



Henryk MARCAK*, Sylwia TOMECKA-SUCHOŃ**

Zmiana fazy w falach elektromagnetycznych po przekroczeniu kąta Brewstera

Streszczenie: W pracach rolniczych istotne jest określenie rozkładu wilgotności w glebie. W artykule przedstawiono metodę badania tego rozkładu na podstawie analizy pomiarów georadarowych. Przedstawiono opis właściwości pola elektromagnetycznego na granicy dwóch obszarów o różnych właściwościach elektrycznych w zależności od wielkości kąta padania promienia radarowego. Okazuje się, że zachowanie pola elektromagnetycznego istotnie zależy od stosunku prędkości fali w warstwie nadległej i leżącej pod granicą odbijającą. W szczególności dla stosunku tych prędkości mniejszego od jedynki, to dla kąta zwanego kątem Brewstera zanika energia fali odbitej. W artykule zwrócono uwagę na istotną zależność wielkości współczynnika odbicia i zmiany fazy sygnałów elektromagnetycznych od tego, czy kąt padania przekroczył kąt Brewstera i kąt graniczny.

Po przekroczeniu kąta Brewstera następuje zmiana fazy w sygnale odbitym o 90 stopni. Znajomość kąta Brewstera pozwala wyznaczyć stosunek prędkości fali elektromagnetycznej po obydwu stronach granicy, na której nastąpiło odbicie. W praktyce badań georadarowych kąt Brewstera powstaje w sytuacji, kiedy warstwa nadległa jest bardziej nasycona wodą. Na przykładzie badań prowadzonych na polach uprawnych pokazano jak na podstawie zaproponowanego sposobu identyfikacji kąta Brewstera można określić zmiany właściwości elektrycznych na profilu pomiarowym. Zmiana fazy pola georadarowego może być wykorzystana do ciągłej kontroli wilgotności gruntu i optymalnego sposobu jego nawadniania.

Słowa kluczowe: metoda georadarowa, zawartość wody w glebie

Phase change between the reflected and refracted waves in GPR measurements of ground wave

Abstract: Information on moisture distribution in the soil is of great importance for agricultural projects. This article presents the GPR geophysical method for the study of water distribution in subsurface parts of rock formation. The analysis of the GPR measurements is used for a description of the electromagnetic field properties at the boundary of two areas of different electric properties, depending on the angle of incidence of radiation. It appears that the behavior of electromagnetic fields substantially depends on the ratio of the velocity waves in

* Prof. dr hab. inż., Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, hmarcak@igf.edu.pl

** Dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, tomecka@agh.edu.pl

layers overlying and underlying the reflective border. In particular, for the ratio smaller than the ones disappears energy of the reflected wave. The article highlights the significant dependence of the reflectance and phase change of the electromagnetic signals on whether the angle of incidence exceeds the Brewster angle and the critical angle. Attention was focused on the Brewster angle and the critical angle for the size of the reflectance and phase change of the electromagnetic signals.

In particular, after exceeding the Brewster angle a 90 degree change phase of the reflected signal occurs. Knowledge of this angle allows the ratio of GPR wave velocity in the neighboring soil regions to be determined. We demonstrate, on the example of tests carried out on cultivated areas, how the changes of dielectric properties on the investigated profile can be determined using the identification of the Brewster angle with the procedure proposed above. The phase change georadar field can be used for the continuous monitoring of soil moisture and its optimum method of irrigation.

Keywords: GPR, liquid contamination, water saturation of soil

Wprowadzenie

Postępujący rozwój rolnictwa nieuchronnie będzie związany z wykorzystywaniem osiągnięć wielu nauk, w tym także geofizyki stosowanej. Związane jest to przede wszystkim z coraz częstszymi okresami suszy i z postępującą dewastacją środowiska. Nie bez znaczenia pozostaje też stosowanie sprzętu o dużych gabarytach, ułatwiającego prace rolnika i jednocześnie wywierającego destrukcyjny wpływ na strukturę gleby. Stąd niezbędna staje się znajomość rozkładu przestrzennego wody w glebie, w szczególności w jej płytkich warstwach. Do oceny rozkładu nasycenia wodą można zastosować metodę georadarową, która pozwala na dokonanie pomiaru zmienności zawartości wody w glebie. W szczególności badać można zarówno stopień nasycenia gruntu wodą, jak również związkami mineralnymi w warstwie ornej. Stopień nasycenia decyduje o jakości gruntu zarówno w sensie pozytywnym, jak i negatywnym. Wspomniana warstwa jest corocznie spulchniana, dzięki czemu zapewnia się jej odpowiedni układ wodno-powietrzny, a co za tym idzie odpowiednią porowatość. Warstwa ta bowiem winna zawierać wszystko, co potrzebne jest do wzrostu i rozwoju roślin. W tym celu musi ona być co roku nawożona, tak aby rośliny otrzymywały potrzebne składniki. Zawiera też materię organiczną, która jest miernikiem żyzności gleby. Warstwa ta jest aktywna biologicznie, a od jej zasobności (składniki mineralne) i żyzności (zdolności przekazywania tych składników roślinom) zależy urodzajność, oznaczająca zdolność do wydawania odpowiednich plonów.

Większość upraw polowych jest uzależniona od zasobności gleby w wodę. Stopień nasycenia gleby wodą i zdolność do jej zatrzymywania wyznaczają kierunki upraw polowych. Zagadnienie to nabiera znaczenia w odniesieniu do terenów wykorzystywanych w sposób wieloraki, w których rolnictwo jest jednym ze sposobów użytkowania. Dobrym przykładem takiego wielostronnego użytkowania są uprawy o charakterze rolnym, przez co należy rozumieć także ogrodnictwo i sadownictwo na terenach wykorzystywanych także górniczo. Rozważyć bowiem trzeba wpływ wyrobisk górniczych na jakość gleby usytuowanej nad tymi wyrobiskami z uwzględnieniem jej stosunków wodnych.

Badania georadarowe przeprowadzone przez zespół pracowników Uniwersytetu Rolniczego i geofizyków AGH i Politechniki Krakowskiej mają charakter pilotażowy, a celem tych badań jest opracowanie metody wykorzystania zapisów radarowych do oceny stopnia nasycenia gleby wodą. Badania testowe wykonano na terenach rolniczych prywatnego gospodarstwa w miejscowości Brzezinka koło Zabierzowa. Wyniki

tych badań staną się podstawą do dalszego rozwijania sposobu wykorzystania metody georadarowej w rolnictwie.

W przypadku wykonywania badań właściwości ośrodka nasyconego wodą z wykorzystaniem szybkozmiennych pól elektrycznych właściwości elektryczne gruntów różnią się od takich właściwości obserwowanych dla pól wolnozmiennych i wymagają specjalnych badań z uwzględnieniem obydwu składowych, rzeczywistej i zespolonej przenikalności elektrycznej (Marczak i in. 2011).

Zależność ϵ_r^* od wagowej zawartości wilgotności w gruncie dla wody kapilarnej oraz swobodnej jest wyraźniejsza niż dla wody adsorpcyjnej. Składowa rzeczywista szybko wzrasta wraz z zawartością wilgoci, przewyższając kilkakrotnie wartości odpowiadające zawartości wody adsorpcyjnej. Zależność ta powoduje, że odpowiedź gruntu na wymuszenie w postaci fali elektromagnetycznej zależy od stopnia kompaktacji gruntu. Świadczą o tym wyniki badań (Saarenketo 1988).

1. Właściwości fal elektromagnetycznych w ośrodku dielektrycznym

Fale elektromagnetyczne rozchodzą się w ośrodku geologicznym. Wytworzone w antenie nadawczej georadaru podlegają odbiciu, dyfrakcji lub refrakcji i w końcu są rejestrowane w antenie odbiorczej. W tym rozdziale pokażemy, że niektóre właściwości pola elektromagnetycznego mogą być wykorzystane do oceny parametrów ośrodka geologicznego. Właściwości fal elektromagnetycznych są opisane w wielu podręcznikach (Hecht 2002; Griffiths 2007). Wykorzystamy je do badania spodziewanych zmian fazy fali elektromagnetycznej w badaniach georadarowych. Rozpatrzmy przypadek rozchodzenia się fali monochromatycznej charakteryzującej się wektorem falowym:

$$\vec{k} = k\hat{k} \quad k = \frac{\omega}{v} \quad (1)$$

gdzie:

- \hat{k} – wektor jednostkowy w kierunku rozchodzenia się fali,
- ω – częstość drgań,
- v – prędkość fali.

Wówczas zmiany w czasie i przestrzeni natężenia pola elektrycznego \vec{E} i indukcji magnetycznej \vec{B} można opisać wzorem:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad \vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (2)$$

gdzie:

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = k_x r_x + k_y r_y + k_z r_z \quad (3)$$

- \vec{r} – wektor o długości $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$,
- t – czas,

$$i = \sqrt{-1}$$

\vec{E}_0, \vec{B}_0 – amplitudy zmian.

Rozważmy zachowanie fali na poziomie granicy pomiędzy dwoma ośrodkami o różnych właściwościach elektrycznych. Z faktu, że fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi wynika:

$$\vec{E}_0 \cdot \vec{k} = \vec{B}_0 \cdot \vec{k} = 0 \quad (4)$$

Z równania Maxwella wynika:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

Korzystając z (2) otrzymamy zależność:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = i\omega \vec{B} \quad (6)$$

możemy uzasadnić wyrażenie:

$$\nabla \times \vec{E} = i\omega \vec{E}$$

czyli

$$\nabla \times \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} = \vec{B}_0 i\omega e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (7)$$

a w końcu:

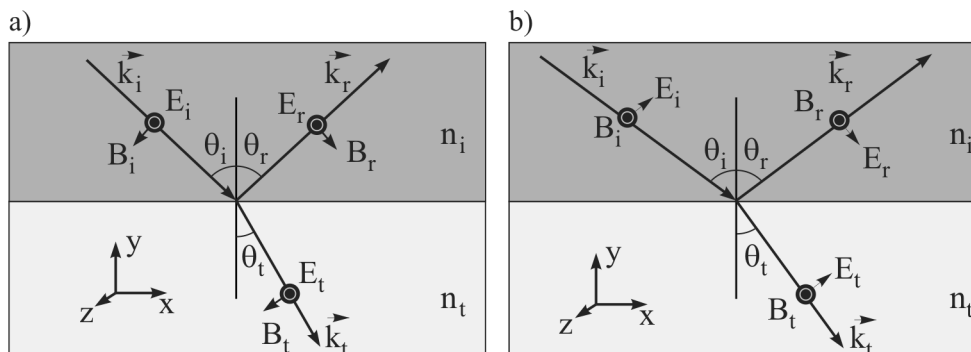
$$\frac{1}{kv} (\vec{k} \times \vec{E}_0) = \frac{1}{v} (\vec{k} \times \vec{E}_0) = \vec{B}_0 \quad (8)$$

Do równań falowych opisujących rozchodzenie się fal elektromagnetycznych wprowadza się warunki brzegowe i początkowe.

Wprowadzimy do rozważań ośrodek geologiczny składający się z dwóch części – górnej i dolnej, różniących się między sobą przenikalnością elektryczną (rys. 1).

Rozpatrzmy przejście fali elektromagnetycznej przez płaską granicę, na której zmieniają się prędkości fali. Trzeba wówczas rozpatrzyć trzy rodzaje fal: falę padającą \vec{E}_i , przechodzącą \vec{E}_t i odbitą \vec{E}_r .

$$\begin{aligned} \vec{E}_i(\vec{r}, t) &= \vec{E}_{0i} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} & \vec{B}_i(\vec{r}, t) &= \vec{B}_{0i} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \\ \vec{E}_r(\vec{r}, t) &= \vec{E}_{0r} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} & \vec{B}_r(\vec{r}, t) &= \vec{B}_{0r} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \\ \vec{E}_t(\vec{r}, t) &= \vec{E}_{0t} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} & \vec{B}_t(\vec{r}, t) &= \vec{B}_{0t} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \end{aligned} \quad (9)$$



Rys. 1. Dwa możliwe sposoby rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w gruncie (a) pole elektryczne równoległe do płaskiej powierzchni rozdziału właściwości elektrycznych i prostopadłe do powierzchni propagacji fali elektromagnetycznej (b) pole elektryczne równoległe do powierzchni propagacji fali elektromagnetycznej (Fitzpatrick 2006)

Fig. 1. Two types of propagation of electromagnetic waves in the ground (a) electric field parallel to the flat surface of dielectric properties changes and perpendicular to the propagation surface (b) electric field parallel to the propagation surface (Fitzpatrick 2006)

Z warunku, że pole elektryczne jest potencjalne i beźródłowe wynika, że $E_{I1} = E_{I2}$ oraz że składowa natężenia indukcji magnetycznej prostopadła do powierzchni propagacji w górnej części jest równa takiej składowej ujemnej w części dolnej $B_{-1} = -B_{-2}$.

Z pierwszego warunku granicznego wynika, że:

$$E_{0i} + E_{0r} = E_{0t} \quad (10)$$

a z drugiego warunku:

$$\frac{E_{0i} - E_{0r}}{v_1} = \frac{E_{0t}}{v_2} \quad (11)$$

Wprowadzając współczynnik załamania w postaci $n = c/v$, gdzie c oznacza prędkość światła, otrzymamy dla pionowego rozchodzenia się fal elektromagnetycznych zależność:

$$E_{0r} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) E_{0i} \quad (12)$$

$$E_{0T} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_{0i}$$

Ta zależność jest wykorzystywana w klasycznych pomiarach georadarowych, w których odległość pomiędzy anteną nadawczą i odbiorczą jest minimalna.

Rozważmy sytuację, w której rozsuniemy anteny i promień fali elektromagnetycznej pada pod kątem Θ do granicy. Jeżeli przenikalność magnetyczna μ we wzorze $\vec{B} = \mu \vec{H}$ jest równa 1, to obydwie składowe wektora indukcji w ośrodkach górnym i dolnym muszą być sobie równe. W rezultacie zachodzi zależność:

$$\vec{B}_{0i} e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega t)} + \vec{B}_{0r} e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega t)} = \vec{B}_{0t} e^{i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (13)$$

Na granicy $z = 0$ ten warunek może być spełniony jeżeli:

$$\vec{k}_i \cdot \vec{r} = \vec{k}_r \cdot \vec{r} = \vec{k}_t \cdot \vec{r} \quad (14)$$

gdzie:

$$k_i = k_r = \omega / v_1 \quad (15)$$

Łatwo zauważyć, że warunkiem niezbędnym do tego, aby był spełniony warunek (13) jest równość składowych wektorów \vec{k} .

$$k_{ix} = k_{rx} = k_{tx} \quad k_{iz} = k_{rz} = k_{tz} \quad (16)$$

Jeżeli rozchodzenie się promienia fali elektromagnetycznej odbywa się w płaszczyźnie x , z to:

$$k_{iy} = k_{ry} = k_{ty} = 0 \quad (17)$$

Wówczas biorąc pod uwagę zależność:

$$\sin \Theta_i = \frac{k_{x1}}{k_i} \quad (18)$$

musimy dojść do wniosku, że musi być spełnione prawo Snelliusa:

$$\frac{\sin \Theta_t}{\sin \Theta_i} = \frac{v_2}{v} = \frac{n_1}{n_2} \quad (19)$$

Na rysunku 1 pokazano dwie możliwe sytuacje, reprezentujące różne sposoby rozchodzenia się fal elektromagnetycznych. Pierwsza, w której wektory mają następujące składowe:

$$\vec{k}_i(\sin \Theta_i, 0, \cos(\Theta_i)) \quad \vec{k}_r(\sin \Theta_i, 0, -\cos(\Theta_i)) \quad \vec{k}_t(\sin \Theta_t, 0, \cos(\Theta_t)) \quad (20)$$

Natomiast wektory natężenia pola elektrycznego i magnetycznego mają postać:

$$\begin{aligned} \vec{E}_i &= E_i \vec{y} & \vec{B}_i &= E_i / v(-\cos(\Theta_i), 0, \sin(\Theta_i)) \\ \vec{E}_r &= E_r \vec{y} & \vec{B}_r &= E_r / v(-\cos(\Theta_i), 0, \sin(\Theta_i)) \\ \vec{E}_t &= E_t \vec{y} & \vec{B}_t &= E_t / v(-\cos(\Theta_t), 0, \sin(\Theta_t)) \end{aligned} \quad (21)$$

Z warunków granicznych dla składowej poziomej pola elektrycznego zachodzi zależność:

$$E_{y1} = E_{y2} \quad (22)$$

czyli:

$$E_i + E_r = E_t \quad (23)$$

Z równości składowych prostopadłych wynika, że:

$$(E_i - E_r) \frac{\cos \theta_i}{v_1} = E_t \frac{\cos \theta_t}{v_2} \quad (24)$$

Jeżeli zdefiniujemy:

$$\alpha = \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_i} \quad (25)$$

$$\beta = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (26)$$

otrzymamy następujące relacje pomiędzy amplitudami:

$$\begin{aligned} E_r &= \left(\frac{1 - \alpha\beta}{1 + \alpha\beta} \right) E_i \\ E_t &= \left(\frac{2}{1 + \alpha\beta} \right) E_i \end{aligned} \quad (27)$$

lub

$$E_r = \frac{n_1 \cos(\Theta_i) - n_2 \cos(\Theta_t)}{n_1 \cos(\Theta_i) + n_2 \cos(\Theta_t)} E_i \quad \text{natomiast} \quad E_t = \frac{2n_1 \cos(\Theta_i)}{n_1 \cos(\Theta_i) + n_2 \cos(\Theta_t)} E_i \quad (28)$$

Na podstawie tych zależności możemy wprowadzić współczynnik odbicia R jako iloczyn $r \cdot r^*$, gdzie r współczynnik łączący we wzorze E_r i E_i , a r^* wartość sprzężona z r , jeżeli r jest liczbą zespoloną. Jeżeli r nie jest liczbą zespoloną, to współczynnik odbicia jest równy r^2 . Współczynnik przejścia T ma postać:

$$T = \frac{n_2 \cos(\Theta_t)}{n_1 \cos(\Theta_i)} [t]^2 \quad (29)$$

Dla elektrycznego pola prostopadłego do płaszczyzny propagacji fali elektromagnetycznej wektory elektryczne i magnetyczne mają następujące trzy składowe:

$$\begin{aligned} \vec{B}_i &= \frac{E_i}{v} \vec{y} & \vec{E}_i &= E_i (\cos(\Theta_i), 0, -\sin(\Theta_i)) \\ \vec{B}_r &= \frac{-E_r}{v} \vec{y} & \vec{E}_r &= E_r (\cos(\Theta_i), 0, -\sin(\Theta_i)) \\ \vec{B}_t &= \frac{E_t}{v} \vec{y} & \vec{E}_t &= \frac{E_t}{v} (\cos(\Theta_t), 0, -\sin(\Theta_t)) \end{aligned} \quad (30)$$

Z równości składowych poziomych indukcji magnetycznej wynika, że:

$$\frac{E_i - E_r}{v_1} = \frac{E_t}{v_2} \quad (31)$$

Natomiast ze związku pomiędzy składowymi poziomymi pola elektrycznego wynika, że:

$$(E_i - E_r) \cos(\Theta_i) = E_t \cos(\Theta_t) \quad (32)$$

Z tych równań wynika że:

$$E_r = \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta} \right) E_i \quad E_t = \left(\frac{2}{\alpha + \beta} \right) E_i \quad (33)$$

lub

$$E_r = \frac{n_1 \cos(\Theta_t) - n_2 \cos(\Theta_i)}{n_1 \cos(\Theta_t) + n_2 \cos(\Theta_i)} E_i \quad E_t = \frac{2n_1 \cos(\Theta_i)}{n_1 \cos(\Theta_t) + n_2 \cos(\Theta_i)} E_i \quad (34)$$

Algorytm obliczania współczynnika odbicia i przechodzenia są analogiczne w tym przypadku do opisanego wyżej sposobu dla przypadku elektrycznego pola prostopadłego do płaszczyzny propagacji fali elektromagnetycznej. Te równania pozwalają analizować cztery przypadki zachowania pola falowego. Oprócz omawianego wyżej podziału ze względu na kierunek pola elektrycznego i magnetycznego trzeba osobno rozważyć przypadek, kiedy $n_1 > n_2$ oraz przypadek, kiedy $n_1 < n_2$ dla obydwu przypadków związanych z kierunkami wektorów. Na rysunkach 2 i 3 pokazano zmiany współczynników odbicia, załamania i zmiany fazy fali elektromagnetycznej w zależności od kąta padania dla tych czterech przypadków.

W szczególności ze struktury wzoru (30) wynika, że istnieje kąt, przy którym współczynnik wiążący pole padające i odbite zmienia znak. Ten kąt, zwany kątem Brewstera, charakteryzuje się tym, że jeżeli promień pada pod tym kątem, to cała energia falowa pola elektrycznego zamienia się na energię fali przechodzącej, a fala odbita znika. Tego efektu nie ma w przypadku pola elektrycznego prostopadłego do płaszczyzny propagacji. Kąt Brewstera można wyliczyć z zależności (30) jako:

$$\alpha_{BR} = \arctg \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (35)$$

Dla tego kąta następuje gwałtowna zmiana fazy w fali odbitej (rys. 3), którą będziemy rejestrować w pomiarach georadarowych. Pomiar tego kąta można wykorzystać do oceny parametrów elektrycznych ośrodka geologicznego.

Drugi charakterystyczny kąt występuje w sytuacji gdy $n_1 > n_2$. Wówczas dla kąta:

$$\alpha_{crit} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (36)$$

zgodnie z prawem Snelliusa kąt załamania jest równy 90 stopni.

Łatwo sprawdzić, że dla kąta granicznego, dla którego: $\sin \Theta_t = \pi/2$ natężenie pola elektrycznego można opisać jako:

$$\vec{E}_t(\vec{r}, t) = \vec{E}_{0t} e^{i \left(k \frac{n_1}{n_2} \sin(\Theta_i) x + k \cos(\Theta_i) z - \omega t \right)} \quad (37)$$

Trzeba zwrócić uwagę na to, że:

$$\cos(\Theta_t) = \sqrt{1 - \sin^2(\Theta_i)} \quad (38)$$

Ponieważ zgodnie z prawem Snelliusa dla kąta większego od kąta krytycznego jest większy od zera więc otrzymamy wielkość zespoloną:

$$\cos(\Theta_t) = i \sqrt{\sin^2(\Theta_i) - 1} \quad (39)$$

a w konsekwencji:

$$\vec{E}_t(\vec{r}, t) = \vec{E}_{0t} e^{-\sqrt{1 - \sin^2(\Theta_i)} z} e^{i \left(k \frac{n_1}{n_2} \sin(\Theta_i) x - \omega t \right)} \quad (40)$$

A więc powstaje fala, która może rozchodzić się jedynie wzdłuż granicy, czyli fala refrakcyjna. Fala ta zanika eksponentalnie z głębokością.

Interesująca jest fala odbita dla kąta większego od kąta krytycznego. Zwróćmy uwagę na to, że dla kąta większego od krytycznego, dla elektrycznego pola równoległego do płaszczyzny propagacji fali elektromagnetycznej zachodzi następująca zależność:

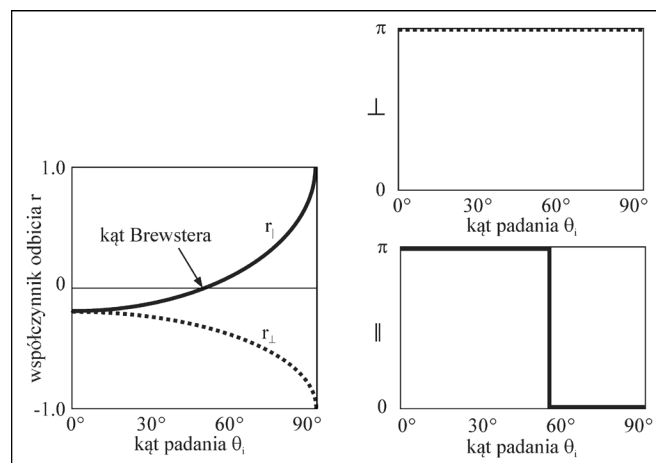
$$E_r = \frac{n_1 i \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\Theta_i) - n_2 \cos(\Theta_i) \right)}}{n_1 i \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\Theta_i) + n_2 \cos(\Theta_i) \right)}} E_i \quad E_r = -\frac{a - ib}{a + ib} E_i \quad (41)$$

Podobne rozumowanie dla elektrycznego pola prostopadłego do płaszczyzny propagacji fali elektromagnetycznej prowadzi do wniosku:

$$E_r = \frac{a - ib}{a + ib} E_i \quad (42)$$

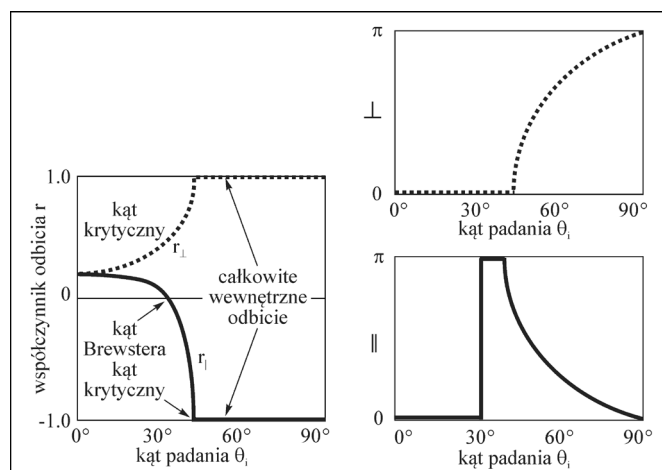
Pamiętając o tym, że współczynnik odbicia jest równy iloczynowi $r \cdot r^*$ łatwo zauważymy, że powyżej kąta krytycznego współczynnik odbicia jest równy 1 (całkowite wewnętrzne odbicie), a faza fali odbitej zależna od stosunku części rzeczywistej do części urojonej we wzorze (37) ulega zmianie ze wzrostem kąta Θ_i , jak to pokazano na rysunku 3.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wydaje się, że badanie pola falowego w metodzie GPR dla kąta krytycznego i kątów ponadkrytycznych byłoby interesujące i mogłoby przynieść ciekawe rezultaty. Na przeszkodzie leży jednak szybki zanik pola rozchodzącego się pod dużymi kątami padania ze względu na konstrukcję aparatury pomiarowej. Niemniej rejestracja zmiany fazy fali odbitej w wyniku przekroczenia kąta Brewstera jest możliwa



Rys. 2. Rozkład współczynnika odbicia i fazy dla fali odbitej w przypadku gdy prędkość w górnym ośrodku jest większa niż w dolnym. Znakiem prostokątności oznaczono przypadek kiedy pole elektryczne jest prostopadłe do płaszczyzny rozchodzenia się fali znakiem równoległym gdy wektor natężenia elektrycznego leży w płaszczyźnie propagacji (Fitzpatrick 2006)

Fig. 2. The relation of the reflectance coefficient and signal phase on the incidence angle. Case when the velocity in the upper medium is greater than the lower medium. The “perpendicular” sign means that the electric field is perpendicular to the plane of propagation and the “parallel” sign means that the electrical field is parallel to the plane of propagation (Fitzpatrick 2006)



Rys. 3. Rozkład współczynnika odbicia i fazy dla fali odbitej w przypadku gdy prędkość w górnym ośrodku jest mniejsza niż w dolnym. Znakiem prostokątności oznaczono przypadek kiedy pole elektryczne jest prostopadłe do płaszczyzny rozchodzenia się fali, znakiem równoległym gdy wektor natężenia elektrycznego leży w płaszczyźnie propagacji (Fitzpatrick 2006)

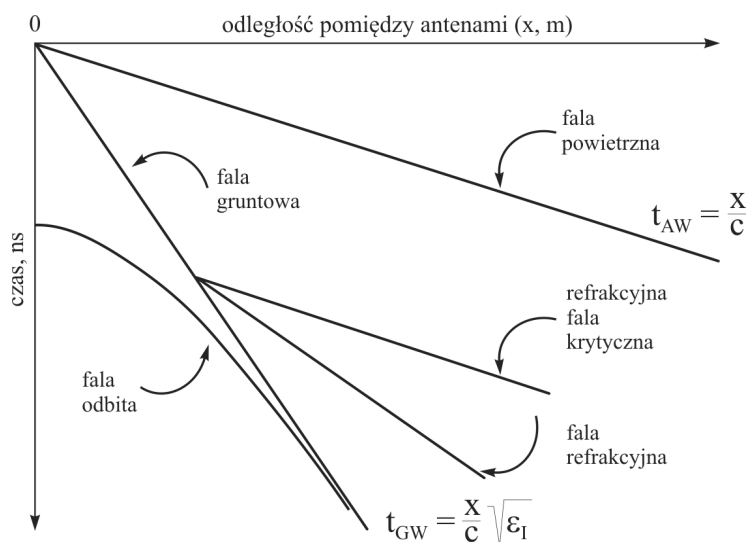
Fig. 3. The relation of the reflectance coefficient and signal phase on the incidence angle. Case when the velocity in the upper medium is smaller than the lower medium. The “perpendicular” sign means that the electric field is perpendicular to the plane of propagation and the “parallel” sign means the electrical field is parallel to the plane of propagation (Fitzpatrick 2006)

i może być praktycznie wykorzystana. Konstrukcje nowych rodzajów anten badawczych, jakie pojawiły się na rynku urządzeń geofizycznych, mogą dawać znacznie większe możliwości wykorzystania pomiarów georadarowych na większych odległościach pomiędzy anteną nadawczą i anteną odbiorczą.

2. Badania testowe

Na terenie gruntów rolniczych w Brzezince koło Zabierzowa przeprowadzono badania wstępne, mające na celu określenie parametrów gruntowych, które są ważne z punktu widzenia agrokultury i sposobów poprawiania prac rolniczych. Celem pomiarów było sprawdzenie przydatności metody georadarowej do uzyskania informacji o jakości gruntu.

W profilowaniu prędkości WARR w metodzie georadarowej (rys. 4) mogą być zarejestrowane: fala w powietrzu, fala gruntowa, fale odbite i fale refrakcyjne.



Rys. 4. Przykładowy echogram z profilowań WARR

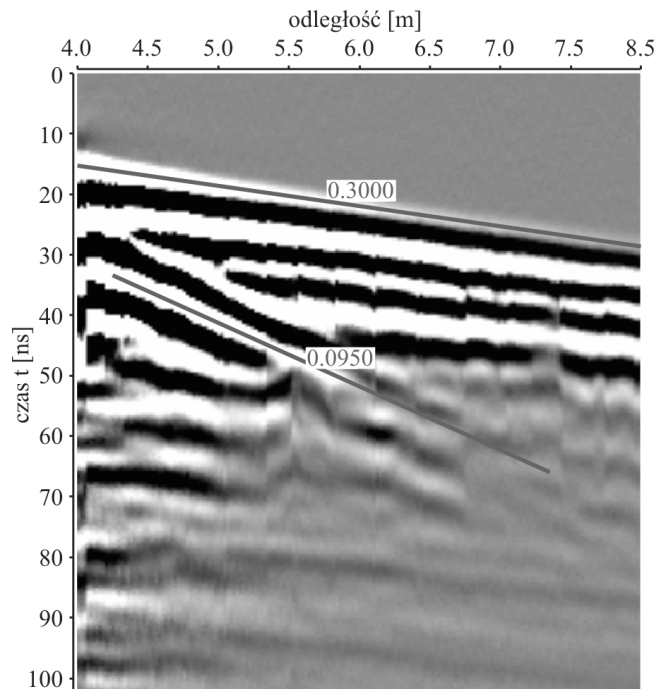
C – prędkość fali elektromagnetycznej w próżni, ϵ_i – stała dielektryczna w i -tej warstwie dla częstotliwości fali georadarowej (Huisman i in. 2003)

Fig. 4. Schematic echogram for profiling velocity (WARR) measurement

C – velocity of electromagnetic waves in vacuum, ϵ_i – electrical permittivity in i -th layer for georadar wave frequency (Huisman i in. 2003)

Badania przeprowadzone przez zespół wskazały na zawilgocenie gruntu na głębokości od 30 do 60 cm. Przeprowadzono testowanie zaproponowanej w tym artykule tezy, że przekroczenie kąta granicznego Brewstera jest związane ze zmianą fazy w zapisie radarowym.

W ramach badań przesuwano antenę odbiorczą w stosunku do anteny nadawczej i rejestrowano falę elektromagnetyczną dla każdej odległości, wzrastającej co 2 cm. Cyfrowy zapis tych rezultatów przedstawiono na rysunku 6. Widać na nim wyraźną zmianę fazy dla odległości 32 cm pomiędzy anteną nadawczą i odbiorczą. Policzone tangens kąta Brewstera, jaki



Rys. 5. Przykładowy echogram dla profilowania prędkości WARR został wykonany przy pomocy anten o częstotliwości 200 MHz. Prędkość fali w powietrzu = 30 cm/ns, prędkość fali gruntowej 9,5 cm/ns

Fig. 5. Example of echogram for estimating velocity WARR. Measured using 200 MHz antennas. The velocity in the air = 30 cm / ns, velocity of the ground wave = 9.5 cm/ns

utworzył promień georadarowy. Przyjmując w pierwszym przybliżeniu, że fala rozchodzi się z prędkością wyznaczoną z nachylenia krzywej przedstawionej na rysunku 6 wyznaczono ten tangens równy 0,75 odpowiadający kątowi 65 stopni. Pozwala on aproksymować prędkość fali w pierwszym ośrodku na 8,8 cm/sec, a w drugim (dolnym) na 11,7 cm/sec.

Podsumowanie

Problemy, z jakimi spotykają się geofizycy, którzy chcą wykorzystać metody georadarowe do potrzeb rolniczych wymagają od nich nowego spojrzenia na właściwości pól elektromagnetycznych i znajdowania takich właściwości struktury zapisów falowych, które można by wykorzystać w określeniu właściwości użytecznych gruntów. Wykorzystanie kąta Brewstera pozwala na identyfikację właściwości gruntów o różnym stopniu zwięzłości i różnym stopniu nasycenia wodą. Konstrukcje nowych rodzajów anten badawczych, jakie pojawiły się na rynku urządzeń geofizycznych, mogą dawać znacznie większe możliwości wykorzystania pomiarów georadarowych na większych odległościach pomiędzy anteną nadawczą i anteną odbiorczą.

Praca została wykonana w ramach prac statutowych, nr umowy: 11.11.140.645.

Literatura

- Carcione, J.M. i Schoenberg, M. 2000. *3-D Ground Penetrating Radar Simulation and Plane Wave Theory in Anisotropic Media*. *Geophysics*, September-October 2000, Vol. 65, No. 5, s. 1527–1541.
- Fitzpatrick, R. 2006. *Classical Electromagnetism*. [Online] Dostępne w: <http://foreside.ph.utexas.edu> [Dostęp: 1.06.2016].
- Griffith, D.J. 2007. *Introduction to Electrodynamics* Pearson Education.
- Hecht, E. 2002. *Optics* Addison Wesley, San Francisco.
- Huisman, J.A., Hubbard, S.S., Redman, J.D. i Annan, A.P. 2003. *Measuring Soil Water Content Penetrating Radar. A Review*. *Vadose Zone Journal* 2, s. 476–491.
- Marcak, H., Szczepańska-Plewa, J., Tomecka-Suchoń, S., Zdechlik, R., Zuberem, W. i Żogała, B. 2011. *Geofizyczne i hydrogeologiczne badania zanieczyszczeń środowiska wodno-gruntowego w otoczeniu składowisk odpadów górniczych*, Praca zbiorowa pod redakcją naukową: Marcak, H., Tomecka-Suchoń, S. i Zdechlik, R., Warszawa: Oficyna Drukarska-Jacek Chmielewski, 114 s.
- Saarenketo, T. 1998. *Electrical Properties of Water in Clay and Silty Soils*, *Journal of Applied Geophysics* No. 40, s. 73–88.
- Schon, J.H. 1996. *Physical Properties of Rock, Handbook of Geophysical Exploration*, Pergamon Press Inc., 1–212.
- Tomecka-Suchoń, S. 2010. *Teoretyczna analiza wpływu nasycenia gruntu roztworem NaCl na amplitudę fali elektromagnetycznej GPR*, *Przegląd Górniczy* nr 6, s. 45–51.