

Wpływ zastosowanej technologii i materiałów budowlanych na propagację fali elektromagnetycznej

Agnieszka Choroszucho, Jakub Tymiński, Damian Orzechowski

Streszczenie: W artykule został przedstawiony wpływ konstrukcji pomieszczenia na rozkład pola elektromagnetycznego. Wykonana analiza dotyczyła modelu pomieszczenia, w którym zastosowano dwa rodzaje ścian (wykonana z cegieł lub z żelbetu), które zależne są od projektu i zastosowanej technologii budowlanej. Wyniki odniesiono do pomieszczenia o tych samych wymiarach, ale bez wewnętrznej ściany (dzielącej pomieszczenia). Uwzględniono materiał jednorodny (cegłę) oraz złożony (beton wraz ze zbrojeniem). Do analizy numerycznej zastosowano metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (*Finite Difference Time Domain*, FDTD). Analiza dotyczyła częstotliwości stosowanej w sieciach bezprzewodowych (Wi-Fi). Wnioski wskazują, że przy podejściu makroskopowym ściany wykonane z materiału jednorodnego w przewidywalny sposób obniżają jakość sygnału. Natomiast materiał niejednorodny (żelbet) może tworzyć zaniki sygnału bądź podwyższać wartości pola E. Struktury niejednorodne wymagają dokładniejszej i wielowariantowej analizy ze względu na złożoność i różnorodność parametrów materiałowych. Celem analizy jest dokładniejsze zrozumienie zachodzących zjawisk polowych wewnątrz złożonych z różnych materiałów budowlanych pomieszczeń, co jest niezbędne przy współczesnej technologii związanej z inteligentnymi budynkami. Wyniki mogą stanowić źródło wiedzy przy ocenie problemów związanych z zanikami sygnału i wpłynąć na polepszenie jakości przesyłanych danych przy bezprzewodowej komunikacji.

Słowa kluczowe: materiały budowlane, komunikacja bezprzewodowa, propagacja fali elektromagnetycznej, metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD)

🇬🇧 THE INFLUENCE OF USED TECHNOLOGY AND BUILDING MATERIALS ON THE PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE

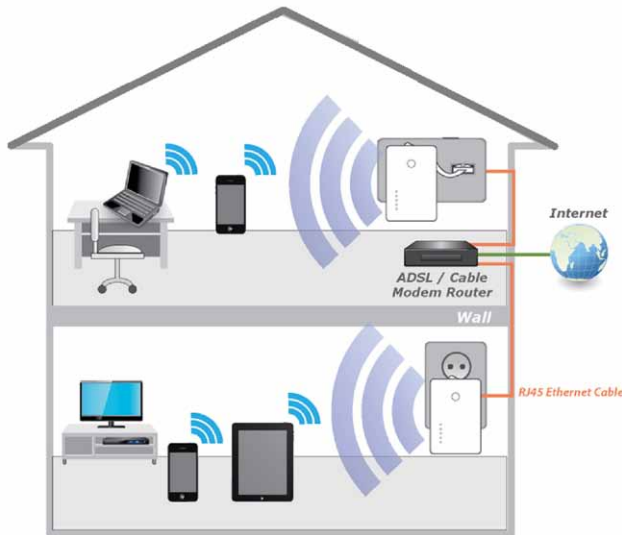
Abstract: The article presents the influence of the room structure on the distribution of the electromagnetic field. The performed analysis concerned a model of a room in which two types of walls were used (made of bricks or reinforced concrete), which depend on the design and the construction technology used. The results were related to a room with the same dimensions but without an inner wall (dividing the rooms). The homogeneous material (brick) and composite material (concrete with reinforcement) were taken into account. The Finite Difference Time Domain (FDTD) method was used for numerical analysis. The analysis concerned the frequency used in wireless networks (Wi-Fi). The conclusions show that with the macroscopic approach, walls made of homogeneous material predictably degrade signal quality. On the other hand, non-homogeneous material (reinforced concrete) may create signal fading or increase the E-field values. Non-homogeneous structures require more precise and multi-variant analysis due to the complexity and variety of material parameters. The aim of the analysis is to better understand the field phenomena occurring inside rooms composed of various building materials, which is necessary in modern technology related to intelligent buildings. The results can be a source of knowledge when assessing problems related to signal fading and improve the quality of data transmitted in wireless communication.

Keywords: building materials, wireless communications systems, electromagnetic wave propagation, finite difference time domain method (FDTD)

Wprowadzenie

Wciąż rozwijane nowe technologie budowlane oraz systemy komunikacji bezprzewodowej wymagają dokładnej analizy zachodzących zjawisk fizycznych przy propagacji fali elektromagnetycznej (EM) przez złożone struktury konstrukcyjne. Zastosowanie fal EM o coraz wyższych częstotliwościach oraz wzrost liczby nadajników wpływa na odbiór przesyłanych sygnałów z wcześniej rozlokowanych stacji. Analiza propagacji fal w zakresie wielkich częstotliwości (np. *Wireless Fidelity*, Wi-Fi) wiąże się z koniecznością badania zjawisk związanych

z oddziaływaniem pola EM i materiałów budowlanych o różnych właściwościach. Stosowanie nowoczesnych systemów komunikacji bezprzewodowej wymaga analizy jakości transmisji danych [2, 6, 8]. Dyfrakcja czy interferencja są wciąż tematem badań mających na celu jak najdokładniejsze określenie rozkładu natężenia pola wewnątrz projektowanych pomieszczeń. Analiza pola EM wymaga również rozpatrzenia efektów związanych z ugięciami, wielokrotnymi odbiciami czy tłumieniem fali na obszarach o zróżnicowanej zabudowie. Wskazane zjawiska



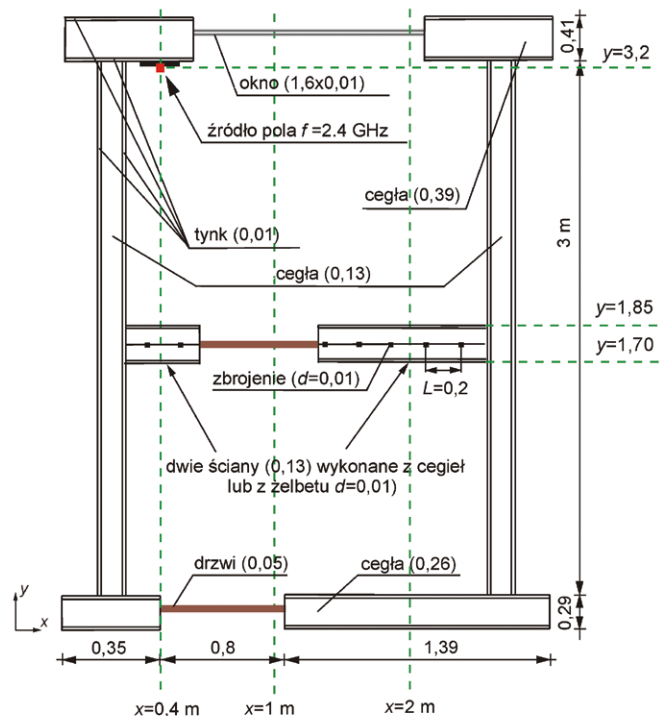
Rys. 1. Przykłady zastosowań komunikacji bezprzewodowej typu Wi-Fi [3]

są efektem rozchodzenia się fal w strukturach zawierających elementy metalowe i zbudowane z niedoskonałych dielektryków (np. beton, gazobeton, różne odmiany cegieł). Występują w nich złożone układy, zawierające struktury periodyczne oraz elementy o szczególnych właściwościach materiałowych i nietypowej geometrii. Konstrukcja odpornych, stabilnych i o oczekiwanych właściwościach sieci komunikacji bezprzewodowej wymusza już na etapie projektowania systemu uwzględnienie konstrukcji budynków i złożonych struktur materiałowych występujących na drodze między nadajnikiem a odbiornikiem. Wskazane problemy są szczególnie widoczne w przypadku sieci bezprzewodowych Wi-Fi o małym zasięgu stosowanych w inteligentnych budynkach. Uwzględnienie nowych konstrukcji (np. dobudówka), jak również już istniejących budynków ma znaczenie przy rozmieszczaniu stacji (np. *Access Point*, AP). Ta technologia pozwala na przesyłanie danych między komputerami, wspólne użytkowanie jednego szerokopasmowego połączenia, łączenia się z serwerem bez konieczności instalowania przewodów (rys. 1) [3, 5].

Celem badań jest ocena rozkładu natężenia pola wewnątrz pomieszczenia wykonanego przy użyciu trzech rodzajów konstrukcji budowlanych. Porównano wartości natężenia pola elektrycznego uzyskane z modelu bez dodatkowej ściany dzielącej pomieszczenia z dwoma wariantami ścian (żelbet, cegła). Analiza pokazuje wpływ jednorodnego materiału budowlanego (cegły pełne) oraz złożonego (konstrukcja betonowa wraz ze zbrojeniem o różnych średnicach) na wartości natężenia pola w rozpatrywanym pomieszczeniu. Otrzymane wnioski w przyszłości pozwolą dokonywać optymalnego projektowania lokalizacji źródeł pola w złożonych konstrukcjach, m.in. zawierających zbrojenie, które mimo współczesnych rozwiązań jest nadal podstawą konstrukcji (szkieletem).

Konstrukcja i założenia analizowanego modelu

Przedmiotem analizy były modele bazujące na technologiach stosowanych w budownictwie. Oceniano rozkład pola



Rys. 2. Geometria pomieszczenia

elektromagnetycznego w pomieszczeniu zawierającym elementy betonowe i ceramiczne oraz przy niezmienionej geometrii zastosowano zbrojenie w ścianach.

Geometria i właściwości ścian nie ulegały zmianom. Przyjęto przy tym trzy warianty konstrukcji pomieszczenia (rys. 2):

- m1: model bez dzielącej ściany;
- m2: model zawierający dwie dzielące ściany wykonane z cegieł pełnych wraz z zamieszczonymi pomiędzy nimi drewnianymi drzwiami;
- m3: model z drzwiami oraz dwiema dzielącymi ścianami wykonanymi z żelbetu ($d = 0,01$ m; $L = 0,2$ m).

W każdym z rozpatrywanych wariantów wpisano punktowe źródło pola generujące falę harmoniczną o częstotliwości $f = 2,4$ GHz. Lokalizacja źródła została przedstawiona na rys. 2, gdzie również zaznaczono prostokątną płytkę ($0,2 \times 0,4 \times 0,15$ m) o właściwościach dielektryka, na której znajdowało się źródło. Wprowadzenie dodatkowego elementu (płytki) miało na celu odwzorowanie konstrukcji urządzenia do komunikacji bezprzewodowej.

Metoda FDTD

Do wyznaczenia rozkładu pola EM wykorzystano metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. *Finite Difference Time Domain*, FDTD) [1, 10]. Metoda FDTD oparta jest na przekształceniu równań Maxwella:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

do postaci różnicowej. Rozkład pola w analizowanym obszarze jest obliczany przez zastosowanie metod bezpośredniego różniczkowania w czasie i przestrzeni. Stąd w układzie współrzędnych prostokątnych np. składową E_x określa się na podstawie zależności

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (3)$$

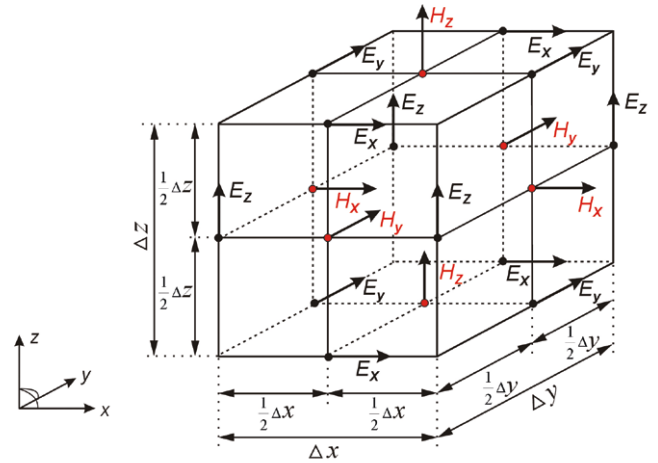
W przestrzeni schemat różnicowy jest realizowany przez właściwe rozmieszczenie wektorów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w ramach każdej komórki. Wektory natężenia pola elektrycznego skojarzonego z komórką Yee są zaczepione w środkach odpowiednich krawędzi, natomiast wektory natężenia pola magnetycznego – w środkowych punktach ścian bocznych (rys. 3). Z każdą komórką związane są parametry materiału, m.in. przenikalność elektryczna ($\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$), przenikalność magnetyczna (μ) i konduktywność (σ), gdzie ε_0 oznacza przenikalność elektryczną próżni ($8,8541 \cdot 10^{-12}$ F/m).

Całkowanie równań Maxwella w dziedzinie czasu oparte jest na zastosowaniu schematu dwukrokowego. W wybranych chwilach czasu, w których wyznacza się rozkład pola elektrycznego, wartości składowych wektora natężenia pola magnetycznego są przesunięte o czas $\Delta t/2$ względem nich. Wyznaczenie składowych wektorów natężenia pola elektrycznego: E_x, E_y, E_z jest możliwe dzięki wcześniejszemu obliczeniu składowych wektorów natężenia pola magnetycznego: H_x, H_y, H_z w poprzednim kroku czasowym algorytmu oraz poprzednie wartości składowych wektorów natężenia pola elektrycznego E_x, E_y, E_z . Opisany ciąg kroków został nazwany procesem przeskoku w czasie (*leap-frog*) (rys. 4).

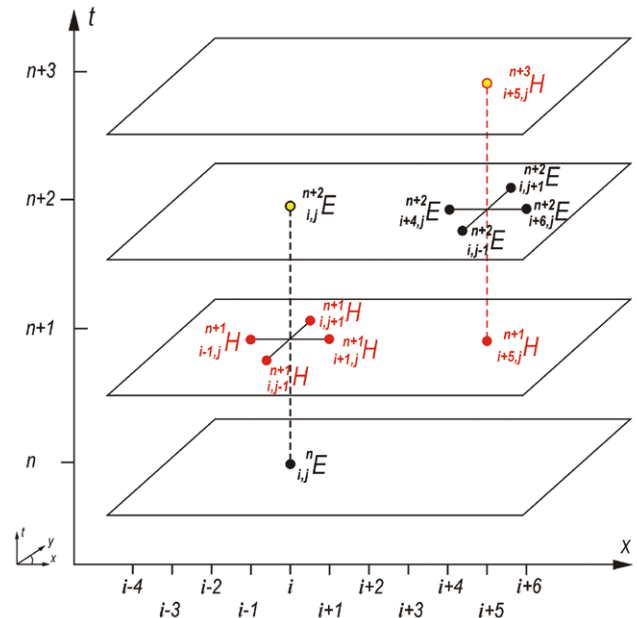
Rozmiar komórki Yee określa przyrost w przestrzeni Δ . W przypadku trójwymiarowym, jeżeli przyjmuje się, że komórka Yee jest sześcienna, gdzie $\Delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$, to odległości pomiędzy odpowiednimi składowymi natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wynoszą $0,5\Delta$. W wyniku aproksymacji pochodnych cząstkowych otrzymuje się równanie Maxwella w postaci różnicowej. Równanie (3) przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} \frac{E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - E_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} = \\ = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{H_z|_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \right. \\ \left. - \frac{H_y|_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

która po przekształceniu pozwala wyznaczyć wartość składowej wzdłuż osi x natężenia pola elektrycznego w punkcie obserwacji ($i, j+1/2, k+1/2$) w czasie $(n+1/2)$ na podstawie obliczonych składowych pola elektromagnetycznego w poprzedzających



Rys. 3. Schemat komórki Yee w metodzie FDTD



Rys. 4. Wyznaczenie wartości składowej E_z w kroku $n+1$ w algorytmie FDTD

chwilach t , w odpowiednich punktach przestrzeni [1, 9–10]. Odpowiedni dobór parametrów schematu różnicowego (w czasie Δt i przestrzeni $\Delta x, \Delta y, \Delta z$) decyduje o zachowaniu stabilności metody FDTD, jak i dokładności otrzymanych rozwiązań. Zatem warunek Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), określający zależność pomiędzy minimalną wartością kroku czasowego Δt a największym rozmiarem komórki Yee ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$), przy założeniu, że siatka była złożona z elementów sześciennych $10 \times 10 \times 10$ mm, został spełniony [9, 10]. W rozważanych układach zostały wykorzystane absorpcyjne warunki brzegowe Mura pierwszego rzędu (ABC) [1, 9, 10].

Opis modelu numerycznego

Rozmiar równomiernej komórki Yee przyjęto $\Delta_x \times \Delta_y \times \Delta_z = 0,01 \times 0,01 \times 0,01$ m. Każdy z modeli zawierał 5 070 000 komórek Yee . Materiały występujące w układzie charakteryzują się następującymi właściwościami [2, 6–8]:

- beton: $\epsilon_r' = 5$; $\sigma = 1,95 \cdot 10^{-3}$ S/m;
- cegła: $\epsilon_r' = 4,44$; $\sigma = 0,01$ S/m;
- tynk: $\epsilon_r' = 2,02$; $\sigma = 0$ S/m;
- szkło: $\epsilon_r' = 5$; $\sigma = 0,12$ S/m;
- drewno: $\epsilon_r' = 2,5$; $\sigma = 0,003$ S/m.

Ilościowa analiza wyników była prowadzona w płaszczyźnie XY i o 0,5 m poniżej lokalizacji źródła pola. Analizowano rozkład pola wzdłuż trzech prostych równoległych do osi OY (oznaczonych zieloną linią przerywaną 4 b):

- $x = 0,4$ m – w miejscu lokalizacji źródła pola;
- $x = 1$ m, w odległości 0,6 m od źródła pola;
- $x = 2$ m, w odległości 1,6 m od punkтового źródła pola.

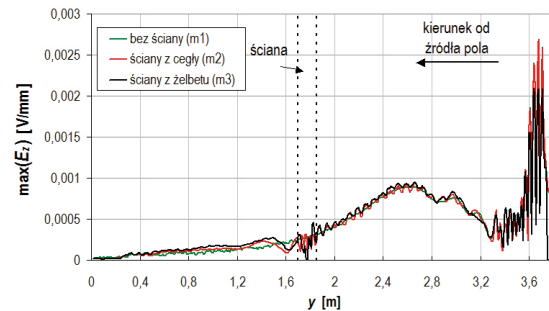
Wyniki analizy

Ocenę rozkładu pola elektromagnetycznego uzyskano przy zastosowaniu metody FDTD. Dokonano porównania rozkładu natężenia pola elektromagnetycznego w stanie ustalonym oraz dla tej samej chwili czasowej. Na rys. 4–6 przedstawiono rozkłady natężenia pola elektrycznego wewnątrz analizowanych trzech konstrukcji (m1, m2, m3).

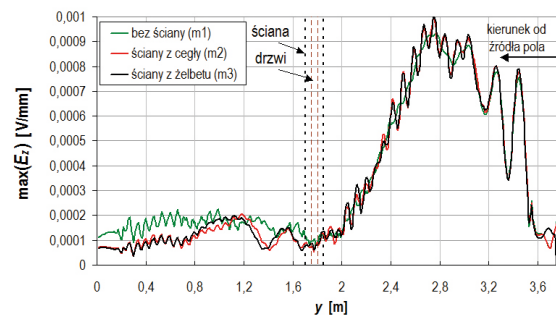
Rysunek 5 przedstawia rozkład maksymalnych wartości składowej E_z wzdłuż prostej $x = 0,4$ m w płaszczyźnie XY znajdującej się 0,5 m poniżej lokalizacji punkowego źródła pola. Analiza wartości $\max(E_z)$ w części pomieszczenia ze źródłem pola ($y \in (1,85; 3,3)$ m) wykazała, że najmniej minimów i maksimów w rozkładzie natężenia pola występuje w modelu bez ściany działowej (m1). Natomiast w przypadkach ściany żelbetowej występuje większa nierównomierność w rozkładzie pola elektrycznego.

Na podstawie oceny rozkładu $\max(E_z)$ w części pomieszczenia bez źródła pola ($y < 1,7$ m) najniższe wartości otrzymano w modelach zawierających ściany (m2, m3). W modelach zawierających ściany, w analizowanym obszarze za ścianą wartości pola są porównywalne (rys. 6). Charakterystyki prezentowane na rys. 6 (wzdłuż prostej $x = 1$ m) pokazują, że w obszarze za drzwiami ($y < 1,75$ m) wartości pola elektrycznego w konstrukcjach złożonych z dwóch ścian są zbliżone. Oznacza to, że efekty pośredniego przejścia fali przez ściany działowe (cegła, żelbet) są mało istotne. Wraz ze wzrostem odległości od źródła pola ($y < 0,8$ m) najwyższe wartości składowej E_z występują w konstrukcji bez ściany (m1).

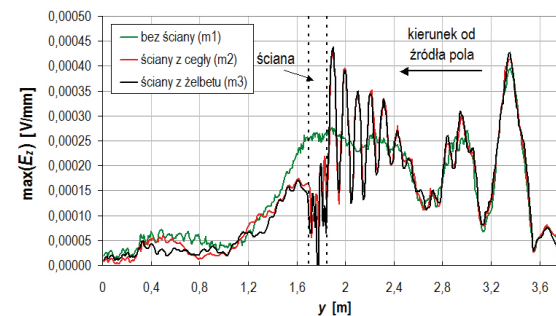
Rysunek 7 przedstawia rozkład maksymalnych wartości składowej E_z w płaszczyźnie XY znajdującej się poniżej lokalizacji źródła pola, wzdłuż prostej $x = 2$ m. Na skutek odbić od ściany, w części obszaru ze źródłem pola ($y \in (1,85; 2,4)$ m), widoczne są liczne minima i maksima o zbliżonych wartościach natężenia pola dla wszystkich wariantów ścian (m2, m3). Natomiast po przejściu fali elektromagnetycznej przez ścianę następuje zmniejszenie wartości analizowanej składowej o 37% względem wartości przed ścianą dla modeli (m2, m3).



Rys. 5. Rozkład natężenia pola (E_z) wzdłuż osi OY dla linii $x = 0,4$ m



Rys. 6. Rozkład natężenia pola (E_z) wzdłuż osi OY dla linii $x = 0,1$ m



Rys. 7. Rozkład natężenia pola (E_z) wzdłuż osi OY dla linii $x = 2$ m

Szczegółowa analiza wpływu konstrukcji ściany na rozkład natężenia pola elektrycznego wykazała, że w obszarze bez źródła pola (za ścianą działową):

- najniższe wartości natężenia pola występowały w konstrukcji ze ścianami (m2, m3);
- wzdłuż prostej $x = 2$ m, w obszarze $y \in (0,8; 1,1)$ m występował lokalny spadek wartości natężenia pola;
- wzdłuż prostej $x = 2$ m wartości natężenia pola elektrycznego w wariantach z drzwiami są porównywalne do wartości otrzymanych dla modelu bez ściany; wynika to z właściwości materiałowych drewna oraz grubości drzwi, które w znikomym stopniu tłumią falę elektromagnetyczną.

Podsumowanie

W ośrodkach materialnych prędkość fali elektromagnetycznej jest zależna od rodzaju ośrodka oraz od częstotliwości fali.

Na skutek absorpcji fala ulega stopniowemu osłabieniu. Nie- wielkie niejednorodności ośrodka (np. zbrojenie) powodują, iż fala ulega częściowemu rozproszeniu praktycznie we wszystkich kierunkach. Przy pobudzeniu sinusoidalnym zastosowana metoda FDTD obrazowo przedstawia procesy falowe. Zastosowanie dyskusowanych metod różnicowych pozwala na jakościową ocenę różnych wariantów, z uwzględnieniem struktury materiałowej i geometrii konstrukcji budowlanych.

Konstrukcja, jak i materiał, z jakiego zostały wykonane ściany, wpływa na rozkład pola elektrycznego. Dzięki odpowiedniej lokalizacji źródła pola elektromagnetycznego (np. AP) i przy uwzględnieniu otaczającej konstrukcji, rodzaju materiałów budowlanych można uzyskać oczekiwany rozkład pola i w ten sposób dążyć do poprawy jakości komunikacji bezprzewodowej.

Analiza dużych układów wymaga zastanowienia się nad zastosowaniem w przyszłości homogenizacji konstrukcji pod względem danych materiałowych w celu np. zmniejszenia kosztów obliczeń związanych ze zmniejszeniem siatki i otrzymaniem dokładniejszych wyników. Zwłaszcza przy wciąż rosnącej tendencji nowych technologii budowlanych oraz materiałów o odpowiednio opracowywanych właściwościach w celu energooszczędności przy wykorzystaniu do inteligentnych budynków.

Literatura

- [1] TAFLOVE A., HAGNESS S.C.: *Computational Electrodynamics: The finite – difference time – domain method*. Boston, Artech House, 2005.
- [2] CUIÑAS I., GARCÍA SÁNCHEZ M.: *Permittivity and Conductivity Measurements of Building Materials at 5,8 GHz and 41,5 GHz*. *Wireless Personal Communications: An International Journal*, vol. 20, no. 1.

- [3] <http://www.edimax.com/edimax/au>.
- [4] DUNTEMANN J.: *Przewodnik po sieciach Wi-Fi*. Nakom, Poznań 2006.
- [5] <http://www.amazon.com>.
- [6] CHOROSZUCHO A., BUTRYŁO B.: *Numeryczna analiza wpływu parametrów elektrycznych ścian wykonanych z betonu na wartości natężenia pola elektrycznego*. „Przegląd Elektrotechniczny” 12/2013.
- [7] PN-EN 771-1:2006 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 1: Elementy murowe ceramiczne.
- [8] CHOROSZUCHO A., BUTRYŁO B.: *The numerical analysis of the influence conductivity of clinker bricks and the size of their hollows on the distribution of the electromagnetic field*. „Przegląd Elektrotechniczny” 11a/2012.
- [9] SADIKU M.N.O.: *Numerical techniques in electromagnetics*. CRS Press LLC. 2nd edition, 2001.
- [10] ELSHERBENI A.Z., DEMIR V.: *The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB Simulations*. SciTech Publishing, Inc, USA, 2009.

dr inż. Agnieszka Choroszucho, Jakub Tymiński,
Damian Orzechowski, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny
e-mail: a.choroszucho@pb.edu.pl, jakubtymiskimail@gmail.com,
damian.orzechowsky@outlook.com

artykuł recenzowany

reklama



Darmowa e-prenumerata!

www.nis.com.pl

napędy i sterowanie miesięcznik naukowo-techniczny

