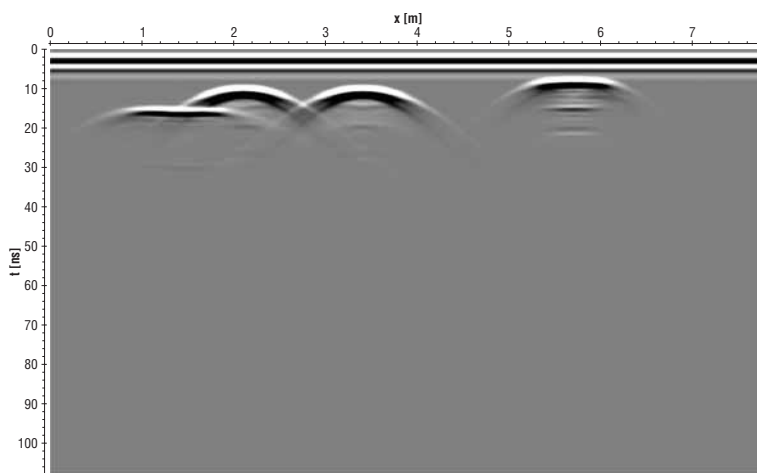
Aby dopasować kształt hiperboli w modelu do rzeczywistego kształtu z pomiarów zmieniało średnicę rur i testowano dwa materiały: stal i PCV. W wyniku okazało się, że nie ma znaczenia czy są to rury z wodą czy gazem lub czy jest to plik metalowych przewodów. Na kształt hiperboli i intensywność refleksów ma wpływ średnica i materiał (ryc. 3–5); w wyniku eksperymentów numerycznych ustalono, że są to dwie rury stalowe o średnicach rzędu 10–20 cm, położone w maksimum hiperbol tj. na $x = 2,1\text{ m}$ i $x = 3,4\text{ m}$.

Aby określić od jakiego typu ciała nastąpiło odbicie w lewej ($x = 0,9-1,9\text{ m}$) i prawej ($x = 5,4-6,0\text{ m}$) części echogramu pomiarowego sprawdzano w symulacjach efekty od: zakopanych obiektów stalowych (ryc. 5), fundamentów betonowych (ryc. 4), kanałów lub pustek wypełnionych powietrzem lub wodą (ryc. 3). Dobierano także optymalny kształt samych obiektów, aby generowany przez nie efekt był zbliżony do rzeczywistego. Na echogramie pomiarowym nie zauważa się dyfrakcji na kątach kanałów (pustek), więc prawdopodobnie mają one łamaną linię stropu. Nie są to także kanały z półokrągłym sklepieniem, ponieważ efekt na echogramie byłby podobny jak od rur. Ani na echogramie pomiarowym ani na syntetycznym nie można uchwycić dolnej granicy pustki, więc do modelowania przyjęto kształt kwadratowy o wysokości równej szerokości (znanej z echogramu pomiarowego). Aby nie pojawiała się dyfrakcja na rogach kwadratowych pustek, zastąpiono je linią łamaną (ryc. 6). Na granicy pustki (kanału z powietrzem) następuje kilkukrotny wzrost prędkości fali, a na



Ryc. 6. Model końcowy do obliczeń numerycznych dla echogramu pomiarowego (ryc.2)

Fig. 6. Final model for numerical simulation for a real echogram (Fig. 2)



Ryc. 7. Syntetyczny echogram dla modelu końcowego (ryc. 6) — składowa E_y elektromagnetycznego pola falowego

Fig. 7. Synthetic echogram for final model (Fig. 6) — E_y component of electromagnetic wave field

echogramie zmniejsza się w pustce częstotliwość impulsów i pojawia się efekt interferencji fal — widoczny na ryc. 3–5. Biorąc to pod uwagę przy analizie echogramu pomiarowego można domniemywać, że kanały (lub pustki) wypełnione są wodą.

Prawdopodobnie pomiędzy rurami jest jeszcze jeden obiekt, na co wskazuje poziomy pas silnych refleksów, lecz echogram pomiarowy daje zbyt mało informacji, aby taki obiekt zamodelować.

Zaproponowany model (ryc. 6) wydaje się najlepiej odzwierciedlać budowę ośrodka gruntowego oraz geometrię, położenie i rodzaj ciał anomalnych, zważając na bardzo ubogą informację geologiczną i słaby materiał pomiarowy.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano technologię wspomaganą interpretacji wyników georadarowych przy użyciu modelowania numerycznego. Jak widać na podstawie zamieszczonego przykładu, zastosowanie modelowania numerycznego może przyczynić się do łatwiejszej interpretacji wyników pomiarowych, zwłaszcza w przypadku „słabego” materiału pomiarowego. W przypadku, gdy po przeprowadzeniu przetwarzania echogramów nie uzyskamy zadawalających wyników, można próbować zastosować opisywaną metodę w procesie interpretacji. Metody symulacyjne dają najlepsze wyniki, gdy jesteśmy w stanie dokładnie opisać geometrię i parametry materiałowe modelu. W przypadku zastosowania modelowania numerycznego w interpretacji geofizycznej znaczącym utrudnieniem w stosowaniu modelowania jest niewielka ilość informacji o analizowanym ośrodku. Informacje te (zazwyczaj punktowe) pochodzą z otworów lub odsłoneń w miejscu prowadzenia pomiarów. W przypadku prowadzenia badań w rejonie o słabo rozpoznanej geologii i parametrach materiałowych ośrodka, modelowanie numeryczne sprowadza się do całej masy testów minimalizujących rozbieżność pomiędzy uzyskanym wynikiem pomiaru, a otrzymanym echogramem syntetycznym. W takim przypadku zazwyczaj przyjmuje się parametry materiałowe przybliżone (tabelaryczne), a wyniki takiej symulacji uwzględnia się w procesie interpretacji z dużą ostrożnością i jedynie w skali jakościowej. Zupełnie inaczej wygląda sytuacja w momencie posiadania bogatego materiału geologicznego oraz badań laboratoryjnych określających elektromagnetyczne parametry utworów budujących analizowany ośrodek. W takim przypadku symulacje numeryczne pozwalają na interpretację ilościową, a także można pokusić się o bardzo daleko posunięte wnioski interpretacyjne np. dokładne kształty i rozmiary ciał anomalnych, określenie

materiału z jakiego wykonany jest dany obiekt (stal, beton, tworzywo syntetyczne, drewno itp.).

Jako, że jest to pierwszy artykuł opisujący metodę modelowania numerycznego z zastosowaniem w procesie interpretacji danych georadarowych, autor skupił swoją uwagę na technologii modelowania i jednym przykładzie pomiarowym. Autor pracuje obecnie nad zastosowaniem modelowania numerycznego dla badań georadarowych w układzie 3D w ośrodkach niejednorodnych, anizotropowych z ograniczoną informacją geologiczną i stochastycznym rozkładem parametrów modelowanego ośrodka. W następnych artykułach zamieszczane będą wyniki zastosowania opisywanej metody w procesie interpretacji danych georadarowych dla coraz bardziej skomplikowanych sytuacji geologiczno-inżynierskich.

Autor pragnie podziękować mgr inż. J. Ziętkowi z Zakładu Geofizyki AGH za udostępnienie wyników pomiarów georadarowych, przeprowadzonych przez niego we Wrocławiu.

Praca została zrealizowana w ramach grantu KBN nr: 5 T12B 036 23

Literatura

- ANNAN A.P. 2001 — Ground Penetrating Radar. Workshop Notes, Sensor and Software Inc., Canada.
- BERGMANN T., ROBERTSSON J. & HOLLIGER K. 1998 — Finite difference modeling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media. *Geophysics*, 63: 856–867.
- CARCIONE J.M. 1996 — Ground Penetrating Radar: wave theory and numerical simulation in lossy, anisotropic media. *Geophysics*, 61: 1664–1677.
- CARCIONE J.M. 1998 — Radiation patterns for 2D GPR forward modelling. *Geophysics*, 63: 424–430.
- CARCIONE J.M., PINERO F.L. & ZAMPARO M. 2002 — Exploding reflector concept for Ground Penetrating Radar modeling. *Ann. Geoph.*, 45: 473–478.
- HOLLIGER K. 2002 — Finite difference modeling of Ground Penetrating Radar data. 9-th International Conference on Ground Penetrating Radar, Santa Barbara, California, USA.
- KARCZEWSKI J. 1997 — Zastosowanie metody georadarowej do wykrywania zaburzeń naturalnych i antropogenicznych w warstwach przypowierzchniowych. *Arch. Wydz. Geol. Geof. Och. Środ.*, AGH, Kraków.
- KOSLOFF R. & KOSLOFF D. 1986 — Absorbing boundaries for wave propagation problems. *Jour. Comput. Phys.*, 63: 363–376.
- MORAWSKI T. & GWAREK W. 1998 — Pola i fale elektromagnetyczne. WNT, Warszawa.
- MUR G. 1981 — Absorbing boundary condition for finite difference approximation of time domain electromagnetic field equations. *IEEE Trans. Electromag. Comput.*, 23: 1073–1077.
- REFLEX-W Manual 2003 — K.J. Sandmeier, Karlsruhe, Germany.
- ROBERTS R.L. & DANIELS J.J. 1997 — Modeling near-field GPR in three dimensions using FDTD method. *Geophysics*, 62: 1114–1126.
- YEE K.S. 1966 — Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 14: 302–307.