

Geometria podwodnych dróg propagacji fal długich

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyznaczenie położenia kierunków propagacji fali radiowej wnikającej w wodny ośrodek przewodzący; zaprezentowano zmienność uzyskiwanej niejednorodnej fali płaskiej względem różnych przewodności Morza Bałtyckiego, jej tłumienie oraz proponowane poprawki czasowe dla przesyłanych radiowo precyzyjnych informacji czasowych.

Abstract. This paper presents the definition of positioning of the propagation directions of a radio wave entering an aqueous conductive medium; the geometry changes of the non-uniform plane wave against different Baltic Sea conductivities is shown, along with its attenuation rate and proposed time corrections for transmitted precise time information. (**The geometry of water-submerged longwave propagation paths**).

Słowa kluczowe: propagacja, LW, LF, sygnał czasu

Keywords: propagation, LW, LF, time signal

Wstęp

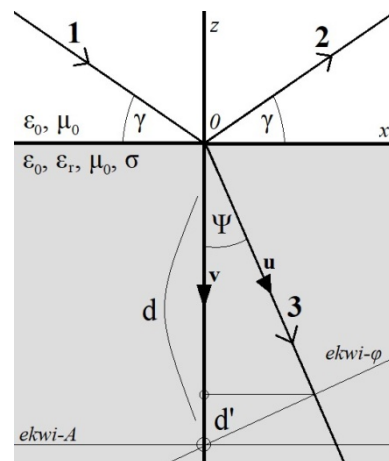
Uruchomiony w listopadzie 2023 r. radiowy system dystrybucji cyfrowego sygnału polskiego czasu urzędowego e-CzasPL Radio, zarządzany przez Główny Urząd Miar w Warszawie, umożliwia bezprzewodową synchronizację dowolnych urządzeń elektronicznych z polskim czasem urzędowym na obszarze kraju i poza nim dzięki emisji sygnału na częstotliwości 225 kHz Programu 1 Polskiego Radia z Radiowego Centrum Nadawczego w Solcu Kujawskim [1, 2]. Modulowany fazowo (PSK) sygnał, z emitowanymi max. co 3 sekundy kolejnymi ramkami synchronizacyjnymi, emitowany jest symultanicznie z pozostałymi sygnałami wysyłanymi na częstotliwości 225 kHz z RCN Solec Kujawski (sterowanie systemami energetycznymi, transmisja audio Programu 1 Polskiego Radia, akustyczny sygnał czasu w systemie BBC, sterowanie systemami oświetleniowymi i in.). e-CzasPL Radio wyróżnia się znacznie wyższą odpornością na zakłócenia niż podobne systemy wykorzystujące modulację amplitudy, zaś dzięki wysokiej mocy promieniowanej odbierany sygnał posiada permanentnie wysoki stosunek sygnału do szumu, co umożliwia stosowanie systemu w środowisku silnie zindustrializowanym [3]. Prototypowe, proste odbiorniki sygnału czasu ukazały możliwość łatwej synchronizacji na dużych dystansach od RCN Solec Kujawski, nakreślając obszar podstawowy (najdokładniejszy – dzięki fali przyziemnej) stosowania systemu, obejmujący wiele krajów europejskich [4].

Obejmowanie zasięgiem RCN Solec Kujawski całości Morza Bałtyckiego (z osiąganymi natężeniami pola elektrycznego powyżej 5 mV/m dla polskiego wybrzeża – zgodnie z materiałem z Polskiego Radia [5] – oraz do 1 mV/m dla północnej części Zatoki Botnickiej) skłania ku analizie możliwości odbioru usług cyfrowych zapewnianych na tej częstotliwości również pod powierzchnią wody morskiej o zróżnicowanym zasoleniu, zważywszy na wciąż odpowiednio wysoką (> 300 m) długość fali i związaną z nim niepomijalną głębokość penetracji środowiska o danej przewodności (wykorzystywaną w zakresie radiodifuzyjnym fal długich przykładowo do badań geofizycznych [6, 7]; zastosowania stricte podwodne mają charakter ściśle strategiczny). Ponadto, raportowana daleka słuchalność analogowego (A3E) audio Polskiego Radia na kierunku bliskim do azymutu maksymalnego promieniowania systemu antenowego (140°) – słuchalność sięgająca Malezji (stosunek sygnału do szumu wystarczający do odbioru sygnału analogowego 225 kHz na odbiornikach abonenckich) – wskazuje na istnienie większej ilości akwenów potencjalnie nadających się do odbioru i zdekodowania sygnałów cyfrowych na 225 kHz.

Przygotowanie eksperymentalnych kampanii pomiarowych wymaga wyznaczenia podstaw propagacji rozważanego sygnału ze szczególnym uwzględnieniem przewodności rozważanego ośrodka. W niniejszym artykule zaprezentowano wyprowadzone podstawowe zależności związane z geometrią dróg propagacji rozważanego sygnału (ze szczególnym uwzględnieniem Morza Bałtyckiego), podano przestrzenne zależności opisujące tłumienia składowych sygnału oraz zaproponowano poprawki dla podwodnego systemu dystrybucji sygnału czasu modulowanego fazowo.

Geometria dróg propagacji

Rys. 1 ukazuje podstawowy schemat nadejścia fali radiowej spolaryzowanej pionowo (kierunek 1) pod kątem γ na granicę ośrodków o różnych niektórych parametrach [8]. Ośrodek wyszarzony posiada niepomijalną przewodność σ [S/m] oraz przenikalność elektryczną względną ϵ_r [-]; dla Morza Bałtyckiego (wybrzeże polskie) oba parametry wynoszą kolejno 1.5 S/m oraz 72 [8, 9]. Kierunek 2 oznacza falę radiową odbitą od granicy ośrodków; wewnątrz ośrodka przewodzącego fala propaguje wzdłuż kierunku 3, nachylonego pod kątem Ψ do osi Z.



Rys.1. Schemat odbicia i wnikania fali radiowej do ośrodka o odmiennych parametrach elektrycznych, wg [8].

Na podstawie relacji wektorowej opisującej propagację fal padającej i wnikającej można stwierdzić, że:

$$(1) \quad \frac{2\pi}{\lambda} \cos\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin\Psi) \sqrt{\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}}$$

gdzie λ [m] jest długością fali w ośrodku nieprzewodzącym, ω [rad/s] jest częstotliwością kołową fali radiowej i ϵ_0 jest przenikalnością elektryczną próżni, równą $\sim 8.8154 \cdot 10^{-12}$ F/m. Kąt Ψ można więc wyznaczyć z zależności:

$$(2) \quad \Psi = \arcsin \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}}} \cos \gamma \right) = \arcsin \left(\frac{1}{u - jv} \cos \gamma \right) =$$

$\arcsin(a + jb)$

Korzystając z twierdzenia de Moivre'a, zmienne u , v , a i b można zapisać jako:

$$(3) \quad u = \sqrt[4]{\epsilon_r^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_0^2}} \cos \left(\frac{2\pi + \arctan \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}}{2} \right)$$

$$(4) \quad v = \sqrt[4]{\epsilon_r^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_0^2}} \sin \left(\frac{2\pi + \arctan \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}}{2} \right)$$

$$(5) \quad a = \frac{\cos \gamma}{\sqrt[4]{\epsilon_r^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_0^2}}} \cos \left(\frac{2\pi + \arctan \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}}{2} \right)$$

$$(6) \quad b = \frac{\cos \gamma}{\sqrt[4]{\epsilon_r^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_0^2}}} \sin \left(\frac{2\pi + \arctan \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}}{2} \right)$$

Zmienne u i v oznaczają kolejno współczynniki tłumienia fali radiowej w ośrodku przewodzącym, propagującej na kierunku 3 oraz wzdłuż osi Z (pionowo w dół). Wnikająca w ośrodek fala radiowa staje się niejednorodną falą płaską, posiadającą niepokrywające się ze sobą powierzchnie stałych amplitud (*ekwi-A*) i stałych faz (*ekwi- ϕ*), prostopadłe do odpowiednio kierunku 3 oraz osi Z (wg rys. 1).

Wówczas kąt Ψ (jego część rzeczywistą) można zapisać jako:

$$(7) \quad \operatorname{Re}(\Psi) = \arctan \left(\frac{a - \sqrt[4]{\epsilon_r^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_0^2}} \cos \left(\frac{2\pi + \arctan \frac{2ab}{1-a^2+b^2}}{2} \right)}{-b + \sqrt[4]{\epsilon_r^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_0^2}} \sin \left(\frac{2\pi + \arctan \frac{2ab}{1-a^2+b^2}}{2} \right)} \right)$$

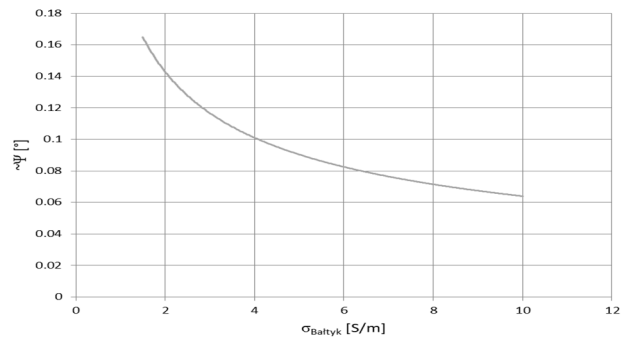
Względną przenikalność elektryczną ośrodka przewodzącego dla rozważanej wody morskiej (bałtyckiej) można traktować jako niezmienną [9]; zależności (2)-(6) są więc funkcjami przewodności ośrodka. O ile dla wybrzeża polskiego parametr ten – związany z zasoleniem – jest stały i wynosi 1.5 S/m [10], o tyle dla północnej części Morza Bałtyckiego będzie on niższy, zaś dla jego zachodniej części wyraźnie wyższy. Zmienność zasolenia i przewodności odnotowuje się również wraz z głębokością, ukształtowaniem dna morskiego i ruchów wody w całym akwenie [11, 12].

Rys. 2 prezentuje wyznaczone wg zależności (6) przybliżone wartości kąta Ψ dla różnych wartości przewodności ośrodka; dla zakresu małych wartości kąta γ (1° - 5°) wartości te były stałe w przybliżeniu do trzech miejsc po przecinku. Przyjmując kąt Ψ jako miarę niejednorodności fali płaskiej propagującej w ośrodku przewodzącym na kierunku 3 – lub jako miarę pionowości kierunku 3 – widać wyraźnie, iż wraz ze wzrostem przewodności kąt ten dąży do zera, wskazując na zmniejszającą się niejednorodność propagującej fali radiowej. Naturalnie, wraz ze wzrostem przewodności zmaleje natężenie pola elektrycznego fali radiowej wnikającej w ośrodek (większość fali dozna odbicia wzdłuż kierunku 2).

Funkcję wykreśloną na rys. 2 można opisać równaniem:

$$(8) \quad \sim \Psi = 0.2019 \cdot \sigma_{\text{Bałtyk}}^{-0.499} \text{ [}^\circ\text{]}$$

dla przewodności $\sigma_{\text{Bałtyk}}$ wyrażonej w S/m.



Rys.2. Przybliżone i nieskierowane wartości kąta Ψ jako funkcja przewodności wody Morza Bałtyckiego.

Wytłumianie natężenia pola elektrycznego

Wyznaczone w zależnościach (3) i (4) parametry u i v – współczynniki tłumienia fali radiowej na odpowiednio kierunku 3 i osi Z – można wykorzystać do zapisu sumarycznego wykładniczego czynnika tłumienia [8]:

$$(9) \quad e^{-(1_x x + 1_z z)u} \cdot e^{-(1_x x + 1_z z)v}$$

gdzie 1_x i 1_z oznaczają odpowiednio wersory osi X i Z dla współrzędnych x i z w kartezjańskim układzie współrzędnych zgodnym z rys. 1.

Przekształcając wykładnik potęgi czynnika tłumienia oraz uwzględniając osłabienie natężeń składowych elektrycznej i magnetycznej fali radiowej po przekroczeniu granicy ośrodków [13], łączne zależności określające słabnące natężenia pola elektrycznego E_w i magnetycznego H_w można zapisać jako:

$$(10) \quad E_w(x, z) = E_0 \frac{2\eta_w}{\eta_w + \eta_0} e^{-\sqrt{z^2 [u^2 \sin^2 \Psi (tg^2 \Psi - 1) + u^2 + v^2 + 2uv \cos \Psi]}}$$

$$(11) \quad H_w(x, z) = H_0 \frac{2\eta_0}{\eta_w + \eta_0} e^{-\sqrt{z^2 [u^2 \sin^2 \Psi (tg^2 \Psi - 1) + u^2 + v^2 + 2uv \cos \Psi]}}$$

gdzie E_0 [V/m] i H_0 [A/m] oznaczają natężenia pól elektrycznego i magnetycznego fali radiowej w ośrodku poprzedzającym (o pomijalnej przewodności), zaś η_0 i η_w można zapisać jako [13]:

$$(12) \quad \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

$$(13) \quad \eta_w = \sqrt{\frac{j\omega \mu_0}{\sigma + j\omega \mu_0}}$$

gdzie μ_0 jest przenikalnością magnetyczną próżni równą $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m i można ją traktować jako stałą w obu ośrodkach [9]. W mocy pozostaje klasyczna zależność opisująca głębokość δ [m] wnikania fali radiowej w dany ośrodek [14] – należy jednak podkreślić, iż malejące wykładniczo do zera natężenie danej składowej pola fali radiowej nie będzie posiadać wartości zerowej w momencie osiągnięcia poniższej głębokości wnikania (pozostanie pewien margines wartości, który może okazać się istotny dla sygnałów odpornych na niski stosunek sygnału do szumu):

$$(14) \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}}$$

gdzie f [Hz] jest częstotliwością fali radiowej.

Poprawka czasowa

Rozważana propagacja fali radiowej po przeniknięciu przez granicę ośrodków, będąca propagacją fali niejednorodnej, wymusza – dla sygnału modulowanego fazowo – określenie korekcji czasu nadejścia sygnału, związane z niepokrywaniem się płaszczyzn ekwiampitudowej i ekwifazowej. Dla zadanej głębokości zanurzenia d (na rys. 1.) odpowiadająca temu punktowi płaszczyzna ekwifazowa $ekwi-\varphi$, prostopadła do kierunku propagacji 3, tworzy z kątem Ψ pozorne podwyższenie (spłylenie) głębokości d' , na której odebrany zostanie sygnał o tej samej fazie, zgodnie z rzeczywistością propagujący na kierunku 3. Czas propagacji [s] w ośrodku przewodzącym, przy uwzględnieniu położenia płaszczyzny ekwifazowej, można więc zapisać jako:

$$(15) \quad \Delta t = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r} \cdot d \cos \Psi$$

Wartość tę należy w przypadku ogólnym dodać do czasu propagacji sygnału w ośrodku o pomijalnej przewodności; dla rozważanego zakresu geograficznego można ją wykorzystać jako wartość samodzielna.

W przypadku uwzględnienia stratyfikacji ośrodka na $1, 2, \dots, n-1, n$ warstw o różniących się przewodnościach – ale leżących w granicach wyznaczonej dla zadanej częstotliwości głębokości wnikania δ [m] – poprawkę czasową można zdefiniować jako (przy założeniach odbioru w n -tej warstwie o grubości d_n oraz nienakładania się na siebie płaszczyzn ekwifazowych z sąsiednich warstw o różnych przewodnościach):

$$(16) \quad \Delta t = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r} \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{d_i}{\cos \Psi_i} + d_n \left(1 - \frac{d_{n-1} \operatorname{tg} \Psi_{n-1}}{\operatorname{tg}(90^\circ - \Psi_n) + \operatorname{tg} \Psi_n} \right) \right]$$

Podsumowanie

Na podstawie zaprezentowanych zależności oraz wykresu na rys. 2. można stwierdzić, iż Morze Bałtyckie nie stanowi zbyt problematycznego ośrodka propagacyjnego dla fal radiowych pod względem wywoływania niejednorodności propagującej fali płaskiej. Dla precyzyjnego systemu dostarczającego informacje o charakterze czasowym, fakt ten jest jednak niepomijalny i ważny przy tworzeniu poprawek dla odbioru. Opisane zależności stanowią podstawę teoretyczną do opisu prac i wyników doświadczalnych, związanych z odbiorem i dekodowaniem systemu e-CzasPL Radio w różnych warunkach wodnych; mogą one również stanowić podstawę do prac nad wyprowadzeniem dalszych/dokładniejszych poprawek czasowych dla systemów dystrybucji informacji czasowej oraz radionawigacji (np. systemu LORAN-C / e-LORAN).

Autor pragnie bardzo podziękować prof. dr. hab. inż. Kajetanu Snopek z Instytutu Radioelektroniki i Techniki Multimedialnych Politechniki Warszawskiej za pomoc i cenne uwagi matematyczne.

Autor: dr inż. Tomasz Aleksander Miś, Politechnika Warszawska, Instytut Radioelektroniki i Techniki Multimedialnych, ul. Nowowiejska 15/19 p. 434, 00-665 Warszawa, E-mail: tomasz.a.mis@mailplus.pl;

LITERATURA

- [1] e-CzasPL Radio: poznaj system, <https://e-czas.gum.gov.pl/e-czas-radio/> [dostęp: 25.03.2024]
- [2] Bem D. J., Antenna Array in the Radio Broadcasting Centre Solec Kujawski (Polish Radio, JSC), *Telecom. Rev. + Telecom. News*, 8-9 (2000), 577-585
- [3] Miś T. A., Gruszczyński M., Czubla A., Modelski J., 25th anniversary of RCN Solec Kujawski longwave radio station and the introduction of digital time signal in Poland, *4th URSI Atlantic Radio Science Meeting, Gran Canaria, Spain, 19-24 May 2024*
- [4] Miś T. A., Gruszczyński M., Czubla A., Modelski J., Preliminary tests of RF LW Polish digital time signal reception in Lithuania, *International Microwave and Radar Conference MIKON 2024 on the 11th Microwave and Radar Week 2024, 1-4.07.2024*
- [5] Miś T. A., Modelski J., Analiza terenowych zmian propagacyjnych sygnałów polskich radiostacji długofalowych, *XXII Krajowa Konferencja Elektroniki KKE, Darłowo, 11-15.06.2023*
- [6] Bosch F., Gurk M., Comparison of RF-EM, RMT and SP measurements on a karstic terrain in the Jura mountains (Switzerland). *Proceedings of the Seminar 'Electromagnetische Tiefenforschung', Altenberg, Germany, 20-24 March 2000*
- [7] *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology*, 2th ed.; Kirsch, R. (red.) Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009
- [8] Bem D. J., Anteny i rozchodzenie się fal radiowych, *WN-7*, Warszawa 1973
- [9] Recommendation ITU-R P.527-3: Electrical characteristics of the surface of the earth, 1978-1992
- [10] Bem D. J., Materiały pomocnicze do obliczeń propagacyjnych, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 1974
- [11] Sjöqvist C., Godhe A., Jonsson P. R., Sundvist L., Kremp A., Local adaptation and oceanographic connectivity patterns explain genetic differentiation of a marine diatom across the North Sea-Baltic Sea salinity gradient, *Molecular Ecology*, 24 (2015), 2871-2885
- [12] Herlemann D. P. R., Woelk J., Labrenz M., Jürgens K., Diversity and abundance of "Pelagibacterales" (SAR11) in the Baltic Seasalinity gradient, *Systematic and Applied Microbiology*, 37 (2014), 601-604
- [13] Gwarek W., Kopyt P., Kompatybilność Elektromagnetyczna: Ekranowanie, *Politechnika Warszawska, Instytut Radioelektroniki i Techniki Multimedialnych*, 2020
- [14] Burrows M. L., ELF Communications Antennas, *Peter Peregrinus Ltd., IEE*, 1978