

Modelowanie propagacji fal elektromagnetycznych metodą ray-tracingu

Streszczenie. Artykuł dotyczy problemów związanych z modelowaniem propagacji fal elektromagnetycznych w komorach bezodbiciowych. Omówiono modelowanie propagacji fal elektromagnetycznych przy pomocy metody śledzenia promieni. Przedstawiono zależności analityczne wykorzystywane w metodzie śledzenia promieni oraz algorytm programu komputerowego bazujący na powyższych zależnościach. Opisano program komputerowy bazujący na opisanym algorytmie. Przedstawiono wyniki walidacji opracowanego oprogramowania.

Abstract. The article concerns problems of electromagnetic wave propagation in semi-anechoic chambers. Electromagnetic wave propagation modelling using ray-tracing methodology is described. The analytical equations which are used in ray-tracing methodology are presented. The elaborated program algorithm basing on presented analytical equations is described. The worked out software application basing on the described algorithm is presented. The validation results of elaborated software are presented too. (**The ray-tracing method for electromagnetic wave propagation modelling**).

Słowa kluczowe: śledzenie promieni, optyka geometryczna, propagacja.

Keywords: ray-tracing, geometrical optics, propagation.

doi:10.12915/pe.2014.07.48

Wstęp

W ogólnodostępnej literaturze dotyczącej metod modelowania rozchodzenia się fal radiowych można odnaleźć szereg rozwiązań różniących się między innymi:

- modelowanym środowiskiem propagacji (wolna przestrzeń, teren zurbanizowany, wnętrza budynków),
- wymiarowością (dwuwymiarowe, trójwymiarowe),
- możliwością do uzyskania dokładnością obliczeń.

Tylko nieliczne z nich można wykorzystać do modelowania rozchodzenia się fal radiowych w komorach bezodbiciowych. Pomimo rozwoju metod numerycznych, służących rozwiązywaniu problemów elektromagnetycznych (metoda momentów, FDTD), w dalszym ciągu napisanie aplikacji programowej implementującej określone modele propagacyjne fal radiowych jest bardzo trudne, a czasami wręcz niemożliwe. Można wyróżnić grupę metod modelowania rozchodzenia się fal radiowych przy użyciu których, po pewnych uproszczeniach, możliwe jest uzyskanie wyników symulacji o dopuszczalnej dokładności w akceptowalnym czasie jej trwania. Do tej grupy należy metoda śledzenia promieni (*ang. ray-tracing*) [1][2][3][4].

Opis metody śledzenia promieni

Metoda śledzenia promieni jest powszechnie stosowana w grafice komputerowej. Jej zastosowanie pozwala na uzyskanie fotorealistycznych obrazów scen trójwymiarowych. W przypadku fal radiowych metoda śledzenia promieni pozwala na wyznaczenie poziomu natężenia pola elektrycznego w ośrodkach posiadających obszary o różnych prędkościach propagacji, charakterystykach absorpcji i powierzchniach odbijających. W ośrodkach tych fale mogą ulec ugięciu, interferencji, odbiciu i załamaniu, co dodatkowo utrudnia dalszą analizę.

Należy pamiętać, że w grafice komputerowej oświetlenie sceny oraz położenie obserwatora są znane, a metoda śledzenia promieni jest wykorzystywana do określenia, które z nich trafiają bezpośrednio do obserwatora. W przypadku wykorzystywania tej metody do obliczania poziomu natężenia pola elektrycznego, rolę obserwatora pełni antena nadawcza, znana jest także postać emitowanego sygnału. Jest to sytuacja odwrotna do tej, z którą spotkać się można w trakcie generowania grafiki trójwymiarowej.

Zjawiska transmisji oraz odbicia fal radiowych powodują istotne trudności w jednoznaczym określeniu dróg optycznych śledzonych promieni. W zależności od

implementacji, metoda ta bazuje na analizie, albo tylko tych promieni, które trafiają bezpośrednio do anteny odbiorczej, albo dodatkowej analizie promieni odbitych oraz załamanych (metoda adaptacyjna).

Do analizy promieni odbitych wykorzystywane są zasady optyki geometrycznej, w przypadku promieni załamanych analiza dokonywana jest z użyciem metody GTD (*ang. geometrical theory of diffraction*).

Podstawowym założeniem optyki geometrycznej jest fakt, iż długość rozpatrywanych fal radiowych jest zbliżona lub mniejsza od obiektów i powierzchni, na które fale te padają. Takie założenie pozwala na wyznaczenie kąta odbicia na podstawie kąta padania (prawo odbicia i załamania światła – optyka geometryczna).

Możliwe jest wykorzystanie skutecznej powierzchni odbicia danego obiektu do obliczenia natężenia źródłowego sygnału wzdłuż promienia bezpośredniego i odbitego.

W praktyce, najczęściej wykorzystywanym założeniem metody GTD jest traktowanie wszystkich powierzchni, na które padają fale radiowe, jako płaszczyzn. Pozwala to na znacznie szybsze i prostsze (a więc wydajniejsze) obliczanie kątów odbicia i transmisji.

Natężenie pola elektrycznego w danym punkcie, którego źródłem jest i -ty promień, wyrażone jest następującą zależnością:

$$(1) \quad E_i = E_0 L_i(d) f_{ti} f_{ri} \prod_j \Gamma(\theta_{ji}) \prod_k T(\theta_{ki}) e^{-jkd}$$

gdzie: E_i natężenie pola elektrycznego od i -tego promienia $\left[\frac{V}{m}\right]$, E_0 wartość natężenia pola w odległości 1m od źródła $\left[\frac{V}{m}\right]$, d długość kanału radiowego [m], $L_i(d)$ straty na dystansie d (dł. kanału), $\Gamma(\theta_{ji})$ współczynnik odbicia, $T(\theta_{ki})$ współczynnik transmisji, e^{-jkd} przesunięcie fazy na dl. d , k liczba falowa $\frac{2\pi}{\lambda}$, f_{ti} rozkład natężenia pola elektrycznego anteny, f_{ri} rozkład natężenia pola elektrycznego anteny odbiorczej.

Całkowite natężenie pola elektrycznego w danym punkcie jest superpozycją wektorów pól pochodzących od poszczególnych promieni i wyrażone jest, jako:

$$(2) \quad E = \sum_1^i E_i$$

Występujący we wzorze (1) współczynnik strat kanału obliczany jest następująco:

$$(3) \quad L(d) = -10 \log \left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2} \right) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

gdzie: G_t , G_r zysk anteny nadawczej i odbiorczej, λ dł. fali [m], d_0 odległość odniesienia, zazwyczaj 1 [m], d długość kanału (całkowita droga promienia) [m], n współczynnik zależny od środowiska, w wolnej przestrzeni $n = 2$.

Obliczanie rozkładu natężenia pola przy zastosowaniu tej metody nie wymaga implementacji skomplikowanych metod numerycznych. Wykorzystanie ray-tracingu pozwala na osiągnięcie kompromisu pomiędzy szybkością działania algorytmu a dokładnością obliczeń.

Pomimo niewątpliwych zalet ray-tracingu wspomnieć należy o jego kilku ograniczeniach. Metoda ta nie uwzględnia rozpraszania fal radiowych, ponadto, ponieważ operuje na pojedynczych promieniach, nie jest możliwe prawidłowe modelowanie dyfrakcji.

Założenia na modelowanie rozchodzenia się fal radiowych w komorach bezodbiciowych

Podczas opracowywania algorytmu założono, że rozkład natężenia pola elektrycznego wyznaczany będzie w dwóch wymiarach. Środowiskiem propagacyjnym będzie komora bezodbiciowa, o długości 5 [m] i wysokości 3 [m]. Sufit oraz ściany komory są wyłożone materiałem absorbującym energię fal elektromagnetycznych w postaci płytek ferrytowych oraz absorberów grafitowych. Podłoga komory na całej długości jest wyłożona tylko płytkami ferrytowymi i stanowi płaszczyznę odbijającą fale elektromagnetyczne. Pomiedzy anteną nadawczą i anteną odbiorczą, które na potrzeby symulacji będą reprezentowane, jako pojedyncze punkty powierzchni, nie ma żadnych dodatkowych obiektów (przeszkód). Użytkownik aplikacji, jako dane wejściowe do algorytmu musi wprowadzić:

- długość fali (λ [m]) generowanej przez nadajnik,
- wysokość umieszczenia anteny nadawczej (h_1 [m]) (zmiana położenia jest możliwa tylko wzdłuż osi Y),
- zysk kierunkowy anteny nadawczej (G_t),
- względną przenikalność elektryczną podłoża (ϵ),
- natężenie pola elektrycznego (E_0 [$\frac{V}{m}$]) w odległości 1 [m] od anteny nadawczej,
- rodzaj polaryzacji generowanej fali radiowej (pionowa, pozioma).

Względna przenikalność elektryczną podłoża (ϵ) można uzyskać wykorzystując metodologię pomiaru opisaną w pozycjach literaturowych [5][6][7][8].

Niektóre z parametrów przyjmują stałe, z góry ustalone i niemożliwe do zmiany przez operatora wartości, są to:

- zysk kierunkowy anteny odbiorczej ($G_r = 1$),
- wymiary komory,
- krok symulacji (1 [cm]).

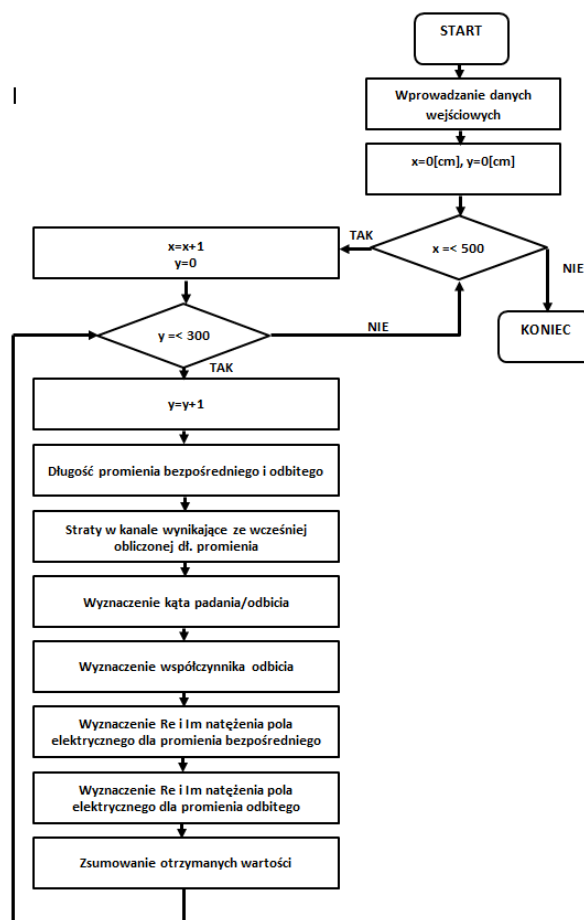
Jako model symulacyjny wybrano dwuwymiarową implementację ray-tracingu. Zastosowanie zasady wzajemności pozwala na wyznaczenie wypadkowego natężenia pola elektrycznego w punkcie odbioru. Dla każdego z punktów przestrzeni śledzone są dwa promienie:

- bezpośredni,
- odbity od podłoża.

Zaprojektowany algorytm, do obliczeń wykorzystuje zasady optyki geometrycznej, nieuwzględniane jest zjawisko dyfrakcji fal radiowych.

Algorytm modelowania rozchodzenia się fal radiowych

Na rysunku 1 przedstawiono algorytm obliczania rozkładu natężenia pola elektrycznego. Analizując poniższy algorytm należy mieć na uwadze, że zmienna y , reprezentuje wysokość zawieszenia anteny odbiorczej, a zmienna x odległość (w linii prostej) anteny odbiorczej od anteny nadawczej.



Rys. 1. Algorytm obliczający natężenie pola elektrycznego – implementacja dwuwymiarowej metody śledzenia promieni

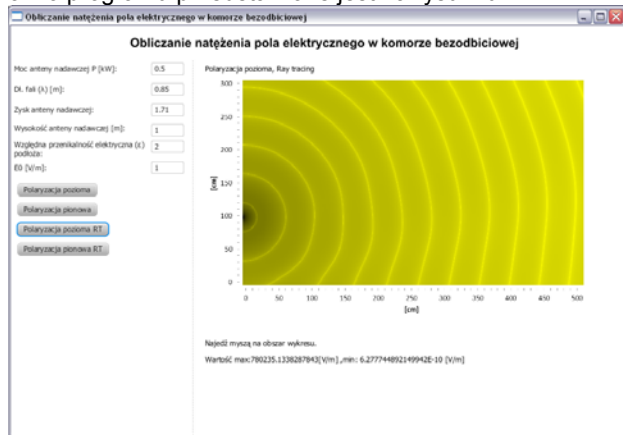
Widać, że obliczanie rozkładu natężenia pola elektrycznego w komorze bezodbiciowej wg. dwuwymiarowej implementacji metody śledzenia promieni odbywa się w dwóch pętlach. W pierwszym kroku wykonywane są obliczenia wzdłuż osi Y (wysokości komory). Po obliczeniu wartości natężenia pola, z założonym wcześniej krokiem symulacji i dla każdej z wysokości, następuje zwiększenie odległości (w poziomie) pomiędzy anteną nadawczą i odbiorczą. Cały proces zostaje powtórzony i trwa, aż do osiągnięcia końca komory.

Długości promieni bezpośredniego i odbitego wyznaczone są na podstawie zasad optyki geometrycznej, podobnie jak kąt odbicia/padania. Straty w kanale radiowym wyznaczone są na podstawie wzoru (3). Po wyznaczeniu powyższych parametrów można przystąpić do obliczania współczynnika odbicia. Jego wartość zależy od wybranej przez operatora polaryzacji generowanej fali radiowej a także od wyznaczonego wcześniej kąta odbicia. Finalnym krokiem algorytmu jest wyznaczenie, na podstawie wcześniej obliczonych wartości, poziomego natężenia pola dla promienia bezpośredniego i odbitego (1) oraz zsumowanie ich według zależności (2).

Po uzyskaniu 300 wyników dla $x = 0$ [cm] następuje zwiększenie badanej odległości x o jeden centymetr i powtórzenie procesu. Obliczenia są przerywane z chwilą osiągnięcia największego możliwego, a założonego wcześniej wymiaru komory.

Projekt aplikacji

Oprogramowanie modelujące rozchodzenie się fal radiowych i implementujące metodę śledzenia promieni wykonano na platformie JavaFX w języku Java. Główne okno programu przedstawione jest na rysunku 2.



Rys. 2. GUI – główne okno aplikacji

Walidacja oprogramowania symulacyjnego

W celu zweryfikowania opracowanego oprogramowania symulacyjnego porównano poziomy natężenia pola elektrycznego otrzymane metodą symulacji komputerowej z wynikami otrzymanymi z pomiarów przeprowadzonych w komorze bezodbiornicowej Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Jako źródło sygnału probierczego wykorzystano generator HPEM DS-110. Przeprowadzono dwa pomiary zasięgowy generatora HPEM. Pierwszy pomiar przeprowadzony został dla generatora HPEM bez reflektora, drugi dla generatora HPEM z reflektorem. Pomiary przeprowadzono na częstotliwości $f = 350$ [MHz], pionowej polaryzacji pola elektrycznego oraz wzdłuż promienia bezpośredniego. Zarówno antena nadawcza, jak i antena odbiorcza znajdowały się na wysokości $h = 1$ [m]. Podczas symulacji komputerowych zasymulowano środowisko symulacyjne zbliżone do środowiska w komorze bezodbiornicowej.

Tabela 1. Pomiar zasięgowy generatora HPEM

Odległość pomiarowa [m]	Wartość natężenia pola $\left[\frac{V}{m}\right]$	
	Generator HPEM bez reflektora	Generator HPEM z reflektorem
0,50	251,613670	407,610950
1,00	150,934480	245,530770
2,00	67,509960	130,753210
3,00	46,030339	83,450858
4,00	35,207744	70,033600
5,00	31,857252	67,141918

Wyniki pomiarów porównano z wynikami uzyskanymi za pomocą opracowanego oprogramowania symulacyjnego. Przeprowadzono dwa scenariusze testowe symulujące pomiar zasięgowy generatora HPEM. W pierwszym symulowano pomiar bez reflektora antenowego, w drugim pomiar z reflektorem.

Wartości parametrów wejściowych, jakich użyto do obu scenariuszy, przedstawione są w tabeli 2.

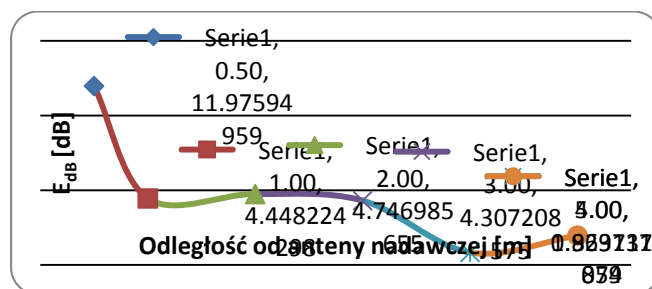
Tabela 2. Wartości parametrów wejściowych do scenariuszy testowych

Dane wejściowe	Scenariusz 1	Scenariusz 2
Moc anteny nadawczej P [kW]	160	160
Długość fali λ [m]	0,8572	0,8572
Zysk energetyczny anteny nadawczej G [dB]	1,728	3,295
Wysokość zawieszenia anteny nadawczej h_1 [m]	1	1
Względna przenikalność elektryczna podłoża (ϵ)	12	12
$E_0 \left[\frac{V}{m}\right]$	150000	150000

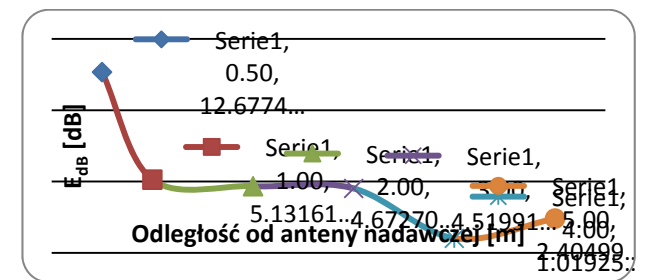
Każdą, uzyskaną w wyniku symulacji wartość, porównano z odpowiadającym jej wynikiem pomiarów według poniższej zależności:

$$(4) \quad E_{dB} = \left| 10 * \log \left(\frac{E_{app}}{E_{pom}} \right) \right|$$

gdzie: E_{app} uzyskana, dla danego punktu pomiarowego, wartość natężenia pola elektrycznego za pomocą symulacji komputerowej, E_{pom} zmierzona wartość natężenia pola elektrycznego dla danego punktu pomiarowego,.



Rys. 3. Dokładność wyników symulacji dla generatora HPEM bez reflektora



Rys. 4. Dokładność wyników symulacji dla generatora HPEM z reflektorem

Wnioski

Na przedstawionych powyżej rysunkach 3 i 4 można zauważyć, że dla punktów pomiarowych umieszczonych w odległości większej niż jeden metr od anteny nadawczej, uzyskiwane wyniki symulacji, różnią się od wyników pomiarów o nie więcej niż 5 [dB]. Otrzymane różnice pomiędzy wartościami symulowanymi i zmierzonymi mieszczą się w przedziałach publikowanych w literaturze fachowej uzyskanych dla modeli kanałów zasymulowanych według modeli:

- Seidela i Rapaporta,
- Holta, Pahlavana i Lee,
- McKowna i Hamiltona.

Ponadto różnice te, nie zależą od konstrukcji anteny nadawczej - wartość E_{dB} jest w przybliżeniu taka sama, dla obu testowanych scenariuszy. Można, zatem przyjąć, że

implementacja metody śledzenia promieni została wykonana prawidłowo. Warto zauważyć, że wraz ze zwiększeniem odległości od anteny nadawczej opracowana implementacja ray-tracingu pozwala na uzyskiwanie wyników bliższych wartościom zmierzonym.

Projekt jest finansowany ze środków NCBiR w ramach Umowy NR 0024/R/ID2/2012/02 w latach 2012-2015.

LITERATURA

- [1] Chang-Fa Y., Boau-Cheng W., Chuen-Jyi K., A Ray-Tracing Method for Modeling Indoor Wave Propagation and Penetration, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 46 1998.
- [2] Liang G., Bertoni H.L., A New Approach to 3-D Ray Tracing for Propagation Prediction in Cities, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 46 1998.
- [3] Nidd M., Using Ray Tracing for Site-Specific Indoor Radio Signal Strength Analysis, University of Waterloo, 1995.
- [4] Seidel S. Y., Rappaort T. S., Site-Specific Propagation Prediction for Wireless In-Building Personal Communication System Design, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, 1994
- [5] K. Piwowarczyk, R. Przesmycki, L. Nowosielski, M. Bugaj - Procedure for absorption measurements of absorbing

- materials, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, Volume 88, Issue 2, 2012, Pages 33-35, ISSN: 0033-2097.
- [6] R. Kubacki, L. Nowosielski, R. Przesmycki - The improved technique of electric and magnetic parameters measurements of powdered materials, ADVANCES IN ENGINEERING SOFTWARE, Volume 42, Issue 11, November 2011, Pages 911-916, ISSN: 0965-9978.
- [7] R. Kubacki, L. Nowosielski, R. Przesmycki, R. Frender - Measurement technique of magnetic and electric permeability of the powder materials, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, Volume 85, Issue 12, 2009, Pages 83-87, ISSN: 0033-2097.
- [8] R. Kubacki, L. Nowosielski, R. Przesmycki - Technique for the electric and magnetic parameter measurement of powdered materials, WIT Transactions on Modelling and Simulation, Volume 48, 2009, Pages 241-250, ISSN: 1743355X, ISBN: 978-184564187-0.

Autorzy: dr inż. Leszek Nowosielski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: lnowosielski@wat.edu.pl; prof. dr hab. inż. Marian Wnuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: mwnuk@wat.edu.pl; mgr inż. Michał Siłaczuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa.